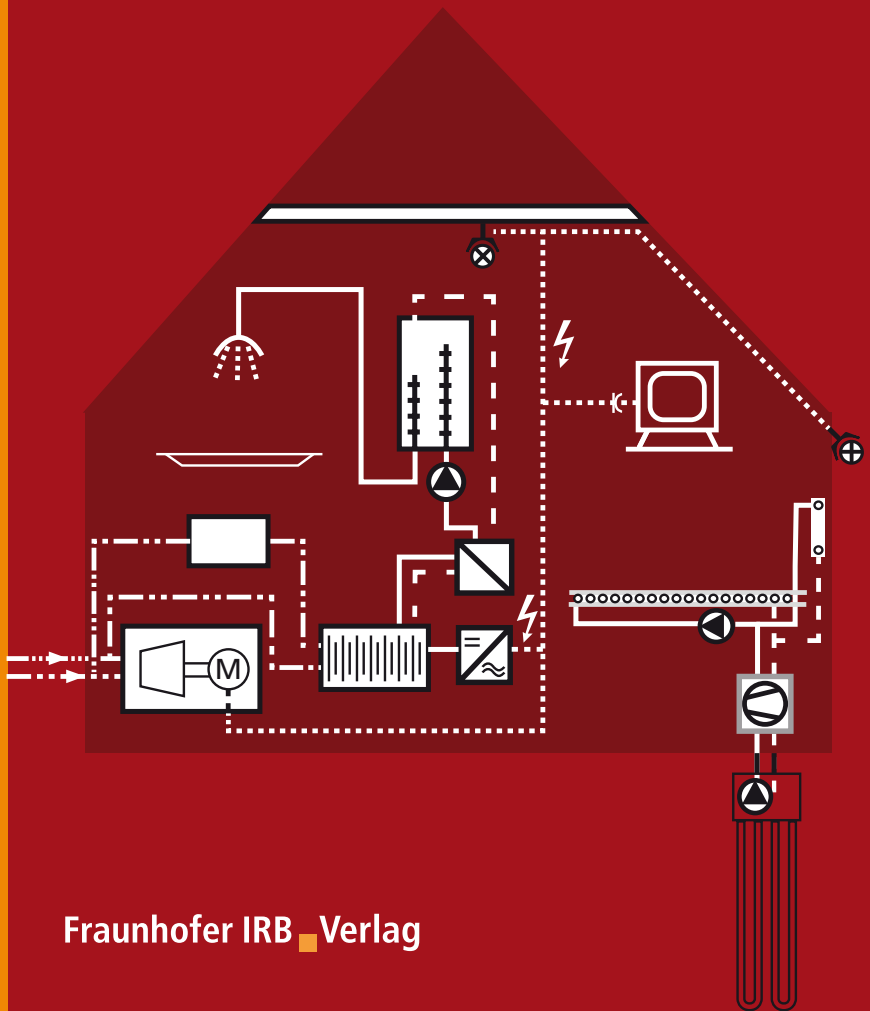


Eric Theiß

# Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik

Energieeffiziente Systemtechnologien  
der Kraft- und Wärmetechnik

Anlagenkonzepte, Anwendungen und Praxistipps



Fraunhofer IRB  Verlag

Eric Theiß

## **Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik**



Eric Theiß

# **Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik**

Energieeffiziente Systemtechnologien  
der Kraft- und Wärmetechnik

Anlagenkonzepte, Anwendungen, Praxistipps

Fraunhofer IRB Verlag

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8269-8

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8837-9

Herstellung: Sonja Frank und Dietmar Zimmermann

Layout: Dietmar Zimmermann

Umschlagskonzeption: Elisabeth Theiß

Satz: Manuela Gantner

Druck: Gulde Druck GmbH & Co. KG

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

### Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart

Telefon 0711 9 70-25 00

Telefax 0711 9 70-25 08

E-Mail: [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

<http://www.baufachinformation.de>

## Vorwort

Angesichts einer zunehmenden Verknappung der Energiere Ressourcen sowie der ständig steigenden Energiepreise gewinnen die Technologien der rationellen Energieanwendung zunehmend an Bedeutung. Zudem wird der rationelle Umgang aus ökologischen und ökonomischen Betrachtungen immer wichtiger und hat mittlerweile auch im Bewusstsein der Bevölkerung einen hohen Stellenwert erreicht.

Aufgrund der steigenden Energiepreise und knapper werdenden Rohstoffen wird anhaltend nach technisch neuen Möglichkeiten gesucht, um die bestehenden konventionellen und energieintensiven Systeme zu überdenken und mit innovativen Ansätzen Lösungen zu entwickeln, die bei gleicher Funktionalität erheblich weniger Energie erfordern.

Band 1 der Rationellen Energieanwendungen in der Gebäudetechnik befasst sich mit der Energieeinsparung und Steigerung des Nutzerkomforts in der Kraft- und Wärmetechnik.

Die Reduzierung des Energiebedarfs in Gebäuden sowie die Energiebedarfsdeckung erfordern den Einsatz innovativer architektonischer und gebäudetechnischer Konzepte, die in ganzheitlichen Ansätzen zusammenzuführen sind.

Ein ganzheitliches Denken zur sinnvollen Energienutzung sollte aber von dem Grundsatz hergeleitet werden, dass erst dann über die zusätzlich Integration regenerativer Energien nachgedacht werden sollte, nachdem die Maßnahmen des solaren Bauens (Gebäudeausrichtung, Bauphysik, passiver Solargewinn, etc.) ausgeschöpft wurden. Erst im Anschluss daran sollte der Bedarf der klima- und kältetechnischen Komponenten auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß reduziert und der Zusatznutzen mit den finanziellen Möglichkeiten (Förderungs-, Steuer- und Marktanreizprogramm) abgestimmt werden.

Die Gebäude der Zukunft werden nicht nur mit regenerativen Energien versorgt, sondern die rationellen Energieanwendungen werden zunehmend die Technologien der Energiespeicher für elektrischen Strom und Wärme einschließen. Bei der »Rationellen Energieumwandlung und Energieanwendung« handelt es sich im eigentlichen Sinne um keine Energieform. Sie wird aufgrund ihres enormen Potenzials besonders in den Industrieländern der Energie gleichgesetzt, weil zur Gewährleistung der erforderlichen Energiedienstleistungen weniger Primärenergie einzusetzen ist.

Während es in der Energiewirtschaft überwiegend um den Anteil der regenerativen Energien an der Stromerzeugung geht, spielen im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) die Kälte- und Wärmebereitstellung die Hauptrolle. So sollte z. B. aus wirtschaftlichen Aspekten die Errichtung von Energiepfehlern vor allem in der Entwurfsphase, d. h. vor der Gebäudegründung, untersucht werden.

Aufgrund statistischer Erhebungen zeigt sich, dass auch zunehmend der Altbaubereich durch Sanierungen und Modernisierungen betroffen wird, wobei hier spezielle Lösungen zu suchen sind, die wirtschaftlich, energetisch und technisch realisierbar sein müssen. Gerade im Altbau-, Umbau- und Erweiterungsbereich liegt der Tenor primär in der Reduzierung des Energiebedarfs. Neben den bauphysikalischen Aspekten spielt hier insbesondere die optimierte Anwendung der regenerativen Energien eine besondere Rolle. Die Art und der Umfang der Nutzung sind jedoch von den jeweiligen Randbedingungen abhängig.

Die meisten technischen Lösungen sind hierbei auf die Neubauten zugeschnitten. Diese betreffen einerseits die Abstimmung auf den Leistungsbedarf und andererseits im größeren Umfang deren Integration und Bereitstellung in das Gebäudegesamtsystem.

Mit den Inhalten dieses Fachbuchs wurde beabsichtigt, dass dem Leser die aktuellen marktreifen rationellen Technologien, Prototypen und Innovationen, aber auch die derzeit noch vorliegenden Schwierigkeiten in der Testphase vor Einführung der Serienreife vermittelt werden. Im Fokus stehen neueste Lösungsansätze und Forschungsergebnisse, Objektbeschreibungen über ausgeführte Anlagen und Referenzprojekte. Der Trend zeigt auch, dass Immobilien mit der Kennzeichnung als »Green« oder »Eco« gefragt sind, wobei sich diese Objekte durch die hohen Anforderungen an die Energieeffizienz und den Nutzerkomfort sowie gleichzeitig durch die ausbalancierten Lebenszykluskosten auszeichnen.

Für die hochgesteckten Ziele im Bereich des Klimaschutzes, der Energieeffizienzsteigerung und der Ressourcenschonung kann die technische Gebäudeausrüstung, insbesondere die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sowie die Klima- und Raumlufttechnik einen wesentlichen Beitrag leisten.

Das Ziel des Themenspektrums in diesem Fachbuch soll es sein, das Bewusstsein zur Energieeffizienz zu fördern. Hierzu zählen insbesondere die Aspekte wie Nachhaltigkeit und dass in der Gebäudekonzipierung im Einklang mit der Auswahl der technischen Gebäudeausrüstung ökologische, ökonomische und Ressourcen sparende sowie energieeffiziente Maßnahmen umgesetzt werden.

Aufgrund dieses Hintergrundes werden auch die den jeweiligen Technologien zugeordneten Parameter unter Zugrundelegung der aktuellen Regelwerke, Verordnungen, Richtlinien sowie der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dargestellt. Zudem werden zur Vertiefung die für die einzelnen Technologien relevanten Systemfindungen durch Beispiele und Anlagenbeschreibung erläutert sowie um eine Auflistung von Referenzprojekten ergänzt.

Das Glossar der einzelnen Technologiebereiche und die Zusammenfassung der wichtigsten Kontaktadressen schließen die Thematik ab.

Sämtliche Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt und dürfen ohne schriftliche Genehmigung des Verlages nicht in irgendeiner Form reproduziert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Verwendung der ausgedruckten Grafiken für Studien- und Diplomarbeiten sowie Dissertationen ist bei Angabe der Quelle erlaubt.

Erstellung der Abbildungen, Grafiken und Tabellen: Dipl.-Design. Elisabeth Theiß

München, im September 2011

# Inhaltsverzeichnis

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1.0</b> | <b>Grundlagen</b>   | <b>13</b> |
| 1.1        | Allgemein   | 13        |
| 1.1.1      | Baukörper und technische Systeme der Energieverwendung                          | 13        |
| 1.1.2      | Kosten und Nutzen von Maßnahmen zur Energieeinsparung                           | 13        |
| 1.1.3      | Gesetzliche Rahmenbedingungen   | 14        |
| 1.1.3.1    | Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)   | 14        |
| 1.1.3.2    | Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)                         | 14        |
| 1.1.3.3    | Zentrale Stromerzeugung   | 16        |
| 1.1.4      | Energiearten  | 16        |
| 1.1.4.1    | Energiewertigkeit der Wärme   | 17        |
| 1.1.4.2    | Energiebegriffe und Umwandlungen  | 17        |
| 1.1.4.3    | Energiebilanz für technische Systeme  | 22        |
| 1.1.5      | Energieeffizienz: Energieprofil von Gebäuden                                    | 23        |
| 1.1.5.1    | Energieeinsparverordnung (EnEV)   | 25        |
| 1.1.5.2    | Neuerungen in der EnEV 2007   | 26        |
| 1.1.5.3    | Neuerungen in der EnEV 2009   | 26        |
| 1.1.5.4    | Anwendung der EnEV auf den Gebäudebestand                                       | 27        |
| 1.1.6      | Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs)   | 28        |
| 1.1.6.1    | Nutzungskosten  | 30        |
| 1.1.6.2    | Ver- und Entsorgungskosten  | 30        |
| 1.1.6.3    | Reinigung, Wartung, Instandsetzung  | 30        |
| 1.1.6.4    | Veränderte Randbedingungen  | 31        |
| 1.1.6.5    | Objektbeispiel  | 31        |
| 1.2        | Maßnahmen zur Energieeinsparung   | 32        |
| 1.2.1      | Energetische Bewertung und Nutzerverhalten                                      | 33        |
| 1.2.1.1    | Energieeinsparung durch Raumtemperaturabsenkung                                 | 33        |
| 1.2.1.2    | Nachtabenkung   | 33        |
| 1.2.1.3    | Wärmedämmung und Anlagentechnik   | 34        |
| 1.2.1.4    | Gestalterischer Freiraum durch bessere Anlagentechnik<br>(Kompensationsprinzip) | 38        |
| 1.2.2      | Gebäudestandards und Energiespargebäude   | 41        |
| 1.2.2.1    | Niedrigenergiehaus  | 41        |
| 1.2.2.2    | Nullenergiehaus   | 45        |
| 1.2.2.3    | Passivenergiehaus   | 46        |
| 1.2.3      | Energieoptimierte Gebäudehülle  | 48        |
| 1.2.3.1    | Energieoptimiertes Bauen (EnOB)   | 49        |
| 1.2.3.2    | Solararchitektur  | 50        |
| 1.2.3.3    | Green-Building-Architektur  | 50        |
| 1.2.3.4    | LowEx-Gebäude   | 50        |
| 1.2.4      | Bauphysik   | 51        |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 1.2.4.1    | Wärmeschutz und Energieeinsparung nach DIN 4108                             | 52        |
| 1.2.4.2    | Innovative Wärmedämmungen   | 52        |
| 1.2.4.3    | Thermochemische Speicherung   | 53        |
| 1.2.5      | Passive Sonnennutzung   | 56        |
| 1.2.5.1    | Nutzung der Sonnenenergie ohne technische Umwandlungsprozesse               | 57        |
| 1.2.6      | Bauteilaktivierung  | 58        |
| 1.2.6.1    | Aktivierbare Speichermasse  | 59        |
| 1.2.6.2    | Hybridsysteme   | 61        |
| 1.2.6.3    | LowEx-TGA-Systeme   | 61        |
| 1.3        | Contracting   | 62        |
| 1.3.1      | Contractinggesellschaftsform  | 62        |
| 1.3.2      | Energiesparcontracting (Performancecontracting)                             | 65        |
| 1.3.3      | Wärmecontracting ohne Eigenkapital  | 65        |
| 1.3.4      | Anlagencontracting  | 66        |
| 1.3.5      | Betriebsführungs- und/oder Instandhaltungscontracting                       | 67        |
| 1.3.6      | Referenzprojekte  | 67        |
| 1.4        | Förderprogramme   | 67        |
| 1.4.1      | ERP-Umwelt- und Energiesparprogramm<br>(Darlehen für Umweltschutzmaßnahmen) | 67        |
| 1.4.2      | Förderungen im Marktanreizprogramm  | 68        |
| 1.4.3      | Zusätzliche Förderungsmöglichkeiten   | 68        |
| 1.4.3.1    | Förderbedingungen der KfW (Anpassung an die EnEV)                           | 68        |
| 1.4.3.2    | Förderungen nach dem EEWärmeG   | 70        |
| 1.5        | Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen  | 70        |
| <b>2.0</b> | <b>Regelwerke</b>   | <b>75</b> |
| 2.1        | Begriffsbestimmungen, Definitionen  | 75        |
| 2.1.1      | Normen und Richtlinien in der Europäischen Gemeinschaft                     | 75        |
| 2.1.2      | Nationales Recht (Bundesrecht)  | 75        |
| 2.1.3      | Landesrecht   | 75        |
| 2.2        | Regelwerksystematik   | 76        |
| 2.2.1      | Normenkenntnis als Notwendigkeit  | 76        |
| 2.2.2      | Entstehung der Normen   | 76        |
| 2.2.3      | Die Bedeutung des Farbdrucks bei der Normung                                | 77        |
| 2.2.4      | Gesetzeslage der Normung  | 77        |
| 2.2.4.1    | Anerkannte Regel der Technik  | 78        |
| 2.2.4.2    | Stand der Technik   | 78        |
| 2.2.4.3    | Stand von Wissenschaft und Technik  | 79        |
| 2.2.4.4    | Einhaltung der Normen und Vorschriften                                      | 79        |
| 2.3        | Richtlinien und Verordnungen  | 80        |
| 2.3.1      | VDI-Richtlinien (Technische Regeln)   | 80        |
| 2.3.2      | VDE-Bestimmungen  | 80        |
| 2.3.3      | VdS-Richtlinien   | 80        |
| 2.3.4      | Sonstige Richtlinien und Merkblätter  | 81        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.4        | Verzeichnis der Normen in Kapitel 1 bis 5   | 81        |
| 2.5        | Verzeichnis der Richtlinien und Verordnungen in Kapitel 1 bis 5   | 88        |
| <b>3.0</b> | <b>Energetische Potenziale in der Wärmetechnik</b>  | <b>95</b> |
| 3.1        | Gesetzliche Rahmenbedingungen   | 95        |
| 3.1.1      | Energetische Bewertung von Gebäuden nach DIN V 18599<br>(Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs)      | 95        |
| 3.1.1.1    | Allgemeine Bilanzierungsverfahren: Begriffe, Zonierung<br>und Bewertung der Energieträger (DIN V 18599-1) | 96        |
| 3.1.1.2    | Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen<br>(DIN V 18599-2)                               | 96        |
| 3.1.1.3    | Endenergiebedarf von Heizsystemen (DIN V 18599-5)   | 97        |
| 3.1.1.4    | Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen<br>(DIN V 18599-8)                            | 98        |
| 3.1.2      | Verfahren zur Berechnung der Normheizlast nach DIN EN 12831   | 99        |
| 3.2        | Komponenten-Optimierungen   | 100       |
| 3.2.1      | Verbrennungsregelungen  | 100       |
| 3.2.1.1    | Brennverhalten – Betriebsbedingungen  | 101       |
| 3.2.1.2    | Brennerlaufzeiten   | 102       |
| 3.2.1.3    | Lambda-Control-System (LCS)   | 102       |
| 3.2.1.4    | Das SCOT-Control-Verfahren  | 103       |
| 3.2.2      | Pumpenregelungen  | 104       |
| 3.2.2.1    | Regelungsmöglichkeiten von Pumpen und energetisch Effekte   | 105       |
| 3.2.2.2    | Optimierung der Pumpensteuerungen   | 106       |
| 3.2.2.3    | Innovative Umwälzpumpentechnologie  | 108       |
| 3.2.3      | Hydraulischer Abgleich  | 112       |
| 3.2.3.1    | Zortström-Hydraulik   | 113       |
| 3.2.3.2    | Hydraulischer Nullpunkt   | 114       |
| 3.2.4      | Mess-, Steuer- und Regelungstechnik/Gebäudeleittechnik  | 120       |
| 3.2.4.1    | Die »Weltnorm« DIN EN ISO 16484   | 120       |
| 3.2.4.2    | Energieeffiziente Gebäudeautomation   | 122       |
| 3.2.4.3    | Vier Effizienzklassen der Gebäudeautomationssysteme   | 122       |
| 3.2.4.4    | Gebäudeautomation und Feldbustechnologie  | 123       |
| 3.2.4.5    | Normierte Standardbussysteme  | 126       |
| 3.2.4.6    | Referenzprojekte  | 129       |
| 3.2.5      | Wärmespeichersysteme  | 130       |
| 3.2.5.1    | Latentwärmespeicher   | 130       |
| 3.2.5.2    | Thermochemische Speicher  | 132       |
| 3.2.5.3    | Adsorptionswärmespeicher  | 133       |
| 3.2.5.4    | Innovation der thermochemischen Speicherung<br>mit einem Absorptionsverfahren                             | 134       |
| 3.2.6      | Wärme- und Kälteschutz  | 134       |
| 3.2.6.1    | Wärmeverteilungs-dämmung  | 135       |
| 3.2.6.2    | Kältetechnische Verteilungs-dämmung   | 135       |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.3        | Brennwerttechnologie                                 | 136        |
| 3.3.1      | Gas-Brennwerttechnologie                             | 137        |
| 3.3.1.1    | Einflussgrößen der Brennwertnutzung                  | 137        |
| 3.3.1.2    | Optimale Brennwertnutzung                            | 146        |
| 3.3.2      | Öl-Brennwerttechnologie                              | 150        |
| 3.3.2.1    | Öl-Brennwerttechnologie und Solarthermie             | 150        |
| 3.3.3      | Objektbeispiel und Referenzprojekte                  | 152        |
| 3.3.4      | Förderungen und normative Rahmenbedingungen          | 153        |
| 3.3.5      | Wirtschaftlichkeit                                   | 154        |
| 3.4        | Kraft-Wärme-Kopplung                                 | 155        |
| 3.4.1      | Grundlagen   | 155        |
| 3.4.1.1    | Gesetzliche Rahmenbedingungen                        | 158        |
| 3.4.1.2    | KWK-Systemvarianten                                  | 159        |
| 3.4.1.3    | Technik und Betriebsweise                            | 160        |
| 3.4.1.4    | Wirkungsgradverbesserung                             | 161        |
| 3.4.1.5    | Innovative KWK-Technologien                          | 161        |
| 3.4.2      | Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung                         | 161        |
| 3.4.2.1    | Grundlagen   | 161        |
| 3.4.2.2    | Verbrennungsmotorische Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung  | 164        |
| 3.4.2.3    | Stirlingmotorische Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung      | 169        |
| 3.4.2.4    | Mikrogasturbinen-KWK                                 | 183        |
| 3.4.2.5    | Kleinst-Brennstoffzellen-KWK                         | 192        |
| 3.4.2.6    | Brennstoffzellen-Innovationen                        | 208        |
| 3.4.3      | Blockheizkraftwerke                                  | 211        |
| 3.4.3.1    | Verbrennungsmotor-BHKW                               | 212        |
| 3.4.3.2    | Stirling-BHKW  | 217        |
| 3.4.3.3    | Organic Rankine Cycle-BHKW                           | 217        |
| 3.4.3.4    | Kalina-Technologie                                   | 221        |
| 3.4.3.5    | Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke                 | 221        |
| 3.4.4      | Förderungen und normative Rahmenbedingungen          | 228        |
| 3.4.5      | Wirtschaftlichkeit                                   | 233        |
| 3.4.5.1    | Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks (BHKW)  | 233        |
| 3.4.5.2    | Wirtschaftlichkeit einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)  | 233        |
| 3.4.5.3    | Wirtschaftlichkeit von Kleinst-KWK-Anlagen           | 234        |
| 3.5        | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)                    | 236        |
| 3.5.1      | Grundlagen   | 236        |
| 3.5.2      | Objektbeispiel                                       | 237        |
| 3.5.3      | Kleinst-KWKK-Anlagen                                 | 239        |
| 3.5.4      | Förderprogramme                                      | 240        |
| <b>4.0</b> | <b>Energetische Potenziale in der Sanitärtechnik</b> | <b>241</b> |
| 4.1        | Abwasserwärmerückgewinnung                           | 241        |
| 4.1.1      | Referenzprojekte                                     | 242        |
| 4.2        | Druckluftwärmerückgewinnungsanlagen                  | 244        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.2.1      | Objektbeispiel  | 246        |
| 4.3        | Förderungen   | 248        |
| 4.4        | Wirtschaftlichkeit  | 248        |
| <b>5.0</b> | <b>Wärmepumpentechnologie</b>   | <b>249</b> |
| 5.1        | Grundlagen  | 249        |
| 5.1.1      | Gesetzliche Rahmenbedingungen   | 249        |
| 5.1.2      | EnEV und Wärmepumpeneinsatz bei Sanierungen   | 251        |
| 5.1.3      | Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresaufwandszahlen   | 253        |
| 5.1.3.1    | Gütesiegel  | 253        |
| 5.1.3.2    | RAL-Gütesicherung »Geothermische Anlagen«   | 254        |
| 5.1.4      | Leistungsbetrachtungen  | 254        |
| 5.1.4.1    | Leistungs- und Arbeitszahl  | 254        |
| 5.1.4.2    | Leistungsmessungen und Normbetriebspunkte nach DIN EN 255                                       | 256        |
| 5.1.4.3    | Wärmequellenanlage  | 257        |
| 5.1.4.4    | Wärmepumpenfunktionsprinzip   | 259        |
| 5.1.4.5    | Scrollverdichter  | 261        |
| 5.1.4.6    | Geräuschemissionen  | 261        |
| 5.1.5      | Genehmigung   | 262        |
| 5.1.5.1    | Bauliche Aspekte  | 262        |
| 5.1.5.2    | Wasserrechtliche Aspekte  | 263        |
| 5.1.5.3    | Wasserrechtliche Aspekte für oberflächennahe Geothermie   | 264        |
| 5.2        | Konstruktionsvarianten  | 265        |
| 5.2.1      | Elektrowärmepumpe   | 265        |
| 5.2.2      | Gasmotorische Wärmepumpe  | 267        |
| 5.2.2.1    | Gasmotorisch Kaltdampfanlage bzw. Wärmepumpe (Gas-Heat-Pump)                                    | 269        |
| 5.2.3      | Absorptionswärmepumpe   | 270        |
| 5.2.3.1    | Absorptionswärmepumpen (Heizen und Kühlen mit einem System)                                     | 271        |
| 5.2.3.2    | Absorptionswärmepumpe und Eisspeicher   | 272        |
| 5.3        | Betriebsvarianten   | 273        |
| 5.3.1      | Energiequelle Luft und Umweltenergie  | 273        |
| 5.3.1.1    | Monovalenter Wärmepumpenbetrieb   | 274        |
| 5.3.1.2    | Monoenergetische Betriebsweise  | 274        |
| 5.3.1.3    | Effizienter Betrieb der bivalenten Wärmepumpe   | 275        |
| 5.3.1.4    | Bivalente alternative Betriebsweise   | 275        |
| 5.3.2      | Energiequelle Grund- oder Brunnenwasser sowie Umweltenergie wie Luft, Sonne, Wärmerückgewinnung | 275        |
| 5.3.2.1    | Bivalente-parallele Betriebsweise   | 276        |
| 5.3.2.2    | Bivalent-teilparalleler Betrieb   | 276        |
| 5.3.3      | Geregelter Wärmepumpenverdichter  | 277        |
| 5.4        | Systemvarianten (Wärmequelle/Wärmesenke)  | 278        |
| 5.4.1      | Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W-WP)   | 278        |
| 5.4.2      | Luft/Luft-Wärmepumpe (L/L-WP)   | 279        |
| 5.4.3      | Wasser/Luft-Wärmepumpe (W/L-WP)   | 279        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 5.4.4      | Wasser/Wasser-Wärmepumpe (W/W-WP)  | 280        |
| 5.4.5      | Sole/Wasser-Wärmepumpe   | 280        |
| 5.4.6      | Erdreich/Luft-Wärmepumpe   | 280        |
| 5.4.7      | Erdreich/Wasser-Wärmepumpe   | 280        |
| 5.4.8      | Objektbeispiele – Referenzprojekte   | 281        |
| 5.4.8.1    | Grund-/Brunnenwassernutzung  | 281        |
| 5.4.8.2    | Abwärmenutzung   | 282        |
| 5.4.8.3    | Massivabsorber (Fundamentplatten)  | 285        |
| 5.5        | Oberflächennahe Geothermie   | 285        |
| 5.5.1      | Gesetzliche Rahmenbedingungen  | 286        |
| 5.5.2      | Wärmequellenerschließung   | 286        |
| 5.5.2.1    | Erdwärme-Flächenkollektoren  | 287        |
| 5.5.2.2    | Erdwärmesonden   | 288        |
| 5.5.2.3    | CO <sub>2</sub> -Erdwärmesonden  | 291        |
| 5.5.2.4    | Energiepfähle (Gründungspfähle)  | 293        |
| 5.6        | Wärmepumpen-Innovationen   | 295        |
| 5.6.1      | Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP)  | 295        |
| 5.6.1.1    | Kombination einer Diffusions-Absorptionswärmepumpe<br>mit einem Brennwertwärmeerzeuger | 298        |
| 5.6.2      | Vuilleumier-Wärmepumpe   | 299        |
| 5.6.3      | Zeolith-Wärmepumpe   | 301        |
| 5.7        | Anlagenvarianten (Hybridsysteme)   | 303        |
| 5.7.1      | Wärmepumpe und Solarthermie  | 303        |
| 5.8        | Förderungen und normative Rahmenbedingungen  | 309        |
| 5.8.1      | Förderung für Wärmepumpen und RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung                       | 310        |
| 5.8.2      | Förderungen im Marktanreizprogramm   | 310        |
| 5.9        | Wirtschaftlichkeit   | 312        |
| <b>6.0</b> | <b>Glossar</b>   | <b>317</b> |
| <b>7.0</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>333</b> |
| 7.1        | Online-Berichte  | 333        |
| 7.2        | Fachbücher   | 333        |
| 7.3        | Fachartikel  | 333        |
| <b>8.0</b> | <b>Kontaktadressen (Weiterführende Weblinks)</b>                                       | <b>335</b> |
| 8.1        | Architekten  | 335        |
| 8.2        | Institute  | 336        |
| 8.3        | Vereine/Verbände   | 337        |
| 8.4        | Produkt- und Systemhersteller  | 338        |
| 8.5        | Sonstige Informationsquellen und Weblinks  | 341        |

## 1.0 Grundlagen

### 1.1 Allgemein

Die weiter steigenden Emissionen der Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) führen zu einer Klimaveränderung, die dauerhafte negative Folgen nach sich zu ziehen droht. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die vorhandenen Energiequellen effektiver zu nutzen und mittels rationeller Energieanwendungen, d. h. technologischer Umwandlungssysteme, innovative Wege zu gehen.

Die Maßnahmen zur rationellen Energieanwendung benötigen zwar keinen Energierohstoff, aber zur Systemlösung ist technisches Wissen und das entsprechende finanzielle Kapital erforderlich. Zur Gebäudesynergie zählen einerseits sämtliche Maßnahmen zum energieoptimierten Bauen und andererseits der Einsatz der wirkungsgraderhöhenden Maßnahmen der Energiewandler. Als Basis ist hier der Normentwurf DIN EN 15315 zugrunde zu legen, der einen allgemeinen Rahmen für die Bewertung des Gesamtenergieverbrauchs eines Gebäudes und die Berechnung der Gesamtenergieeffizienz hinsichtlich der eingesetzten Primärenergie und der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen festlegt. Die Berechnung des Energieverbrauchs für bestimmte Leistungen innerhalb eines Gebäudes (Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwassererwärmung, Beleuchtung) wird in separaten Normen definiert.

#### 1.1.1 Baukörper und technische Systeme der Energieverwendung

Allgemein lassen sich hier folgende Möglichkeiten nennen:

- Verbesserung des Wärmeschutzes
- energiebewusstes Verhalten der Nutzer
- intelligente Haus- und Gebäudetechnik
- richtiges Betreiben der Heizungsanlage.

Der Betrieb von Gebäuden verursacht einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs in Deutschland. Die aktuelle Gesetzgebung, aber auch die ständig steigenden Energiepreise zwingen daher die Gebäudebetreiber, sich über eine energieoptimierte Bauausführung (EOB) sowie die energieeffizienteste technische Gebäudeausrüstung (TGA) Gedanken zu machen.

#### 1.1.2 Kosten und Nutzen von Maßnahmen zur Energieeinsparung

Energie sparen bedeutet Minderung des Energieverbrauchs durch

- Vermeidung von unnötigem Verbrauch z. B. bei der Raumheizung
- durch Raumtemperaturabsenkung
- Verbesserung des Nutzungsgrads des Energieverbrauchs
- Änderung der Verfahrenstechnik bei der Energiebereitstellung
- Aufbau von Energiekreislaufprozessen.

Zur Nutzung biogener Energieträger ist bekannt, dass die direkte Nutzung als Festbrennstoff energetisch deutlich interessanter ist als z. B. die aufwendige Aufbereitung zu einem dieselfahrzeugtauglichen Kraftstoff. Aus diesem Grund ist es äußerst wichtig, die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten eines Energieträgers genau zu untersuchen und auf dieser Basis die jeweils energie- und kostengünstigste Anwendung zu ermitteln. In der Zukunft wird es sich herauskristalisieren, ob der Heizenergieverbrauch für Wohn-, Büro- und Verwaltungsbauten durch wärmetechnische Maßnahmen und den Einsatz rationeller Energieumwandlungssysteme gegenüber dem heutigen Stand um über 50 % reduziert werden konnte.

Die Heizwärme wird (nur) am Ort und zum Zeitpunkt des Bedarfs nach den individuellen Nutzerwünschen bereitgestellt. Hierfür sind Anlagen auch für kleinste Leistungen und mit schneller Regelbarkeit erforderlich. Ein Teil der Heizenergie und nahezu das gesamte Warmwasser kann z. B. über ein im Dach und in der Fassade integriertes Solarsystem erzeugt werden. Der Stromverbrauch der Gebäude wird sich in Zukunft gegenüber heute kaum verändern.

## 1.1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen

### 1.1.3.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Zweck des BImSchG ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen (wie Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge) zu schützen. Das BImSchG enthält Vorgaben und Vorschriften u. a. für die Errichtung und den Betrieb von Feuerungsanlagen. Eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach dem BImSchG ist für alle Anlagen erforderlich, die »in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen« (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) vom 11. August 2009)).

### 1.1.3.2 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)

Bei der TA-Luft handelt es sich um eine Allgemeine Verwaltungsvorschrift auf der Grundlage des BImSchG. Diese beinhaltet die Umsetzung der im Letzteren nicht genauer festgelegten gesetzlichen Anforderungen für genehmigungsbedürftige Anlagen in Form von Grenzwerten. Die TA-Luft von 1974 wurde 1983 erstmals novelliert. Dabei wurden nach dem eingeführten Vorsorgeprinzip Auflagen für genehmigungspflichtige Anlagen so formuliert, dass die Anforderungen umso schärfer wurden, je größer das Risikopotenzial der betroffenen Schadstoffe eingestuft wurde. Die TA-Luft enthält einzuhaltende Emissionswerte, Grenzwerte, Immissionswerte und im Besonderen Schwellenwerte für staub- und gasförmige Stoffe.

### Die neuen Feinstaubregelungen

Holz- und Holzpellets sind umweltfreundliche, nachwachsende Brennstoffe, die bei ihrer Verbrennung nicht mehr CO<sub>2</sub> freisetzen, als beim Wachstum der Pflanze gebunden wurde. Gleichzeitig vermindern sie die Abhängigkeit von importierten Energieträgern wie Gas und

Heizöl. Kritisch wird bei der Verbrennung von Festbrennstoffen allerdings der in technisch veralterten Feuerstätten entstehende Feinstaub.

Die rasant gestiegene Anzahl der mit Feststoff betriebenen Feuerungsanlagen ließ den ausgestoßenen Feinstaub drastisch steigen. Aus diesem Grund will die Bundesregierung mit ihrem Referentenentwurf zur Novellierung des ersten BImSchG den Feinstaubausstoß von mit Festbrennstoff betriebenen Feuerstätten begrenzen. Für die betroffenen Feuerstätten bleibt viel Zeit zur Nachrüstung. Sollte der Referentenentwurf zur verbindlichen Verordnung werden, dann ist mit folgenden Regelungen zu rechnen:

**Tab. 1-1:** Feuerungsanlagen-Nachrüstfristen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Zeitpunkt der Zulassung *                   | Nachrüstung erforderlich |
|---|--------------------------|
| vor 1975 **                                 | bis 2014                 |
| 1975 bis 1984                               | bis 2017                 |
| 1985 bis 1994                               | bis 2020                 |
| ab 1995                                     | bis 2024                 |
| * (vgl. Typenschild)                        |                          |
| ** oder wenn kein Typenschild vorhanden ist |                          |

Die erste Stufe des Referentenentwurfs betrifft sämtliche Einzelfeuerungsanlagen, deren Typenprüfung vor 1975 erfolgte. Deren Betreiber müssen mithilfe der Zulassung (Typenschild) oder durch eine Feinstaubprüfung dem zuständigen Bezirksschornsteinfegermeister bis 2014 nachweisen, dass die Feuerstätte nicht mehr als 100 mg/m<sup>3</sup> Feinstaub ausstößt. Übersteigt der Wert diese Grenze, müssen sie die Anlage stilllegen oder nachrüsten lassen. Seit Anfang 2008 sind nachrüstbare Feinstaubfilter erhältlich. Bis 2014 sollen dann sämtliche alten Feuerstätten den Anforderungen der Stufe 1 genügen. Fast allen heute erhältlichen Heizanlagen droht weder eine Stilllegung noch ein Filterzwang. Sie erfüllen bereits – unabhängig von der Preisklasse – die geforderten Grenzwerte. Feuerstätten, die nach Inkrafttreten der Verordnung zugelassen werden, sollen maximal 60 mg/m<sup>3</sup> Feinstaub ausstoßen. Ab 2015 sollen nur noch 20 mg/m<sup>3</sup> zugelassen sein. Die Feuerstätten- und Schornsteinhersteller arbeiten daran, dieses ehrgeizige Ziel zu erfüllen. Nutzer, die bereits jetzt einen Kamin-, Kachelofen oder eine Holzpelletsheizung installieren möchten, sollten gezielt nach Anlagen mit niedrigem Feinstaub- und CO<sub>2</sub>-Ausstoß fragen. Diese Anforderungen werden bereits durch Geräte und Komponenten in der unteren Preisklasse erfüllt. Als Kennzeichnung für die über die Normkennzeichnung hinausgehenden Qualitätsmerkmale sind die Qualitätssiegel DINplus, Blauer Engel und das EFA-Siegel zu nennen. Da sich Schornsteine mit keramischem Innenrohr für sämtliche Feuerstätten eignen, besteht kein Grund, auf eine Nutzung der umweltfreundlichen Brennstoffe, z. B. mit einer Holzheizung, als preiswerte und umweltfreundliche Alternative zu Erdgas- oder Ölheizungen zu verzichten.



### 1.1.3.3 Zentrale Stromerzeugung

Elektrischer Strom wird heute überwiegend in großen thermischen Kraftwerken oder Kernkraftwerken erzeugt und über ausgedehnte Versorgungsnetze an die Verbraucher geliefert. Bei der Stromerzeugung und beim Transport entstehen jedoch beachtliche Verluste. Aus diesem Grund erreicht die zentrale Stromerzeugung in der Regel nur Wirkungsgrade zwischen 40 und 50 %. Da etliche Großkraftwerke in absehbarer Zeit altersbedingt stillgelegt werden müssen, sollte längerfristig eine Unterstützung der Stromerzeugung in Form von dezentralen rationellen Energieumwandlern erfolgen. Zur Umsetzung der Energieumwandlungsvarianten sind die TA-Luft und das BImSchG zu beachten.

Die dezentrale Stromerzeugung basiert auf der Idee, anstelle der zentralen Stromerzeugung in Großkraftwerken kleine Stromerzeuger (z. B. Kleinst-Wärmekopplung und/oder Brennstoffzellengeräte) in unmittelbarer Nähe der Verbrauchsstellen einzusetzen. Durch die entfallenden oder stark verkürzten Transportwege werden nicht nur die Energieverluste deutlich verringert, sondern zusätzlich lässt sich in der Regel auch die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme vor Ort nutzen (Kraft-Wärme-Kopplung). Aus diesem Grund gilt die dezentrale Stromerzeugung als zukunftsorientierte, umwelt- und ressourcenschonende Alternative bzw. als Ergänzung zu Großkraftwerken.

Zahlreiche neue Gesetze (z. B. KWKG-Gesetz, Erneuerbare-Energien-Gesetz) fördern die Dezentralisierung. Unter bestimmten Voraussetzungen können viele dezentrale Stromerzeuger auch zu einem virtuellen Kraftwerk zusammen geschaltet werden. Zur Optimierung und Koordination der Stromerzeugung ist dann ein Dezentrales Energiemanagement (DEMS) erforderlich.

In der Elektrizitätswirtschaft haben die Systeme zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen zwischenzeitlich eine große Bedeutung erreicht und ihre Amortisation und Rentabilität aufgrund von Langzeitmessungen und Auswertungen bewiesen.

### 1.1.4 Energiearten

Die Erscheinungsformen der Energie erstrecken sich über:

- mechanische Energie (potenzielle und kinetische)
- thermische Energieformen (innere Energie, Enthalpie)
- chemische Bindungsenergie
- physikalische Bindungsenergie
- elektrische Energie
- elektromagnetische Strahlung.

### Primärenergie-Sekundärenergieumwandlung

- Kraft-Wärme-Kopplung
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Bei der rationellen Energieanwendung bzw. Energieumwandlung handelt es sich um Energieumwandlungsmaßnahmen, die eine orts-, zeit- und umweltgerechte Versorgung der Nut-

zungsenergie unter Einsatz eines Minimums an Primärenergie ermöglichen. Als Möglichkeiten der rationellen Energieanwendungen lassen sich nachfolgend aufgeführte Sekundärenergienumwandlungen realisieren:

### **Sekundärenergie-Sekundärenergiewandlung**

- Blaubrennersystem
- Lambda-Steuerung
- Brennwertechnologie
- Solarthermiejunctionen
- Wärmepumpeneinsatz
- Kraft-Wärme-Kopplung
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

#### **1.1.4.1 Energiewertigkeit der Wärme**

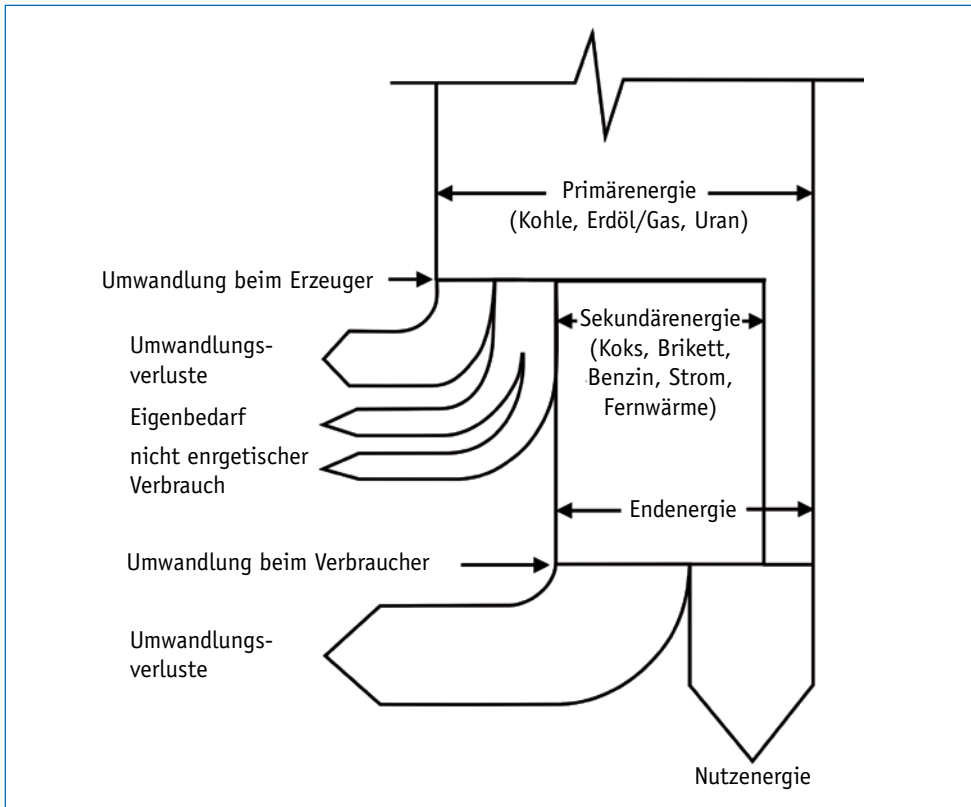
Die Energiewertigkeit dient als Maß für die Arbeitsfähigkeit der Wärme. Da die Wertigkeit einer speziellen Energie durch die aus ihr maximal erreichbare Arbeit, d. h. ihre Exergie, definiert ist, kann auch die Wertigkeit nicht absolut angegeben werden. Es können nur Wertigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturen, jeweils bezogen auf die Umgebungstemperatur, z. B.  $T_0 = 288 \text{ K} = 15^\circ \text{C}$ , miteinander verglichen werden.

#### **1.1.4.2 Energiebegriffe und Umwandlungen**

**Primärenergie**, d. h. Zustandsänderung ohne einschränkende Bedingung.

Die Primärenergie enthält den Energieinhalt von Energieträgern, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden, z. B. chemische Brennstoffenergie. In den meisten Fällen muss diese Primärenergie in den Kraftwerken, Raffinerien etc. in Sekundärenergie umgewandelt werden (Koks, Briketts, Strom, Fernwärme, Heizöl oder Benzin). Zu den Energieträgern mit rechnerisch nutzbarem Energiegehalt, die in der Natur vorkommen und noch keiner Umwandlung unterworfen sind, zählen die fossilen Energieträger Stein- und Braunkohle, Erdöl und Erdgas, Kernbrennstoffe (nukleare Brennstoffenergie) sowie regenerative Energien (Geothermie, Gezeitenenergie, Sonnenenergie, Wasser- und Windkraft).

Die fossilen Brennstoffe wie Braun- und Steinkohle, Erdöl und Erdgas sind weltweit die am meisten genutzte Energiequelle, können aber nicht nachwachsen und stehen daher nur für einen begrenzten Zeitraum als Vorräte zur Verfügung. Durch die massiven Eingriffe beim Abbau der Rohstoffe und aufgrund der Rückstände aus der Verbrennung bereiten die fossilen Brennstoffe aber auch eines der größten globalen Umweltprobleme. Die Primärenergie wird bis zum Verbraucher über die Endenergie in Nutzenergie umgewandelt. In Deutschland ist Mineralöl mit 39 % der wichtigste Energieträger, gefolgt von Erdgas mit 21 % und Steinkohle mit 13 %. Die regenerativen Energieträger decken derzeit ca. 2 % des Primärenergieverbrauchs ab.



**Abb. 1-1:** Energiebegriffe (Quelle: IB-THEISS, München)

### Sekundärenergie

In den meisten Fällen wird die Primärenergie in Sekundärenergie umgewandelt. Hierbei stellt die Sekundärenergie gleichzeitig auch die Endenergie dar, nicht aber bei den natürlichen Umwandlungsmodi der Strahlungsenergie der Sonne.

### Endenergie

Die Endenergie ist die vom Betreiber für einen bestimmten Anwendungszweck einzusetzende, auf dem Energiemarkt zur Deckung des Nutzenergiebedarfs »eingekaufte« oder als Sonnenstrahlung kostenlos zur Verfügung stehende Energieart. Die Endenergie wird auch als »Sekundärenergie« definiert. Für die Verwendung als Wärmeenergie ist dies z. B. das in Raffinerien aus Rohöl (Primärenergie) aufbereitete leichte Heizöl, die aus Kohle oder Uran erzeugte elektrische Energie, etc. Der Begriff »Endenergie« wird auch in dem Zusammenhang verwendet, um hiermit die zur Deckung eines Energiebedarfs »eingekaufte« Energie zu definieren.

### Nutzenergie

Die Naturvorkommen wie Stein- und Braunkohle, Erdöl oder Erdgas und regenerative Energiequellen werden in Kraftwerken zu Nutzenergie umgewandelt und dienen zur Deckung des

Energiebedarfs verschiedener Energiedienstleistungen. Die Nutzenergie ist kleiner als die Endenergie und entsteht aus der Umwandlung der Primärenergie und wird als Heiz- und Prozesswärme sowie als elektrischer Strom genutzt.

**Tab. 1-2:** Vorsätze und Vorzeichen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Vorsatz | Abkürzung | Wert      | Vorsatz | Abkürzung | Wert       |
|---------|-----------|-----------|---------|-----------|------------|
| Kilo    | k         | $10^3$    | Milli   | m         | $10^{-3}$  |
| Mega    | M         | $10^6$    | Mikro   | $\mu$     | $10^{-6}$  |
| Giga    | G         | $10^9$    | Nano    | n         | $10^{-9}$  |
| Tera    | T         | $10^{12}$ | Piko    | p         | $10^{-12}$ |
| Peta    | P         | $10^{15}$ | Femto   | f         | $10^{-15}$ |
| Exa     | E         | $10^{18}$ | Atto    | a         | $10^{-18}$ |

**Tab. 1-3:** Umrechnung der Energieeinheiten (Quelle: IB-THEISS, München)

| Einheit                | Bezeichnung                   | Umrechnung in kj                    |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| kj                     | Kilojoule                     |                                     |
| kWh                    | Kilowattstunden               | 1 kWh = 3.600 kJ                    |
| kg SKE                 | Kilogramm Steinkohleeinheiten | 1 kg SKE = 29.308 kJ                |
| kg RÖE                 | Kilogramm Rohöleinheiten      | 1 kg RÖE = 41.868 kJ                |
| m <sup>3</sup> -Erdgas | Kubikmeter Erdgas             | 1 m <sup>3</sup> Erdgas = 31.736 kJ |

**Tab. 1-4:** Umrechnungsfaktoren unterschiedlicher Energieeinheiten (Quelle: IB-THEISS, München)

|                                   | kj     | kWh                   | kg SKE                | kg RÖE                | m <sup>3</sup> -Erdgas |
|-----------------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 Kilojoule<br>(1kJ = 1000 Ws)    | 1      | $0,278 \cdot 10^{-3}$ | $0,034 \cdot 10^{-3}$ | $0,024 \cdot 10^{-3}$ | $0,032 \cdot 10^{-3}$  |
| 1 Kilowattstunde<br>(kWh)         | 3.600  | 1                     | 0,123                 | 0,086                 | 0,113                  |
| 1 kg Steinkohle-<br>einheit (SKE) | 29.308 | 8,14                  | 1                     | 0,70                  | 0,923                  |
| 1 kg Rohöleinheit<br>(RÖE)        | 41.868 | 11,63                 | 1,428                 | 1                     | 1,319                  |
| 1 m <sup>3</sup> -Erdgas          | 31.736 | 8,816                 | 1,083                 | 0,758                 | 1                      |

## Anlagenaufwandszahl

Die Anlagenaufwandszahl ist die wesentliche Kenngröße, die bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes nach DIN V 4701-10 gebildet wird. Die Anlagenaufwandszahl ( $e_p$ ) ist definiert als der Quotient des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes bezogen auf die Summe aus Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf. Sie entspricht damit dem Kehrwert des Anlagenwirkungsgrads.

## Die Primärenergiefaktoren ( $f_p$ )

Der Primärenergiefaktor ist für die unterschiedlichen Primärenergien wie folgt anzusetzen:

### Brennstoffe:

|             |     |            |     |
|-------------|-----|------------|-----|
| Heizöl (EL) | 1,1 | Steinkohle | 1,1 |
| Erdgas (H)  | 1,1 | Braunkohle | 1,1 |
| Flüssiggas  | 1,1 | Holz       | 1,1 |

### Nah-/Fernwärme aus KWK:

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| fossiler Brennstoff     | 0,7 |
| erneuerbarer Brennstoff | 0,0 |

### Nah-/Fernwärme aus Heizwerken:

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| fossiler Brennstoff     | 1,3 |
| erneuerbarer Brennstoff | 0,1 |

### Strom:

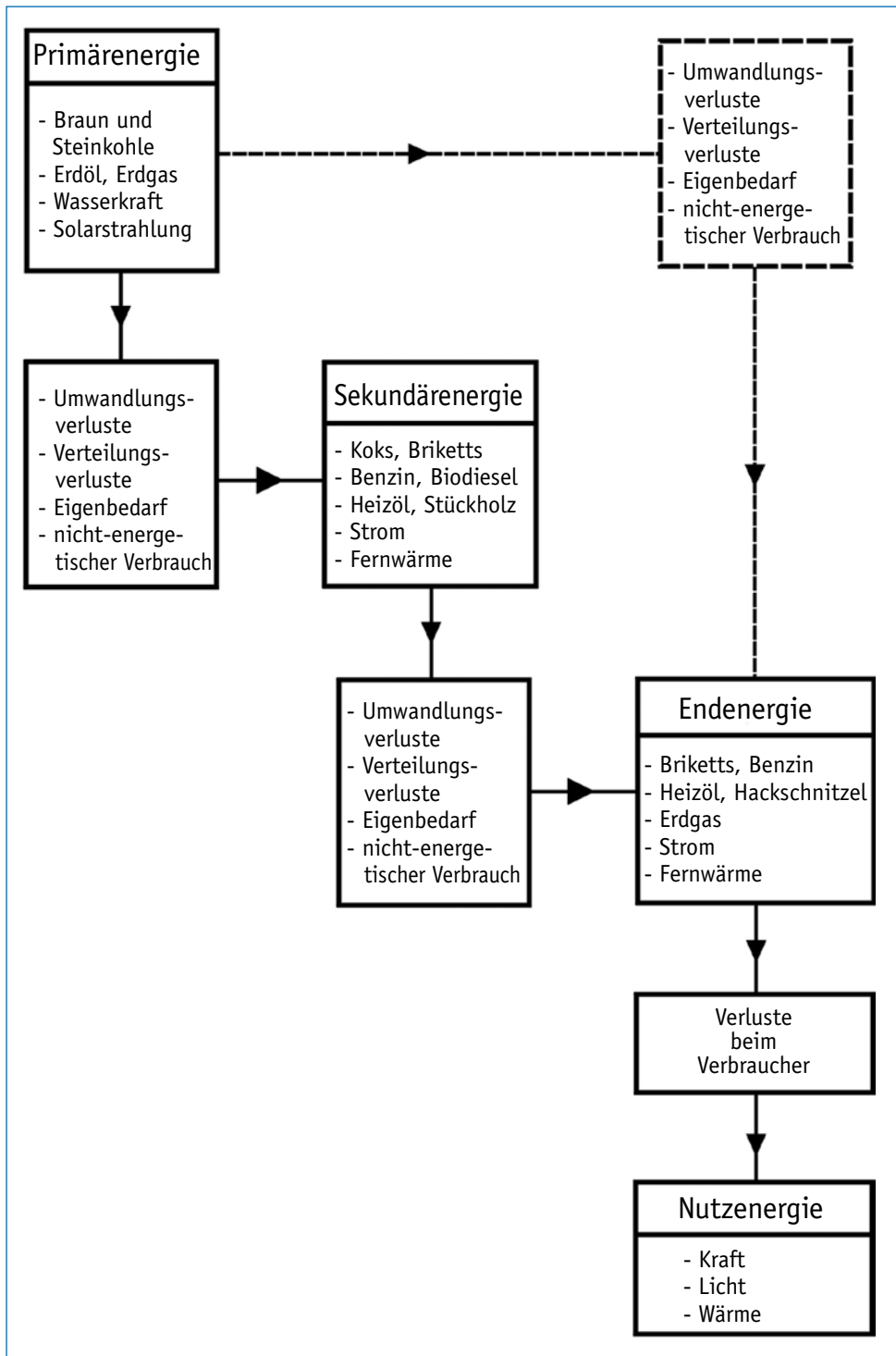
|   |      |
|---|------|
| Strom-Mix   | 3,0  |
| Speicherheizung in Kombination<br>mit einer Wohnraumlüftung mit<br>Wärmerückgewinnung | 2,0. |

**Tab. 1-5:** Brennstoffe und Primärenergiefaktoren (Quelle: IB-THEISS, München)

| Brennstoff  | Primärenergiefaktor | Energiegehalt           |
|-------------|---------------------|-------------------------|
| Heizöl EL   | 1,1                 | 10,0 kWh/l              |
| Erdgas H    | 1,1                 | 10,4 kWh/m <sup>3</sup> |
| Flüssiggas  | 1,1                 | 12,8 kWh/kg             |
| Steinkohle  | 1,1                 | 9,0 kWh/kg              |
| Braunkohle  | 1,2                 | 7,0 kWh/kg              |
| Brennholz   | 0,2                 | 4,2 kWh/kg              |
| Holzpellets | 0,2                 | 4,9 kWh/kg              |
| Strommix    | 0,2                 | 1,0 kWh/kWh             |

Die Energieträger weisen verschiedene Primärenergiefaktoren auf, die den Energieaufwand vorgelagerter Prozessketten außerhalb der Systemgrenze »Gebäude« berücksichtigen.

Dazu gehören Verluste bei der Gewinnung, der Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe von der Quelle bis zum Verbraucher. Das Maß für die Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie zur Bereitstellung der für einen gegebenen Anwendungszweck erforderlichen Nutzenergie wird mit dem Primärenergienutzungsgrad umschrieben. Je nach Führung des Umwandlungsprozesses kann der Primärenergienutzungsgrad sehr unterschiedlich sein.



**Abb. 1-2:** Energieumwandlungskette (Quelle: IB-THEISS, München)

Für die Energiedienstleistung Raumwärme wird die im Kraftwerk zur Elektrizitätserzeugung eingesetzte und dann nur in Wärme umgewandelte Primärenergie des Erdöls also nur halb so gut genutzt wie die direkte Verbrennung als leichtes Heizöl im Ölwärmeerzeuger.

Ein noch höherer Primärenergienutzungsgrad wird bei der Nutzung der Strahlungsenergie mit einer Wärmepumpe erreicht.

### 1.1.4.3 Energiebilanz für technische Systeme

Die Energiebilanz für technische Systeme erfolgt durch eine Gegenüberstellung der in ein System eintretenden bzw. austretenden Energieströme.

In den Bereich der rationellen Energieanwendungen fallen sämtliche Wirkungsgrad erhöhende Maßnahmen an Energiewandlern, gleich welcher Energieumwandlungsstufe: vom Energierohstoff zur Primärenergie, von ihr zur Sekundärenergie, zur Endenergie, zur Nutzenergie, zu den Energiedienstleistungen. Bei sämtlichen energetischen Kopplungsprozessen, z. B. Kraft-Wärme-Kopplung oder Blockheizkraftwerke, handelt es sich um rationelle Energieanwendungen. Die großen Potenziale der rationellen Energieanwendungen liegen jedoch in den Verfahrensänderungen in den Bereichen der Haushalte, der Industrie sowie im Transport- und im Verkehrsbereich, wobei die Unterteilung in drei Sektoren unterteilt werden kann:

#### Primärenergie-/Sekundärenergieumwandlung

Steinkohlenkraftwerke moderner Bauart haben Wirkungsgrade von 38 bis 40 %, sie benötigen  $\leq 320 \text{ g Kohle/kWh}_{\text{el}}$ . Wird die Kohle in einem vorangehenden Schritt vergast und von mitgeführten Partikeln gereinigt, dann kann dieses Kohlegas, analog dem Erdgas, als Energielieferant für einen Kombi-Gas- und Dampfturbinen (G + D)-Prozess mit einem Wirkungsgrad von 44 % und mehr genutzt werden. In den Fällen, wenn anstelle der Kondensationskraftwerke, die Strom liefern, Kraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung mit Gegendruckturbinen und Wärmeauskopplung zur industriellen Prozesswärme- oder Fernwärmenutzung betrieben werden, steigt der Wirkungsgrad der Primärenergie-/Sekundärenergieumwandlung weiter an.

Das Erdgas deckt in Deutschland rund 22 % des Primärenergieverbrauchs und ist die wichtigste Heizenergie. Inzwischen werden fast 50 % der Wohnungen mit dieser Energie beheizt, in Neubauten sogar mehr als 75 %. Diese Position verdankt Erdgas neben seiner Wirtschaftlichkeit und den zahlreichen Anwendungsvorteilen auch seinen Umwelteigenschaften: Es ist der emissionsärmste fossile Brennstoff; bei seiner Verbrennung entstehen so gut wie kein Schwefeldioxid, Ruß oder Staub. Der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß ist ebenfalls vergleichsweise gering ( $\text{CO}_2$  gilt als wichtigstes klimabelastendes »Treibhausgas«). Ein weiterer Vorteil betrifft speziell die Brennstoffzelle. Aus Erdgas lässt sich mit vergleichsweise geringem Aufwand Wasserstoff gewinnen. Es hat von allen fossilen Brennstoffen das beste Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis, da es überwiegend aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) besteht. Außerdem ist eine gut ausgebaute Versorgungsinfrastruktur vorhanden. Deshalb ist Erdgas kurz- und mittelfristig der wichtigste Wasserstofflieferant für stationäre Brennstoffzellen, langfristig gilt es als Brücke zur Wasserstoffwirtschaft.

## Sekundärenergie-/Nutzenergieumwandlung

Mit dem Begriff Nutzenergie wird die Energie definiert, die beim Verbraucher nach der letzten Umwandlung für den jeweiligen Zweck zur Verfügung steht. Es handelt sich um die technische Form der Energie, die der Verbraucher für den jeweiligen Zweck letztlich benötigt, also z. B. Wärme, mechanische Energie, Schall, Nutzelektrizität für Galvanik oder Elektrolyse und elektromagnetische Strahlung (z. B. Licht). Blaubrennende Ölbrenner für den Einsatz in Gebäudeheizungssysteme nutzen die Rezirkulation sauerstoffhaltiger heißer Feuerungsgase zur Vorverdampfung des Brennstoffs und haben daher im Vergleich zu den »Gelbbrennern« einen besseren Wirkungsgrad. Da »Blaubrenner« rußfrei verbrennen und somit die nachgeschalteten Register nicht verschmutzen, können sie auch als Energielieferant für Sorptionswärmepumpen dienen. Beides sind Schritte der rationellen Energieanwendung, wobei der letztere Schritt der rationellen Energieanwendung in Kombination mit der Nutzung der Sonnenenergie (Umgebungswärme) erfolgt.

## Wandlung der Nutzenergie in Energiedienstleistungen

Eine höchsteffiziente Sonnenenergienutzung mit thermischen Kollektoren ist wenig sinnvoll, wenn das Gebäude, dem diese Energienutzung dient, nicht ausreichend gut wärmegeklämt ist. Ein großer Teil der solaren Nutzenergie dient dann nicht der Erwärmung des Gebäudes, sondern der Dissipation durch Wände und Dach in die Umgebung. Die Endenergie wird auch als »Sekundärenergie« definiert und ist die vom Betreiber für einen bestimmten Anwendungszweck einzusetzende, auf dem Energiemarkt zur Deckung des Nutzenergiebedarfs eingekaufte oder als Sonnenstrahlung kostenlos zur Verfügung stehende Energieart. Dem Anwender wird daher nach der Umwandlung aus Primärenergien die »Endenergie«, z. B. in Form von Wärme oder Licht, zur Verfügung gestellt. Für die Verwendung als Wärmeenergie ist dies z. B. das in Raffinerien aus Rohöl (Primärenergie) aufbereitete leichte Heizöl, die aus Kohle oder Uran erzeugte elektrische Energie, etc. Je nach Verfahren kann aus der im Rohstoff enthaltenen Primärenergie unterschiedlich viel Endenergie »erzeugt« werden. Da diese Umwandlung wirkungsgradbehaftet ist, lassen sich geringe Umwandlungsverluste nicht vermeiden.

### 1.1.5 Energieeffizienz: Energieprofil von Gebäuden

Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union haben Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer und bestehender Gebäude festzulegen. Zudem ist für die Erstellung von Energieausweisen für Gebäude Sorge zu tragen und regelmäßige Inspektionen von Wärmeerzeugern, RLT- und Klimaanlage in Gebäuden sicherzustellen. Als Basis dient die Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über das Energieprofil von Gebäuden. Die Richtlinie gründet sich auf vier Hauptelemente:

- eine gemeinsame Methode zur Berechnung der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
- Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer Gebäude wie auch bestehender Gebäude, die einer größeren Renovierung unterzogen werden sollen



- Zertifizierungssysteme (Erstellung von Energieausweisen) für neue und bestehende Gebäude und – wenn es sich um öffentliche Gebäude handelt – die Anbringung der Energieausweise und anderer relevanter Informationen; die Ausweise sollten nicht älter als fünf Jahre sein
- regelmäßige Inspektion von Wärmeerzeugern und zentralen RLT- sowie Klimaanlage in Gebäuden sowie Überprüfung von Heizungsanlagen, deren Wärmeerzeuger mehr als 15 Jahre alt sind.

Die gemeinsame Berechnungsmethode sollte alle für die Energieeffizienz wichtigen Elemente und nicht nur die Qualität der Gebäudeisolierung einbeziehen. Dieses integrierte Konzept sollte unter anderem Heiz- und Kühlanlagen, Beleuchtungsanlagen sowie die Lage und Ausrichtung des Gebäudes, die Rückgewinnung von Wärme usw. berücksichtigen.

Die Mindestanforderungen an Gebäude werden auf der Grundlage der oben beschriebenen Methode berechnet. Die Mitgliedstaaten sind verpflichtet, Mindestnormen festzulegen.

### **Geltungsbereich**

Die Richtlinie betrifft den Wohnsektor und den Dienstleistungssektor (Büros, öffentliche Gebäude usw.). Bestimmte Gebäude, z. B. historische Bauten, Industrieanlagen usw., sind von den Zertifizierungsvorschriften ausgenommen. Die Richtlinie deckt sämtliche Aspekte der Energieeffizienz von Gebäuden ab.

### **Energieausweise, Mindestanforderungen und Inspektionen**

Die Ausweise sind bei Bau, Verkauf oder Vermietung eines Gebäudes vorzulegen. Zum einen zielt die Richtlinie speziell auf die Vermietung ab, damit gewährleistet ist, dass die Eigentümer, die in der Regel nicht für die Energiekosten aufkommen, die notwendigen Maßnahmen durchführen. Zum anderen ist auch vorgesehen, dass die Nutzer (von Gebäuden) den Eigenverbrauch an Heizenergie und Warmwasser selbst regeln können, soweit die entsprechenden Maßnahmen kosteneffizient sind.

Den Mitgliedstaaten obliegt die Festlegung von Mindestnormen. Auch müssen sie sicherstellen, dass die Erstellung der Energieausweise und die Inspektion der Gebäude durch qualifiziertes und unabhängiges Personal erfolgen.

In der Europäischen Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamteffizienz von Gebäuden (EPBD-Energy Performance of Buildings Directive) wird in Artikel 9 die periodische Inspektion von Lüftungs-Klimaanlagen gefordert:

*»Zur Senkung des Energieverbrauchs und zur Begrenzung der Kohlendioxidemissionen treffen die Mitgliedstaaten die erforderlichen Maßnahmen, um die regelmäßige Inspektion von Klimaanlagen mit einer Nennleistung von mehr als 12 kW zu gewährleisten. Die Inspektion umfasst eine Prüfung des Wirkungsgrads der Anlage und der Anlagendimensionierung im Verhältnis zum Kühlbedarf des Gebäudes. Die Nutzer erhalten Hinweise für mögliche Verbesserungen oder für den Austausch der RLT- und Klimaanlage sowie für Alternativlösungen.«*

In den umfangreichen neu beschlossenen Gesetzen zur Energieeffizienz und erneuerbaren Energien ist die Thematik des Energieausweises fast untergegangen. Die EnEV und der Energieausweis zwingen aktuell zur energieeffizienten Planung und schreiben gleichzeitig die Mindeststandards vor. Der bedarfsorientierte Energieausweis erweist sich als ein gutes

Hilfsmittel, um den Energieverbrauch der Gebäude zu senken. Gleichzeitig bringt der Energieausweis dem Vermieter und Verkäufer die Möglichkeit in Energieeffizienz zu investieren und die im Energieausweis vorgeschlagenen Sanierungsmaßnahmen umzusetzen.

Der Energieausweis, der eine Auskunft über den Gesamtenergieverbrauch von Gebäuden vermittelt, ist nun auch für Nichtwohngebäude vorgeschrieben. Für Nichtwohngebäude im Bestand wird der Energieausweis zum 1. Juli 2009 zwingend gefordert. Erfasst werden hier in der Gesamtenergiebilanz von Wohngebäuden die Heizkosten sowie die Kosten zur Warmwasseraufbereitung: Für Nichtwohngebäude werden bei der Verbrauchsermittlung auch die Werte aus der Raumluftechnik, Kühlung und Beleuchtung hinzugezogen.

Zur Erstellung des Gebäudeenergieausweises ist zudem die DIN EN 15217 (2007-09) zu beachten, die nachfolgend aufgeführte Kriterien festlegt:

- Gesamtkennwerte zur Darstellung der Energieeffizienz von Gebäuden, einschließlich der Heiz-, Raumluf-, Luftkonditionierungs-, Kühlungs-, Trinkwasser- und Beleuchtungssystemen.
- Möglichkeiten zur Darstellung der energiebezogenen Anforderungen an die Planung neuer oder die Renovierung bestehender Gebäude.
- Verfahren zur Festlegung von Bezugswerten.
- Möglichkeiten zur Entwicklung eines Verfahrens zur Erstellung des Gebäudeenergieausweises.

Wenn das Ziel erreicht wird, den Neubaustandard nach der EnEV um 30 % zu unterschreiten, dann erhält der Nutzer von der Kreditanstalt für Wiederaufbau derzeit nicht nur einen günstigen Kredit, sondern auch noch 12,5 % der Investition erstattet. Besonders günstig stellt sich hier auch die Investition einer Klein-KWK-Anlage dar.

### 1.1.5.1 Energieeinsparverordnung (EnEV)

#### Chronik/(bisherige Systematik)

- 1977, 1. Wärmeschutzverordnung:  $k_{\max}$  in Abhängigkeit zum A/V-Verhältnis
- 1984, 2. Wärmeschutzverordnung: Erhöhung der Anforderung  $k_{\max}$  in Abhängigkeit zum A/V-Verhältnis, zzgl. Fensterdichtigkeit
- 1995, 3. Wärmeschutzverordnung: Einführung des zulässigen Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit zum A/V-Verhältnis
- 2002, 1. EnEV: zulässiger Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) in Abhängigkeit zum A/V-Verhältnis, Integration der Anlagentechnik; Unterscheidung Wohn- und Nichtwohngebäude
- 2004, 2. EnEV: Anpassung an die aktualisierten DIN-Normen
- 2007, 3. EnEV: Einführung eines Nachweisverfahrens für Nichtwohngebäude unter Berücksichtigung der Raumluftechnik, Kühlung und Beleuchtung auf der Basis der DIN V 18599. Einführung des Verbrauchsausweises (messtechnisch) und des Bedarfsausweises (rechnerisch) mit Darstellung des Primär- und des Endenergiebedarfs des Gebäudes.

Mit der Novellierung der EnEV 2007 im Januar 2009 und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) soll eine weitere Reduzierung der Schadstoffemissionen, insbesondere der CO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht werden.

### 1.1.5.2 Neuerungen in der EnEV 2007

Die seit 01.10.2007 geltende neue EnEV 2007 verpflichtet u. a. schrittweise zur Erstellung und Vorlage von Energieausweisen. Ab 01.07.2009 müssen die Energieausweise in öffentlichen Dienstleistungsgebäuden, wie beispielsweise Hallenbäder, mit einer Nutzfläche über 10.000 m<sup>2</sup> und einem regelmäßigen Publikumsverkehr gut sichtbar ausgehängt werden. Da die Hallenbäder gegenüber anderen Gebäudekategorien einen vergleichsweise hohen Energieverbrauch aufweisen, stellt sich hier die Frage nach der Energieeffizienz umso deutlicher.

Das integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (IEKP) wird in 2009 weiter umgesetzt. Nach der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und der Einführung des Wärmegesetzes (EEWärmeG) folgen ab Januar 2009 auch neue Regelungen für die EnEV und die Heizkostenverordnung (HeizkostenV).

### 1.1.5.3 Neuerungen in der EnEV 2009

Am 18. März 2009 hat die Bundesregierung die Novellierung der EnEV 2009 beschlossen. Die energetischen Standards für Gebäude wurden sowohl beim baulichen Wärmeschutz als auch bei der technischen Gebäudeausrüstung verschärft. Die Neuregelungen gelten für den Neu- ebenso wie für den Altbau:

- Die primärenergetischen Anforderungen an Neu- und Altbauten sollen durchschnittlich um rund 30 % angehoben werden. Bis 2012 sollen möglicherweise weitere 30 % folgen.
- Dämmung ungedämmter, begehbare, oberster Geschossdecken bis Ende 2011, wenn das darüber liegende Dach ungedämmt ist.
- Ab 2020: Langfristige, schrittweise Außerbetriebnahme von Nachtstromspeicherheizungen in bestimmten Gebäuden.

Unternehmen müssen Nachweise über die Einhaltung der Vorschriften bei Modernisierungen erbringen. Die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen bei heizungstechnischen Anlagen wird durch Sichtkontrollen der Bezirksschornsteinfegermeister überwacht.

Mit dem sogenannten Referenzgebäudeverfahren wird ein neues Berechnungsverfahren eingeführt.

Weitere Neuerungen im Überblick:

- Die Bilanzierungsmethode der DIN V 18599, bisher nur für Nichtwohngebäude geltend, soll auf Wohngebäude in einer einfacheren Version ausgeweitet werden.
- Das bisherige vereinfachte Nachweisverfahren zur Ermittlung des Jahresprimärenergiebedarfs soll aufgegeben werden. Für die Gebäudehülle werden neue Referenzwerte formuliert.
- Das Nachrüsten von Heiztechnik im Altbau wird neu geregelt.

### Heizkostenverordnung

Die neue HeizkostenV, in der das verbrauchsabhängige Abrechnen der Heiz- und Warmwasserkosten festgelegt ist, erhöht den verbrauchsabhängigen Anteil bei der Heizkosten-

abrechnung von 50 auf 70%. Insofern werden z. B. die Warmwasser- und Heizungskosten in gedämmten Häusern mit moderner und effizienter Heiztechnik mit 70 % verbrauchsabhängig abgerechnet. Hierdurch sollen die Nutzer von Wohnungen und Gewerbebauten zu einem sparsamen Heizverhalten motiviert werden. Die neue Verordnung gilt für Gebäude, die ein bestimmtes Dämmniveau nicht überschreiten. Mehrfamilienhäuser im Passivhausstandard sind von der Verbrauchserfassungspflicht befreit. Mieter dürfen nach dem gelten der Novelle ihre Miete kürzen, wenn der Vermieter seiner Nachrüstungsverpflichtung beim Wärmeerzeuger nicht nachgekommen ist.

#### 1.1.5.4 Anwendung der EnEV auf den Gebäudebestand

Die Bewertung von Bestandsgebäuden stellte seit der Einführung der EnEV im Februar 2002 ein ungelöstes Problem dar. Mit der Veröffentlichung einer neuen Norm und einer sie ergänzenden technischen Spezifikation ergeben sich neue Möglichkeiten für die primärenergetische Bewertung von Bestandsanlagen. Die Zielsetzung der EnEV ist es, den Energieverbrauch für die Beheizung und Warmwasserbereitung von Gebäuden nachhaltig zu begrenzen und zu reduzieren.

Mit der Umsetzung der BEG-Richtlinie 2002/91/EG wird unter anderem der Energiepass für Neu- und Altbauten sowie die Einbeziehung des Energiebedarfs für die Beleuchtung und die Klimatisierung von Nichtwohngebäuden in die energetische Bewertung von Gebäuden zur Pflicht, sodass spätestens dann Klarheit für Bestandsgebäude vorliegen wird.

Bei der Modernisierung und Instandsetzung von Bestandsgebäuden bestehen derzeit zwei Möglichkeiten die Vorgaben der EnEV einzuhalten:

Entweder das Bauteilverfahren oder der Nachweis über den Jahresprimärenergiebedarf. Die Anwendung des Bauteilverfahrens bereitet keine großen Probleme. Werden Außenbauteile erneuert, so sind für diese die in Anhang 3 Tabelle 1 der EnEV festgelegten Wärmedurchgangskoeffizienten einzuhalten. Als Alternative hierzu kann der Nachweis über die Beschränkung des Jahres-Primärenergiebedarfs geführt werden. Die Gebäude dürfen bei Anwendung dieser Regel die zulässigen Grenzwerte für den Jahresprimärenergiebedarf von Neubauten um 40 % überschreiten. Der Gebäudebestand bietet hier das größte Potenzial zur Energieeinsparung. Aus diesem Grund sollten die Gebäudesanierungen generell unter diesem Gesichtspunkt durchgeführt werden, wenn nicht sowieso Verordnungen wie die EnEV entsprechende Anforderungen an einzelne Maßstäbe beim Austausch oder Neueinbau einzelner Bau- und Anlagenteile stellen.

Bei einer Sanierung ist es erforderlich, eine ganzheitliche Betrachtung vorzunehmen, da die einzelnen Maßnahmen gegebenenfalls auch ungünstige Auswirkungen auf andere Komponenten und Anlagenteile haben können. Der Austausch der alten Wärmeerzeuger gegen moderne Wärmeerzeuger sollte daher nicht bis zu den vorgeschriebenen Terminen hinausgezögert werden. Bei der Sanierung der Heizungsanlage darf es nicht nur beim Austausch des Wärmeerzeugers bleiben. Sämtliche Komponenten, wie Regelung, Pumpen, Verteilung, Heizkörper und Ventile, müssen wie eine neue Anlage betrachtet, und entsprechend ausgetauscht oder erneuert werden.

Die DIN V 4701-12 und PAS 1027 in der Fassung vom Februar 2004 gilt nach den Regeln der Technik als Basis mit denen der Jahresprimärenergiebedarf für bestehende Anlagen er-

mittelt werden kann. Die DIN V 4701-12 befasst sich ausschließlich mit der Bewertung der Wärmeerzeuger und der Trinkwassererwärmung. Die öffentlich verfügbare Spezifikation (PAS = Publicly Available Specification) PAS 1027 gilt als Ergänzung der DIN V 4701-12, mit der es möglich ist auch die Wärmeübergabe und die Wärmeverteilung zu berücksichtigen, und somit eine umfassende Bewertung der gesamten heiztechnischen Anlagen im Bestand durchzuführen.

Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an das detaillierte Verfahren nach DIN V 4701-10, jedoch mit entsprechend angepassten Randbedingungen. Genau in der Umsetzung dieser Randbedingungen sind die größten Problematiken enthalten. Weder die alte EnEV noch deren »Reparaturnovelle« definieren entsprechende Randbedingungen für die Anwendung der DIN V 4701-12 und der PAS 1027 oder nehmen Bezug auf diese. Da die Umsetzung der EnEV Ländersache ist, liegt es auch im Ermessen der Länder oder der entsprechenden Bauaufsichtsbehörde, ob und unter welchen Randbedingungen der Nachweis des Jahresprimärenergiebedarfs von Bestandsgebäuden nach DIN V 4701-12 und PAS 1027 als Nachweis anerkannt wird. Eine wesentliche Randbedingung resultiert aus der Frage nach der anzusetzenden Länge der Heizperiode. Für Neubauten ist die Heizperiodendauer nach EnEV grundsätzlich auf 185 Tage festgelegt. Diese ergibt sich aus der für EnEV-Neubauten angenommenen Heizgrenze von 10 °C. Bei nichtsanieren Bestandsgebäuden mit ihrem in der Regel schlechten Dämmstandard, liegt die Heizgrenze jedoch eher bei 15 °C. Daraus würde sich für das EnEV-Normklima in Deutschland eine Heizperiodenlänge von 275 Tagen ergeben, wie sie in den Beispielrechnungen der DIN V 4701-12 und PAS 1027 auch angesetzt wird. Jede wärmeschutztechnische Sanierung der Gebäudehülle führt natürlich zu einer Reduzierung der Heizperiodendauer. Diese müsste daher in Abhängigkeit vom jeweiligen Wärmedämmstandard des Gebäudes festgelegt werden.

Trotz der zur Verfügung stehenden Normen für die Bewertung von Bestandsanlagen ist es, wenn überhaupt, nur im Einzelfall möglich, diese für den öffentlich-rechtlichen Nachweis nach EnEV anzuwenden. Dem Nachweisführenden bleibt also vorerst weiterhin nur der Weg des Nachweises nach dem Bauteilverfahren durch Einhaltung der bei Bauteiländerungen vorgegebenen maximalen U-Werte.

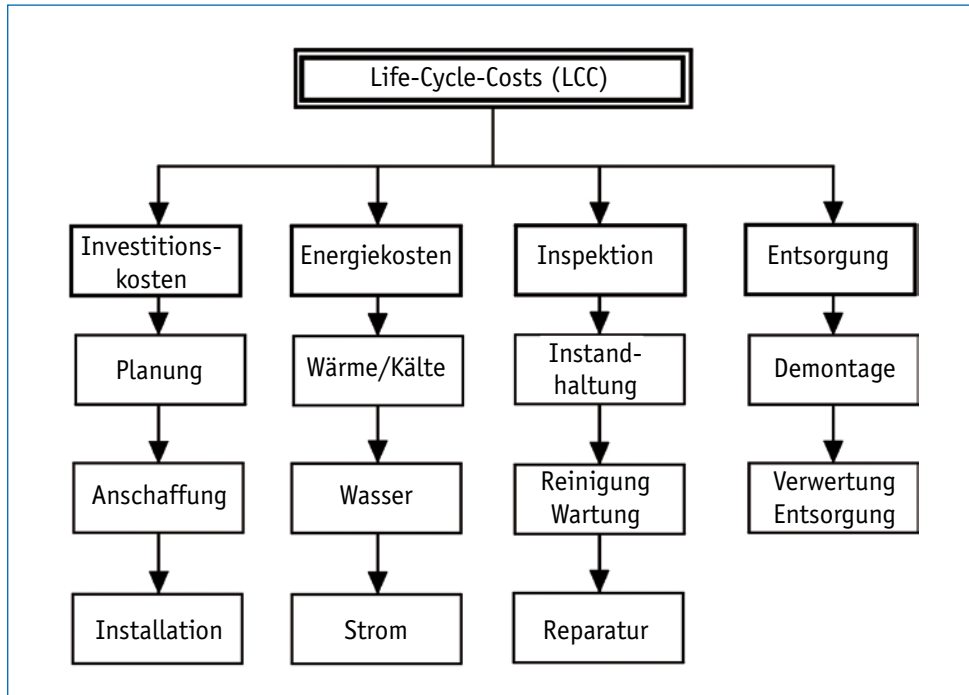
### 1.1.6 Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs)

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten und die daraus resultierenden Optimierungspotenziale gehören langfristig zum Standard der baulichen Investitionsentscheidungen.

Obwohl in diesen Bereichen ein erfreulicher Anstieg zu verzeichnen ist, wird dieses Potenzial seitens der Architektur- bzw. Investorenwettbewerbe noch lange nicht hinreichend ausgereift. Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten befindet sich daher der Markt in Deutschland erst am Anfang seiner Möglichkeiten.

Um in Bauprojekten nicht nur die Erststellungs-, sondern auch die Folgekosten und die Umwelteinwirkungen über die gesamte Lebensdauer angemessen berücksichtigen zu können, werden Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs) ermittelt. Ihre Berechnung erfolgt aus einer Kombination von Investitions- und Kostenrechnung, in der auch die normalerweise in einer Kostenrechnung nicht erfassten Einflussgrößen enthalten sind. Langfristig gehören die Ermittlung dieser Kosten und die daraus resultierenden Optimierungspotenziale zum

Standard der baulichen Investitionsentscheidungen. Da bereits in der frühen Planungsphase die Grundlage für die spätere Höhe der Lebenszykluskosten gelegt wird, ist ein früher Projekteinstieg unbedingt erforderlich. Nur so lassen sich sämtliche Optimierungspotenziale voll ausschöpfen. In der Praxis hat sich die Gliederung der Lebenszykluskosten in folgende vier Bereichen bewährt: Projektentwicklungskosten, Errichtungskosten, Nutzungskosten und Verwertungskosten.



**Abb. 1-3:** Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs) (Quelle: IB-THEISS, München)

Durch die frühe Integration der Lebenszykluskosten können hervorragend optimierte Gebäudeentwürfe erstellt werden, z. B. durch energieoptimierte Fassaden und Gebäudehüllen oder durch eine bevorzugte Solararchitektur. Sowohl bei der Wertermittlung einer Bestandsimmobilie als auch bei der Wertsicherung von Krediten für Neubauten hat sich die Einstellung gegenüber dem Gebäude und der Bedeutung der Nutzungsphase verändert. Im Rahmen von Neubauplanungen, Modernisierungen (Umbauten) oder Erneuerungen wollen die Bauherren und Investoren zusätzlich zu den Herstellungskosten zunehmend mehr Informationen über das Verhalten des Gebäudes in der Nutzungsphase wissen.

Derzeit ermöglichen die gültigen Normen in Deutschland und in Europa keine eindeutigen inhaltlichen Bestimmungen der Lebenszykluskosten. Die Normen stehen im Widerspruch zu den Kostenarten zueinander und geben dem Anwender keine Möglichkeit einer eindeutigen Leistungsdefinition. So dienen zur Bestimmung der Gebäudenutzungskosten unterschiedliche Normen und Richtlinien. Die Nutzungskosten von Gebäuden werden z. B. im Zusammenwirken mit der DIN 276 nach DIN 18960 erstellt. Diese Norm ist allerdings in

Teilbereichen nicht mit der älteren Leistungsdefinition der Nutzungsphase nach DIN 32736 kompatibel. Zudem haben mit Einführung der DIN EN 15221 und DIN EN 15222 die Abweichungen zwischen den Kostenarten und den Leistungsdefinitionen noch zugenommen. Für die Ver- und Entsorgungskosten erlaubt die Bedarfsberechnung nach DIN V 18599 allerdings eine wesentlich genauere Vorhersage als dieses bisher mit der EnEV-Berechnung möglich war. Eine genau definierte Zuordnung der unterschiedlichsten Begriffe, wie Betriebskosten, Bewirtschaftungskosten, Facility-Management-Kosten, Nutzungskosten, etc., wird hier insbesondere für die Nutzungsphase und die resultierenden Kosten erschwert.

### 1.1.6.1 Nutzungskosten

Einerseits sind in der DIN 276 nur geringe Ansätze für die Kostenerfassung der Nutzungsphase enthalten. Andererseits wird in der DIN 18960 eine Struktur zur Erfassung von Kosten für die Nutzungsphase des Gebäudes vorgegeben. Diese Struktur berücksichtigt die Kapitalkosten- und Verwaltungsaspekte. In den Kostenstellen 3 »Betriebskosten« und 4 »Instandsetzung« werden die durch die Nutzung der baulichen Gebäudestruktur verursachten Kosten erfasst.

### 1.1.6.2 Ver- und Entsorgungskosten

Der Energiebedarf von Nichtwohngebäuden ist seit 2007 entsprechend der Vornorm DIN V 18599 mit einem neuen Berechnungsverfahren zu ermitteln. Als funktionelle Einheit ist nicht mehr der Bezug auf die beheizte Raumkubatur ( $\text{m}^3$  beheizter Raum), sondern die beheizte Nettogrundfläche (NGF) zum Ansatz zu bringen.

Die DIN V 18599 berücksichtigt auch die Kühlung eines Gebäudes. Zudem wird je nach Nutzungstyp ein Nutzungsprofil für den Energiebedarf der erforderlichen Einbauten (Hilfsenergie für Heizung, RLT-Klima-Kälte, Transportmittel (Aufzüge, etc.), EDV-Anlagen) einkalkuliert. Die Gebäudebeleuchtung wird entsprechend eines angenommenen Lampentyps sowie der verwendeten Steuerung (EVG, etc.) berücksichtigt. Hierdurch wird ein wesentlich höherer Bedarf an elektrischer Energie berechnet, als dieses bei der EnEV-Berechnung möglich war. Die Bedarfsberechnung nach DIN V 18599 erlaubt insofern eine wesentlich genauere Vorhersage der Ver- und Entsorgungskosten, als dieses bisher möglich war.

### 1.1.6.3 Reinigung, Wartung, Instandsetzung

Einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten für den Nutzungszeitraum hat der Zyklus der auszuführenden Arbeiten. Insofern unterliegt der Reinigungszyklus einer großen Variabilität hinsichtlich der Ausführungselemente, Nutzungsart und dem Hygienestandard. Hinsichtlich der Wartungszyklen sind einerseits die gesetzlichen Vorgaben aufgrund von Verordnungen zu erfüllen, andererseits die Empfehlungen der Hersteller und der AEMV zu berücksichtigen. Die Instandsetzungszyklen beziehen sich in der Regel weitgehend auf die Angaben im »Leitfaden für nachhaltiges Bauen« des Bundesministeriums für Verkehr, Bauen und Wohnen und für die technischen Anlagen auf die Inhalte der VDI 2067. Für die Werke Wärme-, RLT- und Klima-Kältetechnik sollten auf jeden Fall die Hygienerichtlinien

nach VDI 6022 und die darin geforderten Reinigungs-, Wartungs- und Instandsetzungsintervalle beachtet werden.

#### 1.1.6.4 Veränderte Randbedingungen

Die Verwendung der Gefma-Richtlinien 200, 220 und 300 zeigt sich hier als praxisnäher, stellt aber noch keine für die Lebenszykluskosten ausreichende Lösung dar. Bei den derzeit durchgeführten und analysierten Praxisobjekten hat sich die Kostengliederung für die Nutzungskosten nach den Leistungen der DIN 32736 durchgesetzt. Als praxisnah hat es sich erwiesen, auch die Nutzungskosten in gebäude- und in servicebezogene Kosten zu unterteilen. Zur Berechnung der Lebenszykluskosten bei Industriebauten sind unter Zugrundelegung der in der Planungsphase erfolgten Wirtschaftlichkeitsberechnung die gebäudebezogenen Nutzungskosten zu ermitteln, wobei die servicebezogenen Nutzungskosten nachzuführen sind. Die Nutzungskosten können dann ausgewogen in mieter- und vermierterseitige Kosten aufgesplittet werden.

#### 1.1.6.5 Objektbeispiel

Capricorn-Haus im Medienhafen Düsseldorf, Architekten: Gatermann+Schossig, Köln. Das Bürogebäude Capricorn wurde mit sehr geringen Betriebskosten konzipiert. Die bereits in der Entwurfsphase seitens des Bauherrn, Capricorn Development, erklärte Prämisse des gesamten Projektes war die Forderung nach einem Niedrigenergiegebäude als Symbiose aus ökologischer Ästhetik und trendgemäßem Komfort für Betreiber und Nutzer über den gesamten Lebenszyklus. Im Lebenszyklus eines Gebäudes betragen die Investitionskosten ca. 30% und die Folgekosten 70%. Die Folgekosten setzen sich zum weit größeren Teil aus Energiekosten zusammen. Aus diesem Grund lag bereits während der Planungsphase der Schwerpunkt des Projekts auf der Energieeffizienz bei gleichzeitig hohem Komfort für die Nutzer. Der Bauherr hat daher nicht nur hohe Ansprüche an die Ästhetik und Funktionalität der Architektur, sondern auch an eine anspruchsvolle Gebäudetechnik gestellt. Er forderte eine intelligente Gebäudekonzeption und die Einhaltung eines monatlichen Energieverbrauchs von unter 65 Cent/m<sup>2</sup>. Dieser fixierte energetische Eckwert liegt um 20% unter den Forderungen der EnEV.

Das Bürogebäude erfüllt die Anforderungen an ein »Low-Energy-Gebäude«, bietet den Nutzern eine komfortable Arbeitsumgebung und erlaubt die flexible Büronutzung auf sämtlichen Stockwerken (Zellenbüros, Kombibüros und Open Space-Nutzung).

Die kompakte Bauweise, eine beispielhafte Wärmedämmung, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Betonkernaktivierung in Verbindung mit Geothermie sowie natürliche Belüftungskonzepte erfüllen die Ansprüche an ein ökologisches, energetisch ausgewogenes und ökonomisches Gebäudekonzept. Mit der Gebäudeautomation lassen sich die Beleuchtungs- und Verschattungstechnik sowie die Heizung-, Wärmerückgewinnungs- und Klima-/Kältetechnik automatisch an jeder der 1280 Raumachsen regeln. Das Gebäude lässt sich zudem mit geringem Aufwand und minimalen Kosten an die sich ändernden Nutzungsbedingungen anpassen.



## 1.2 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Das EEWärmeG und die EnEV (2007, 2009 und 2012) sollen zur Energieeinsparung beitragen und zur Effizienzsteigerung durch den Einsatz regenerativer Energien und rationeller Energieanwendungen führen. Vorrangig gilt es jetzt, die Ungereimtheiten und Widersprüche innerhalb der Gesetzgebung, Verordnungen und Förderprogramme zu beseitigen.

Beispiel: Die Anforderungen des EEWärmeG, 15 % des Wärmebedarfs solar oder mittels Alternativlösungen zu decken, sollten – wie im früheren Gesetzentwurf – auf die Endenergie als Wärmeenergiebedarf und nicht auf die Nutzwärme der Wärmeerzeugung bezogen werden, d. h. einschl. der Aufwandsbeträge für die Übergabe, Verteilung und Speicherung. Beispielsweise kann sonst eine solarthermische Anlage für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) theoretisch zu einem Ergebnis gegen Null führen, weil der Solarertrag dann kaum mehr deckt als die mit der Solarthermieanlage verbundenen erhöhten Speicher- und Verteilverluste sowie die erhöhten Teillastverluste der zusätzlichen Wärmeerzeuger.

Die Einstellung der Vorlauftemperaturregelung und der Pumpenförderhöhe, die Verwendung von Hocheffizienzpumpen der A-Klasse und die Durchführung des hydraulischen Abgleichs werden weder für Neubauten noch für energetische Modernisierungen bindend vorgeschrieben. Eine technische Regel für diese Maßnahmen steht derzeit noch aus. Hinzu kommt, dass die erforderlichen Einschränkungen für den erweiterten KWK- und Biomasseinsatz nur unzureichend definiert ist. Der unkoordinierte Einsatz von KWK in Nah- und Fernwärmenetzen kann durch besser gedämmte Gebäude mit geringer Anschlussdichte zu mittel- und langfristig unwirtschaftlichen Lösungen führen. Die an Praxisverbrauchswerten orientierte Energieverbrauchsanalyse (EVA) sollte zur Kontrolle von geförderten energetischen Maßnahmen Standard werden. Statistiken belegen, dass bis zu 80 % der Wohngebäude einen Endenergieverbrauch zwischen 100 bis 200 kWh/(m<sup>2</sup>a) aufweisen. Mithilfe einer Energieverbrauchsanalyse lassen sich die größten Verluste in der Gebäudehülle, in der Anlagentechnik oder im Nutzerverhalten lokalisieren.

Die Gebäudestrukturen haben sich in den letzten Jahren stark verändert, wobei die Entwicklung in die Richtung leichter Bauweisen zielt sowie hohe Glasanteile und Metallkonstruktionen weit verbreitet sind. Aufgrund dieser Bauweisen wird natürlich die Wärmespeicherkapazität der Gebäude reduziert. Andererseits ist daher oft auch die bauliche Masse nicht ausreichend vorhanden, um die Schwankungen der Außentemperatur im Tagesverlauf auszugleichen. Da sich insbesondere während der Übergangszeit, also im Frühjahr und Spätsommer die Kühl- und Heizphasen überschneiden, kann es sogar vorkommen, dass im Tagesverlauf beide Funktionen gefordert sind. Morgens muss das Gebäude nach einer kalten Nacht beheizt werden, wobei am Nachmittag bei tief stehender Sonne der Wärmeeintrag bereits wieder so groß sein kann, das gekühlt werden muss. In diesem Fall kann eine geeignete Beschattung helfen, den Einfall einer zu großen Kühllast durch Sonneneinstrahlung zu verhindern.

Ein weiteres Kriterium besteht in den steigenden inneren Lasten, wobei aufgrund der o. a. zu geringen Wärmespeicherkapazität der Gebäude, die durch Beleuchtung und andere Wärmequellen eingetragene Lasten nicht mehr kompensiert werden können. Jede durch interne Wärmequellen eingetragene Leistung wirkt sich aber unmittelbar auf die Temperatur

im Gebäude aus. Die tendenziell steigenden Energiepreise lassen manchen Bauherrn zum Wunsch eines Nullenergiehauses anregen, d. h. kein zusätzlicher finanzieller Aufwand für Heizenergie und trotzdem behagliche Raumtemperaturen. Diese Erwartungen werden in der Praxis allerdings nur von den wenigsten Gebäuden erfüllt. Ob ein Nullenergiehaus überhaupt das Nonplusultra bzw. erstrebenswert ist, hängt allein schon von der Tatsache ab, dass derartige Gebäude für die Winter- und nicht für die Sommermonate optimiert sind.

Die Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs sind trotzdem notwendig und auch möglich. Neben dem Nutzer, der aufgrund der Lüftungsgewohnheiten und durch die gewählte Raumtemperatur einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf nimmt, spielt primär die Art der Wärmeerzeugung eine entscheidende Rolle. Das alleinige Verbrennen ist hier sicherlich die schlechteste Variante. Günstiger sind Verfahren, bei denen, neben der Wärme auch noch Strom erzeugt werden kann. (Brennstoffzellen und ihre marktreife Systemtechnik lassen leider noch auf sich warten). Die Entwicklungsarbeiten (Testreihen und Problematiken bei den Prototypen) lassen erkennen, dass noch einige Zeit vergeht bis eine kommerzielle und vor allem wirtschaftliche Nutzung der Brennstoffzellen erreicht wird.

## **1.2.1 Energetische Bewertung und Nutzerverhalten**

Entscheidend für den Nutzen und die Effizienz von solarthermischen Techniken, d. h. des solaren Heizens von Gebäuden oder der solaren Warmwasserbereitung, ist ein solargerechtes Nutzerverhalten, weil das Temperaturniveau (thermische Leistungsfähigkeit) der Solarwärme nicht sehr hoch ist. Aufgrund einer Reduzierung der Raumtemperatur z. B. von 23 auf 20 °C kann eine Energieeinsparung um bis zu 18 % erreicht werden.

### **1.2.1.1 Energieeinsparung durch Raumtemperaturabsenkung**

Entsprechend der Definition des U-Werts hängt der Transmissionswärmeverlust ( $\Delta Q_T$ ) von der Differenz zwischen der Innen- und Außentemperatur ab. Hierdurch gilt z. B. bei einer Außentemperatur von 0 °C für die prozentuale Zunahme von  $\Delta Q_T$  bei 22 °C gegenüber 18 °C:  $(22 - 18)/18 = 0,22 = 22\%$ ; d. h. es wird durch dieses Nutzerverhalten eine Energieeinsparung von 5,5 % pro K bzw. °C erreicht.

### **1.2.1.2 Nachtabenkung**

Aufgrund der regelungstechnischen Nachtabenkung der Raumlufttemperatur um einige Grade wird ebenfalls eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs erreicht. Generell muss die während der Nachtabenkung aus der Speicherwärme der Gebäudehülle infolge Transmission nach außen abfließende Wärmemenge während der Aufheizphase des folgenden Tages dem Gebäude wieder zugeführt werden. Entscheidend ist allerdings, dass der energetische Nutzen der Nachtabenkung und damit das Maß der dadurch erzielbaren Energieeinsparung von den Gebäudekenngrößen, d. h. vom Dämmstandard und von der Wärmekapazität abhängig sind. Beide Größen bestimmen die thermische Zeitkonstante des Gebäudes und indirekt das Auskühlungsverhalten.

Ein sehr gut gedämmtes, in Massivbauweise ausgeführtes Gebäude mit Fenstern mit temporärem Wärmeschutz wird bei Nachtabsenkung der Raumtemperatur nur wenig Wärme verlieren. Die Zeitkonstante ist hier groß verglichen mit der Temperaturabsenkdauer. Damit ist auch das Ausmaß der Energieeinsparung, und somit die Wirksamkeit der Nachtabsenkung, die insofern einer Nachtabstaltung gleichgesetzt werden kann, geringer als bei schlecht wärmegeprägten Gebäuden mit geringem Speichervermögen.

Nicht nur mit innovativen Antriebstechnologien, sondern auch mit modernen Steuerungskonzepten, wie mit einer automatischen Nachtabsenkungsfunktion, lässt sich elektrische Antriebsenergie einsparen. Wird die Vorlauftemperatur, beispielsweise in der Nacht, durch den Wärmeerzeuger abgesenkt, würde eine differenzdruckgeregelte Pumpe normalerweise aufgrund der sich öffnenden Thermostatventile ihre Drehzahl bis zur maximalen Drehzahl erhöhen und unbenötigte Wassermengen im System verschieben. Bei Pumpen mit Nachtabsenkungsfunktion, wird die Drehzahl automatisch auf die Minimalkennlinie reduziert, sobald die Medientemperatur eine definierte Temperatur unterschreitet. Steigt die Vorlauftemperatur wieder an, wird auf Regelbetrieb zurückgeschaltet. Dies funktioniert nicht nur nachts, sondern auch bei jeder entsprechenden Vorlauftemperaturveränderung in Absenkphasen.

### 1.2.1.3 Wärmedämmung und Anlagentechnik

In Bezug auf die Begrenzung des Primärenergiebedarfs setzen sich die relevanten Investitionskosten eines Gebäudes aus den Kosten für Wärmedämmmaßnahmen der Gebäudehülle und den Kosten der Anlagentechnik zusammen. Beiden Kosten ist gemeinsam, dass sie progressiv ansteigen, je besser die Wärmedämmung der Außenwände bzw. je energieeffizienter die Anlagentechnik wird. Für die Gesamtkosten des Gebäudes werden beide Kostenanteile addiert und das Kostenminimum ermittelt. Durch das Kompensationsprinzip steigen die Kosten der Gebäudehülle an, wenn eine schlechtere Anlagentechnik eingebaut wird bzw. umgekehrt.

**Tab. 1-6:** Maßnahmen zur Energieeinsparung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Maßnahmen                         | Energieeinsparung (%) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Außenwanddämmung                  | 20 bis 40             |
| Fenster mit Wärmeschutzglas       | 10 bis 25             |
| Kellerdeckendämmung               | 10 bis 20             |
| Dachdämmung                       | 10 bis 25             |
| RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung | 15 bis 30             |

Zur ökologisch und ökonomisch sinnvollen Begrenzung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes ist es unerlässlich, die Wärmedämmung des Gebäudes und die Planung der Heizungsanlage frühzeitig, gleichzeitig und fachkundig durchzuführen. Nur so lassen sich die Gesamtkosten minimieren und Energieeffizienz steigern. Das Kostenminimum ist meist flach ausgeprägt, sodass es einen erweiterten Bereich gibt, in dem verschiedene Lösungsmöglichkeiten finanziell gleichwertig sind. Erst wenn anlagentechnische oder bauphysika-

lische Lösungen gewählt werden, die extrem von den heute üblichen abweichen, steigen die Gesamtkosten eines Gebäudes deutlich an (bei gleichem Primärenergiebedarf).

Weiterhin können durch das gleichzeitige und frühzeitige Planen Gebäudedämmung und Anlagentechnik effektiv in das Gebäude integriert werden (Lüftungsanlagen, Solaranlagen, Verzicht auf Schornstein, etc.). Durch die Aufstellung der Anlagentechnik innerhalb der thermischen Gebäudehülle ist ebenfalls eine Steigerung der Energieeffizienz zu erreichen.

Bei der Bestimmung des Primärenergiebedarfs der Anlagentechnik ist es besonders ratsam, die Energiekennwerte der tatsächlich verwendeten heiztechnischen Komponenten zu verwenden. Die Kennwerte der realen Produkte sind in den meisten Fällen günstiger als die der Standardprodukte, die bei dem vereinfachten Verfahren der EnEV zu Grunde gelegt sind. Durch die Verwendung der realen Produktkennwerte können die Baukosten gesenkt werden, ohne dass zusätzliche Anlagenkosten entstehen. Dazu ist aber ebenfalls die kompetente und frühzeitige Fachplanung der Anlage erforderlich.

Durch die DIN V 4701-12 und PAS 1027 (Publicly Available Specification) liegen Berechnungsregeln und Kennwerte vor, die eine energetische Bewertung einer bestehenden Anlage und die Auswirkung einzelner Sanierungsmaßnahmen auf die Höhe von Aufwandszahl und Primär-/Endenergie ermöglichen. Wenn der Entschluss zu einer Sanierung eines Altbaus auch im energetischen Sinn gefasst wurde, wird es erforderlich, eine ganzheitliche Betrachtung durchzuführen. Alle veränderten Bauteile, die Heizungsanlage und auch das Nutzerverhalten beeinflussen sich gegenseitig. Einzelne, für sich günstige Maßnahmen, können sich unter Umständen negativ auf andere Bauteile auswirken. So kann z. B. der Einbau guter Wärmedämmfenster bei schlecht wärmegedämmter Außenwand dazu führen, dass die überschüssige Luftfeuchtigkeit nicht mehr an den Fenstern kondensiert, sondern an der Außenwand zu Schimmelbildung führt, oder ein moderner Brennwertwärmeerzeuger gar nicht in seinem wirtschaftlichen Kondensationsbereich gefahren werden kann, da die restliche Anlage, wie Pumpen und Wärmeübertrager, nicht den neuen Randbedingungen angepasst wurden.

In der Regel stehen an Gebäuden nur einzelne Modernisierungsmaßnahmen an, bei denen es aber wichtig ist, für diese Einzelmaßnahme die wirtschaftlichste und optimalste Lösung zu finden. Steht der Energieverbrauch im Mittelpunkt dieses Vorhabens, dann ergeben die Untersuchungen oft, dass die wirtschaftlichste Maßnahme mit einer Sanierung der Heizungsanlage erreicht wird.

Als eine der häufigsten Sanierungsmaßnahmen wird der Austausch von Fenstern durchgeführt, weil derzeit noch sehr viele Wohngebäude mit einfachen Verglasungen ausgerüstet sind, die zudem auch noch undichte Rahmen vorweisen. Zu beachten ist, dass auch bei der nachträglich erfolgten Abdichtung der Fugen die Scheiben bei tiefen Außentemperaturen so weit abkühlen, dass es zu unangenehmen Zugerscheinungen kommt. Hier führen nicht nur das Behaglichkeitsdefizit zur Empfehlung neuer Fenster, sondern auch die schadhafte Teile oder der U-Wert (früher k-Wert) über  $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

**Tab. 1-7:** U-Werte (Richtwerte) für Primärbauerteile (Quelle: IB-THEISS, München)

| Bauteil              | Niedrigenergiehaus-Standard<br>(NEH) | Passivenergiehaus-Standard<br>(NEH) |
|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|                      | U-Wert [ $W/(m^2 K)$ ]               | U-Wert [ $W/(m^2 K)$ ]              |
| Dach                 | 0,2                                  | 0,10 bis 0,15                       |
| Fenster              | 1,1                                  | 0,8                                 |
| Außenwand            | 0,25                                 | 0,10 bis 0,15                       |
| Kellerdecke          | 0,25                                 | 0,15                                |
| Boden gegen Erdreich | 0,3                                  | 0,15                                |

Bei der Entscheidung alte Fenster auszutauschen, müssen die Anforderungen der EnEV berücksichtigt werden. Diese schreibt für Gebäude mit normalen Innentemperaturen für Fenster einen U-Wert von max. 1,7 vor, der sich aus den Rahmen und der Verglasung zusammensetzt. Moderne Fenster haben heute U-Werte von unter  $1,3 W/(m^2 K)$ . Ferner tragen die Außenwände wesentlich zum Energieverbrauch eines Gebäudes bei, da sie üblicherweise den größten Anteil an der thermischen Hüllfläche eines Gebäudes haben. Aus diesem Grund bietet sich hier eine weitere Möglichkeit, diese in Energiesparmaßnahmen einzubeziehen. Sollte ohnehin der schadhafte oder unansehnliche Putz erneuert werden, so ist der zusätzliche Aufwand für eine Außendämmung auch nicht mehr allzu groß. Eine Dämmung von außen gehört heute zum Standard der Technik und ist weitgehend unproblematisch, da die massive Wand auf der warmen Seite der Dämmung liegt. In der Praxis ist hier am häufigsten das Wärmedämmverbundsystem verbreitet, bei dem eine Dämmstoffplatte direkt auf dem Mauerwerk oder dem alten Außenputz angebracht wird. Der neue Putz wird dann über ein Armierungsgewebe aufgezogen. Hier muss bei der Dämmung nicht gespart werden, weil die Mehrkosten für einige zusätzliche Zentimeter Dämmstoffdicke gering sind.

Das Dach oder die obere Geschossdecke bieten häufig die beste Möglichkeit, die Wärmeverluste zu verringern, wobei für obere Geschossdecken, soweit sie zugänglich sind, nach der EnEV eine Nachrüstpflicht zur Dämmung besteht. Der U-Wert darf dann  $1,3 W/(m^2 K)$  nicht überschreiten. In beiden Fällen lassen sich hohe Dämmstoffdicken problemlos verwirklichen, weil sie das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes nicht verändern.

Bei allen diesen Maßnahmen sind natürlich die Mindestanforderungen des Anhangs 3 Tabelle 1 der EnEV zu berücksichtigen. Durch Verordnungen wie die EnEV und Förderprogramme über die bundeseigene Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) soll das hohe Energieeinsparpotenzial im Gebäudebestand durch Nachrüstpflichten mobilisiert werden. Diese Anforderungen sollen auch bei ohnehin anstehenden Modernisierungsmaßnahmen gelten. In der Regel ist es wirtschaftlicher mit der fälligen Fassadenerneuerung, dem Fensteraustausch oder der Dachsanierung gleichzeitig die energetische Qualität anzuheben. Neben der Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV) schreibt jetzt auch die EnEV zusätzliche Austauschfristen für ältere Wärmezeugeranlagen vor.

Um Energiekosten in einem Altbau einzusparen stellt sich hier eine Modernisierung der Heizungsanlage als die wirtschaftlichste Maßnahme heraus. Der Nutzer, der bisher aus dieser oder anderen Überlegungen seine veraltete Heizungsanlage noch nicht ausgetauscht hat, wird durch die Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV) oder die EnEV even-

tuell dazu verpflichtet werden. In beiden Verordnungen gibt es unter bestimmten Randbedingungen Fristen, um eine alte Wärmeerzeugeranlage gegen einen modernen Wärmeerzeuger auszuwechseln. Wichtig ist, bei der Sanierung eines Altbaus immer eine ganzheitliche Betrachtung aller Möglichkeiten durchzuführen und nicht auf die vorgeschriebenen Endtermine zu warten. Ein Grund liegt in der Technik der alten Konstanttemperatur-Wärmeerzeuger. Nicht nur, dass diese oft nur zwei Drittel der eingesetzten Energie in Nutzwärme umsetzen, ihr Nutzungsgrad wird mit sinkender Auslastung immer schlechter. Das liegt an den hohen Auskühl-, Oberflächen- und Abgasverlusten der Wärmeerzeuger früherer Generationen. Wenn die Wärmedämmung des Hauses saniert, aber der Austausch des Wärmeerzeugers wegen der offenen Fristen noch hinausgezögert wird, dann zeigt sich als Endergebnis ein gegensätzlicher Effekt. Durch die verbesserte Dämmung sinken der Wärmebedarf des Gebäudes und damit die Auslastung des alten Wärmeerzeugers.

Bei der Modernisierung im Gebäudebestand geht es weniger darum, die günstigste Maßnahme herauszusuchen und die anderen bestehen zu lassen. Im Gegenteil, der höchste Effekt bei der Energieeinsparung und der CO<sub>2</sub>-Minderung ergibt sich, wenn sowohl der Wärmeerzeuger ausgetauscht als auch das Gebäude wärmegeklämt werden. Falls jedoch für die Durchführung beider Maßnahmen die finanziellen Mittel fehlen, zeigt nicht nur die Erfahrung aus der Praxis, dass in der Reihenfolge der Maßnahmen der Austausch des Wärmeerzeugers Vorrang vor der nachträglichen Gebäudedämmung hat. Im Zuge einer Heizungsanierung sollte auch überlegt werden, ob nicht die Anschaffung eines Brennwertwärmeerzeugers eine energetisch vorteilhaftere Lösung darstellt. Dieser Wärmeerzeuger erfordert zwar etwas höhere Investitionskosten als ein Niedertemperatur-Wärmeerzeuger, amortisiert sich aber in kürzester Zeit über die ersparten Brennstoffkosten. Die Brennwertwärmeerzeuger nutzen zusätzlich die Wärmeenergie, die durch Kondensation von Wasserdampf aus dem Abgas frei wird. So kommen sie im Vergleich zu einem veralteten Wärmeerzeuger auf eine noch höhere Energieeinsparung.

Bei der Heizungserneuerung erweist sich in der Regel auch der Schornstein als sanierungsbedürftig. Da bei Ersatz einer alten (überdimensionierten) Heizung durch einen neuen Niedertemperatur- oder Brennwertwärmeerzeuger der Abgasstrom deutlich reduziert wird, genügt es, eine Abgasleitung mit dem ausreichenden geringeren Querschnitt einfach in den alten Schornstein einzuziehen. Hierfür gibt es fertige Systeme, die oft zusammen mit den Wärmeerzeugern angeboten werden. Die Installation einer solchen Abgasleitung ist einfach zu realisieren und deutlich kostengünstiger als eine komplette Schornsteinsanierung.

Mit dem Austausch eines alten Wärmeerzeugers ist die Sanierung der Heizungsanlage allerdings nur teilweise vollzogen. Die EnEV hat noch für weitere Komponenten einer Anlage entsprechende Anforderungen gestellt. So besteht eine Nachrüstpflicht für alle zugänglichen Rohrleitungen für Wärmeverteilung und Warmwasser, die entsprechend den Anforderungen der EnEV zu dämmen sind. Für selbstständig wirkende Einrichtungen zur Verringerung und Abschaltung der Wärmezufuhr sowie zur Ein- und Ausschaltung elektrischer Antriebe in Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Zeit, bestand schon bisher eine entsprechende Nachrüstpflicht. Da der Gesetzgeber davon ausgeht, dass diese Ausrüstung nicht bei allen betroffenen Anlagen vorhanden ist, wurde diese Pflicht beibehalten. Da bei modernen Wärmeerzeugern diese Steuerungseinrichtungen fast zur Standardausrüstung gehört, dürfte dieses Problem durch den Austausch des Wärmeerzeugers mit gelöst werden.

Zur Überprüfung der Heizkörper zählt auch, ob alle Heizkörper mit Thermostatventilen ausgerüstet sind. Diese sind seit Jahren gesetzlich vorgeschrieben, aber auch hier wird die Nachrüstpflicht durch die EnEV fortgesetzt. In jedem Fall wird für die neue Anlage ein hydraulischer Abgleich nach DIN 18380 erforderlich, der sicherstellt, dass jeder Heizkörper mit der für seine errechnete Leistung erforderlichen Wassermenge beaufschlagt wird. Damit werden Strömungsgeräusche vermieden und der Stromverbrauch der Umwälzpumpe von vornherein auf das erforderliche Maß begrenzt. Eine andere Möglichkeit bietet sich durch den Einbau von neuen voreinstellbaren Ventilen, die eine Abstimmung der einzelnen Heizkörper ermöglicht.

Nach dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm der bundeseigenen Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) sind alle zur vollen Funktion der Anlage gehörenden Ausgaben, wie die Schornsteinanpassung oder die Erneuerung der Heizkörper sowie der Einbau von Steuer- und Regelungstechnik, ja sogar Planungs- und Beratungsaufwand, förderfähig.

#### **1.2.1.4 Gestalterischer Freiraum durch bessere Anlagentechnik (Kompensationsprinzip)**

Durch den Bezug der EnEV auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes gibt es keine eindeutige Grenze für den Heizwärmebedarf eines Gebäudes. Dieser kann verschiedene Werte annehmen, wobei dann die Anlagentechnik nur noch so viele Verluste haben darf, dass der zulässige Primärenergiebedarf des Gebäudes nicht überschritten wird. Damit gibt es die Möglichkeit, energetisch ungünstige Maßnahmen bei der Dämmung des Gebäudes durch energieeffiziente Anlagentechnik (und umgekehrt) zu kompensieren. Dieses Kompensationsprinzip erhöht den gestalterischen Spielraum eines Architekten. Damit ist es z. B. möglich, die Außenwände relativ dünn zu gestalten und dadurch das Raumangebot eines Gebäudes zu vergrößern. Auch kann ein ungünstiges A/V-Verhältnis dadurch kompensiert werden. Diese Möglichkeiten sollen aber nicht bedeuten, dass man sie auch anwendet, da ein günstiges A/V-Verhältnis oder eine gute Wärmedämmung prinzipiell sinnvolle Maßnahmen zur Reduktion des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes sind. Außerdem schreibt die EnEV neben dem maximalen Primärenergiebedarf auch einen Mindestwärmeschutz vor.

Zur Ermittlung der Energieeffizienz von Gebäuden sind die Regelwerke DIN EN ISO 13790, DIN EN 15217, DIN EN 15315, DIN EN 15332 und die Normenreihen der DIN EN 15316 und DIN EN 15377 zu berücksichtigen. Die Schrittfolge im Entwurfsprozess erfordert eine enge Zusammenarbeit von Architekt und Gebäudetechnikfachplaner von Beginn des Planungsprozesses, insbesondere in den frühen Phasen der Vor- und Entwurfsplanung. Dies ist gegenwärtig in vielen Projekten noch keine übliche Praxis. Nach wie vor stehen Fragen des baulichen Wärmeschutzes im Vordergrund und der Gebäudetechnikfachplaner wird erst zu einem Zeitpunkt in das Projekt einbezogen, wenn das Gebäudekonzept an sich schon steht. Eine Schwierigkeit besteht möglicherweise darin, den geforderten Dämmstandard (in der Verordnung siehe  $H_T$ ) vollständig nach unten auszuschöpfen. Nur das schafft aber die erforderlichen Kostenfreiräume, um gegebenenfalls eine Wärmepumpe einsetzen zu können.

Eine weitere Forderung betrifft den angeführten Aspekt eines zusätzlich notwendigen Entscheidungskriteriums und zielt auf die Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Investitions-Bewertungsverfahren als Entscheidungsgrundlage in den Entwurfsprozess ab. Hier lie-



gen mit der VDI 2067, Blatt 1 bzw. der VDI 6025 gründlich ausgearbeitete Regelwerke für den Fachplaner vor, welche nur angewendet werden müssen. Große Aufmerksamkeit ist allerdings der Wahl der richtigen Eingangsparameter zu schenken, d. h. es sind zum einen Investitionskosten abzuschätzen und zum anderen müssen Prognosen über Energie-, Lohn- und Finanzierungskosten gemacht werden, deren Güte das Ergebnis letztlich erheblich beeinflussen.

Seit dem Inkrafttreten der EnEV müssen Neubauten einer primärenergetischen Bewertung unterzogen werden. Kenngrößen für die Effizienz der vorgesehenen Anlagentechnik ist die Anlagenaufwandszahl ( $e_p$ ), d. h. das Verhältnis der zugeführten Primärenergie zu einem vorgegebenen Bedarf. Dieser setzt sich im öffentlich-rechtlichen Nachweisverfahren aus der rechnerisch ermittelten Jahresheizwärmemenge ( $Q_H$ ) in kWh/(m<sup>2</sup>a) nach DIN V 4108-6 und, im Falle von Wohngebäuden, einem festgelegten Trinkwasserwärmebedarf ( $Q_{tw}$ ) von 12,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) zusammen.

Zur Berechnung der Anlagenaufwandszahl ist der gesamte im Zusammenhang mit der Wärmeerzeugung und Verteilung stehende Energiebedarf zu ermitteln. Darunter fällt auch die sogenannte Hilfsenergie (in der Regel der Strombedarf für Regelung, Pumpen, Ventilatoren, etc.). Mittels der spezifischen Primärenergiefaktoren werden die unterschiedlichen Energieträger auf den Primärenergiebedarf umgerechnet, um die Anlagenaufwandszahl ( $e_p$ ) zu bestimmen. Die dafür erforderlichen Berechnungsverfahren, Randbedingungen und Kennwerte finden sich in der DIN V 4701-10 »Energetische Bewertung heiz- und raumluftech-nischer Anlagen«.

Das Berechnungsverfahren wird in die Bereiche Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung unterteilt. Für die geplanten Komponenten der Trinkwassererwärmungs-, Lüftungs- und Heizungsanlagen werden die Bedarfsanteile an thermischer und Hilfsenergie erfasst und zu dem jeweiligen Endenergien aufsummiert sowie mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren multipliziert, um den gesamten Primärenergieaufwand zu berechnen. Nicht vorhandene Bestandteile entfallen im Berechnungsgang. Zur Ermittlung der Anlagenaufwandszahl können drei Verfahren herangezogen werden. Basis bildet das detaillierte Verfahren, das alle erforderlichen Berechnungsformeln enthält. Daraus abgeleitet wird unter Abnahme von Standardwerten das Tabellenverfahren. Die erforderlichen Einzelwerte werden dem Anhang der Norm aus tabellarischen Darstellungen entnommen. Wiederum darauf aufbauend können dem Diagrammverfahren für die gebräuchlichsten Anlagen Ausführungen in Wohngebäuden die Anlagenaufwandszahlen grafisch ermittelt werden.

Bei allen Verfahren wird vorausgesetzt, dass es sich um neu zu errichtende Anlagen handelt. Für bestehende Komponenten sind die Formeln des detaillierten Verfahrens generell anwendbar, in der Regel fehlen jedoch die in die Gleichungen einzusetzenden energetischen Kennwerte für die Bestandsanlagen.

Um die Einhaltung der Anforderungen der EnEV im Bezug auf die Berechnung des Primärenergiebedarfes für den Fall eines Anbaus/Erweiterung > 100 m<sup>3</sup> bei Versorgung durch eine bereits bestehende Anlage dennoch nachweisen zu können, wurde in der DIN V 4701-10, 08-2003, ein geeignetes, einfaches Verfahren integriert. Dies gestattet in solchen Fällen, den bestehenden Wärmeerzeuger wie eine Fernwärmeübergabestation zu betrachten. Dadurch sind die Erzeugeraufwandszahlen für Trinkwassererwärmung mit 1,14, Heizwärmeerzeugung mit 1,01 und der Primärenergiefaktor (thermisch) mit 1,3 festgelegt.



Damit wurde zwar eine Lücke für die Erfüllung der öffentlich-rechtlichen Anforderungen geschlossen, allerdings bewirkt diese Verfahrensweise auch eine Gleichbewertung aller bereits bestehenden Wärmeerzeuger. Zudem setzt das Verfahren auch voraus, dass in dem Anbau/der Erweiterung alle anderen Komponenten den Anforderungen an Neuanlagen entsprechen. Eine energetische Bewertung einer bestehenden Anlage und die Auswirkungen einzelner Sanierungsmaßnahmen auf die Höhe von Aufwandszahl und Primär-/Endenergie kann mit den Verfahren der DIN V 4701-10 nach wie vor nicht dargestellt werden. Hierzu liegen seit Februar 2004 durch die DIN V 4701-12 und PAS 1027 die Berechnungsregeln und Kennwerte vor.

In den beiden jetzt vorliegenden technischen Regeln sind auch die bestandsspezifischen Randbedingungen und technischen Daten definiert, die anstelle der Neukomponenten im genauen Verfahren der DIN V 4701-10 eingesetzt werden können. Da eine Berechnung der Anlagenaufwandszahl neben ( $Q_{LW}$ ) auch den Heizwärmebedarf ( $Q_h$ ) zwingend erfordert, kann diese Größe neben den Berechnungsverfahren nach DIN V 4108-6 auch mittels der in der PAS 1027 im Anhang befindlichen deutschen Gebäudetypologie überschlägig ermittelt werden.

Das grundsätzliche Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Anlagenaufwandszahl und der primär- und energetischen Bedarfswerte findet sich in der DIN 4701-10.

Anstelle der Berechnungsgleichung für neue Wärmeerzeuger werden für den Bestand in Abhängigkeit vom Errichtungszeitpunkt unterschiedliche Gleichungen aufgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnung wird in die Gleichung der DIN V 4701-10 (Ermittlung der Erzeugeraufwandszahl Heizen –detailliertes Verfahren) eingesetzt. Dieses Vorgehen wird analog für die weiteren, erforderlichen Einzelwerte angewandt und führt zur Erzeugeraufwandszahl des bestehenden Wärmeerzeugers. Analog dazu erfolgt die Ermittlung der Verteilverluste der Trinkwarmwasserleitungen.

In der DIN V 4701-10 wird vom Dämmstandard nach EnEV ausgegangen (U-Wert Dämmung  $0,2 \text{ W/mK}$ ). Für den Bestand enthält die PAS 1027 wiederum die Abhängigkeit von Errichtung und Zustand, Tabellenwerte, die anstelle der Neuwerte in die Berechnungsgleichung der DIN V 4701-10 eingesetzt werden können und zum Aufwand der bestehenden Verteilung führt.

Die beiden neuen technischen Regeln DIN V 4701-12 und die ergänzende PAS 1027 ermöglichen, basierend auf dem detaillierten Verfahren der DIN V 4701-10, zuerst einmal eine vergleichende energetische Bewertung des Bestandes sowohl unter primär- wie energetischen Aspekten. Damit können analog der EnEV-Forderung eines Energiebedarfsausweises für den Neubau jetzt auch bei Bestandsgebäuden wichtige Anhaltswerte für die energetische Qualität berechnet und aufgelistet werden. Zudem sind die einzelnen Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Effektivität und ihrem Einfluss auf die bekannten Kennzahlen hin prüfbar. Mit den bereitgestellten Kennwerten der bestehenden Anlagenkomponenten werden somit im Rahmen des Berechnungsverfahrens die energetisch wirkungsvollsten Einzelmaßnahmen bzw. Kombinationen transparent. In Verbindung mit einer Wirtschaftlichkeitsberechnung lassen sich somit auch die betriebswirtschaftlich sinnvollsten Konzepte detailliert beschreiben.

Hiermit ist es jetzt auch möglich, einerseits eine energetische Bewertung der vorhandenen Anlagentechnik und andererseits auch die Auswirkungsmaßnahmen auf Anlagenauf-

wandszahl und Primärenergiebedarf durchzuführen. Hierbei gilt bei der Bewertung der Ergebnisse analog den Berechnungen für die EnEV, dass es sich nicht um tatsächlich zu erwartende Energieverbrauchswerte, sondern um unter normierten Bedingungen ermittelte Bedarfswerte handelt.

## 1.2.2 Gebäudestandards und Energiespargebäude

Die Anforderungen der erweiterten EnEV und die dadurch verbesserte Dämmung und Luftdichtheit der Gebäude hat auch die Gebäudetechnik stark verändert. Der Wärmebedarf der Heizung (neue Definition: Heizlast) hat sich verringert. Dem gegenüber stehen gestiegene Komfortansprüche bei der Warmwassererzeugung.

Heute wird die Heizleistung des Wärmeerzeugers nicht mehr wie früher nach der Heizlast bestimmt, sondern nach dem Warmwasserkomfort. Den größten Einfluss hat hierbei die Wärmedämmung. Je kleiner die Gebäudekubatur und je besser das Gebäude gedämmt ist, umso größer ist der Einfluss auf das Verhältnis von Transmissionsheizlast zu Lüftungsheizlast. Die Wärmeabgabe nach außen nimmt ab, dafür steigt in hoch gedämmten Gebäuden die Bedeutung der inneren Wärmelasten, z. B. durch den Sonneneintrag durch große Fensterflächen oder durch die Computertechnik in Bürogebäuden. Im Niedrigenergie- und Passivhaus übersteigen diese Fremdlasten den Heizwärmebedarf. Das verlangsamte Auskühlen der Energiespargebäude verringert das Einsparpotenzial durch Nachtabenkung des Wärmeerzeugers. In den luftdichten Passivhäusern mit zentralen Lüftungsanlagen nimmt die Transmissionsheizlast gegenüber der gestiegenen Lüftungsheizlast ab. Die aktuelle Änderung der neuen Heizlastnorm DIN EN 12831 wurde speziell auf Passivhäuser angepasst. Die Normaußentemperatur kann in Abhängigkeit der thermischen Zeitkonstanten  $C_{\text{wirk}}/H$  erhöht werden. Diese Werte können der EnEV-Berechnung für den Jahresheizwärmebedarf entnommen werden.

### 1.2.2.1 Niedrigenergiehaus

Der Begriff des Niedrigenergiehauses (EnEV-Standardhaus) wurde erstmalig Ende der 80er-Jahre eingeführt und wird seither ohne verbindliche Definition unterschiedlich verwendet. Die umfassende Definition des Niedrigenergiehauses erfüllt die momentan gültigen gesetzlichen Mindestnormen und wurde seit 2002 in den »Güte- und Prüfbestimmungen« der Gütegemeinschaft Niedrigenergiehäuser e. V. zugrundegelegt. In diesen Bestimmungen wird für Niedrigenergiehäuser ein um 30 % unter den Anforderungen der EnEV liegender Transmissionswärmeverlust vorgegeben. Weitere Anforderungen betreffen z. B. die Luftdichtheit und die Anlagentechnologie.

**Tab. 1-8:** Referenzprojekte – Niedrigenergiehäuser (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
|  | <b>Niedrigenergiegebäude</b>   |  |
| Büros und Werkstätten in Weidling/A                      | Niedrigenergiegebäude mit Biotop   | Wärmerückgewinnung/Solarthermie/Betonkernaktivierung (BKA)/Wärmepumpe Brunnenwasser), Nachtlüftung, Photovoltaik   |
| Kreishaus Hameln, Architekten: Hascher Jehle, Berlin     | Das Niedrigenergie-Bürogebäude besteht aus einem straßenseitigen Kopfbau und fünf länglichen viergeschossigen Riegelbauten. Um die im Jahreszyklus unterschiedlichen Umgebungsfaktoren zu erfassen, wurden bereits im Entwurfskonzept die Besonnungs- und Verschattungssituationen unter Berücksichtigung der Gebäudeausrichtung, den Tageslichtverhältnissen und der Wärmespeicherkapazität berücksichtigt.   | Die von außen verschatteten Bürobereiche wurden mit einer WS-Verglasung versehen, während in den Bereichen ohne äußeren Sonnenschutz eine Sonnenschutzverglasung eingesetzt wurde. Zwei in Kaskade geschaltete Gas-Brennwertwärmeerzeuger; Bauteilaktivierung (BTA). |
| Stadtwerke Bochum, Architekten: Gatermann+Schossig, Köln | Das 16-geschossige Verwaltungsturm wurde im Niedrigenergiehausstandard konzipiert. Der Primärenergieverbrauch des Gebäudes liegt bei ca. 60 % der Vorgabe nach der Energieeinsparverordnung (EnEV). Zu den innovativen Systemanwendungen zählen u. a.<br><ul style="list-style-type: none"> <li>- der geringe Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung durch hohe Tageslichtanteile</li> <li>- das ökologische Kühl-/Heizkonzept (Drei-Liter-Haus).</li> </ul> | Oberflächennahe Geothermie über 104 der 135 Gründungpfähle. Die gewonnene Energie aus dem Erdreich wird zum Kühlen bzw. Heizen über Change Over Systeme genutzt. Zusätzlich erfolgt eine Raumkühlung über die Nachtkühlung (Thermik).                                |

Der Umgang der Nutzer mit Energie hat in einem Niedrigenergiehaus einen ganz besonderen Stellenwert. Untersuchungen zeigen, dass mit sinkendem Energiebedarf der Einfluss der Nutzer rapide steigt. So wurden in Felduntersuchungen und Studien Verbrauchsunterschiede zwischen dem drei- und vierfachen ermittelt. Dieses ist einerseits auf den Anteil der inneren Wärmequellen (Beleuchtung, Kühl- und Kleingeräte, Kochen, Spülen, Waschen, etc.) zurückzuführen, wie andererseits auch durch das Nutzerverhalten der Personen selbst. Neben dem Einfluss der inneren Wärmequellen ist auch der richtige Umgang mit der Raumlüftung entscheidend. Durch geöffnete Fenster – auch in den Nachtstunden – kann der Heizenergieverbrauch eines Niedrigenergiehauses mehr als verdoppelt werden. Aufgrund des niedrigen Energiebedarfs hat ein leicht verändertes Nutzerverhalten vergleichsweise große Auswirkungen.

Als Niedrigenergiehaus gilt ein Wohngebäude, das durch energetisch günstige Bauform, intensive passive Solarnutzung und gehobenen Dämmstandard mit deutlich weniger Heiz-

energie auskommt als ein konventionell errichtetes Gebäude. Dadurch wird auch die CO<sub>2</sub>-Emission erheblich reduziert und zudem die Wohnbehaglichkeit erhöht. Als Wärmebedarfskennzahl eines Niedrigenergiehauses sind pro Wohnfläche zwischen 30 bis 60 kWh/m<sup>2</sup> anzusetzen (entsprechend drei bis sechs Liter Heizöl pro m<sup>2</sup> und Jahr). In der Wärmebedarfskennzahl liegt auch die Definition des Drei-Liter-Hauses begründet. Der Niedrigenergiehausstandard ist abhängig vom Standort und Haustyp (Einfamilien- oder Mehrfamilienhaus). Ferner durch die Anforderungen an die Bauphysik, wie:

- Fenster: U-Wert  $\leq 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$
- Außenwände: U-Wert  $\leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$
- Dachschrägen beheizter Räume: U-Wert  $\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$
- Kellerdecken, etc.: U-Wert  $\leq 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$

sowie durch eine Kälte- und Wärmebrücken freie Baukonstruktion, raumweise schnell regelbares Niedertemperaturheizsystem und kontrollierte Wohnraumlüftung.

### **Drei-Liter-Haus**

Umgangssprachlich ist unter ein Drei-Liter-Haus ein Gebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von rund drei Litern Heizöl, d. h. von ca. 30 kWh/m<sup>2</sup> Wohnfläche zu verstehen. Dieses entspricht einem Primärenergiebedarf von ca. 60 kWh/(m<sup>2</sup>a), der auch den Wirkungsgrad der Heizungsanlage und den Wärmeanteil zur Warmwasserbereitung beinhaltet. Diese Vorgaben werden durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht, z. B. von der Ausrichtung der Fenster nach Süden, über Effizienz der Heizungsanlage bis hin zur Wärmedämmung mit Stärken von 30 cm. Andererseits kann dieser Wert auch mit einem sehr gut konzipiertem Drei-Liter-Haus und integrierter Holzheizung erreicht werden.

### **Minergiehaus**

Der Begriff »Minergie« wird vorwiegend in der Schweiz verwendet und ist dort als Markenname geschützt. Der Minergiestandard gibt die Mindestanforderungen für verschiedene Gebäudekategorien in Bezug auf die wichtigen Gebäudekomponenten und Energiekenngrößen vor. So darf z. B. ein Wohngebäude als Neubau nur einen Energiebedarf von höchstens 42 kWh/(m<sup>2</sup>a) aufweisen. Der wesentliche Unterschied zu anderen Standards liegt darin begründet, dass der Minergiestandard neben der ökologischen Effizienz auch die Wirtschaftlichkeit der Bauweise mit einbezieht. Mit dem Minergie-P-Standard existiert inzwischen ein weiterführender Standard, der in der Qualität seiner Anforderungen annähernd dem Passivhausstandard in Deutschland entspricht.

### **KfW-40-Haus**

Bei einem KfW-40-Haus darf der Jahresprimärenergiebedarf nicht mehr als 40 kWh/m<sup>2</sup> betragen, wobei der spezifische Transmissionswärmeverlust den in der EnEV angegebenen Höchstwert um mindestens 30 % unterschreiten muss.

### **KfW-60-Haus**

Ein KfW 60-Haus kennzeichnet sich durch einen Jahresprimärenergiebedarf, der höchstens 60 kWh/m<sup>2</sup> betragen darf, wobei der spezifische Transmissionswärmeverlust den in der EnEV

angegebenen Höchstwert um mindestens 30 % unterschreiten muss. Diese Auflage wird durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht.

Mit dem seit dem 1. Oktober 2009 geltenden neuen Energieeinsparverordnung EnEV 2009 ist der Mindeststandard für Neubauten geändert worden, wobei nachfolgend aufgeführte Energiespargebäude definiert wurden:

### **Effizienzhaus 100 (KfW 100) als Mindeststandardhaus**

Sämtliche Neubauten mit Bauantrag nach dem 1. Oktober 2009 müssen die neuen Richtlinien für das Effizienzhaus 100 einhalten. Neben den Richtwerten zum Transmissionswärmeverlust wird als wichtigstes Merkmal der Primärenergiejahresverbrauch pro Quadratmeter beheizte Fläche herangezogen, der 100 Kilowattstunden nicht übersteigen darf. In Bezug auf die fossilen Energieträger entspricht dies ca. zehn Liter Heizöl oder zehn Kubikmeter Erdgas. Aus diesem Grund wird ein Standardhaus auch als Zehn-Liter-Haus bezeichnet. Daraus folgt auch, dass bei einer beheizten Wohnfläche von 100 m<sup>2</sup> im Jahr 1000 Liter Heizöl verbraucht werden.

Die EnEV 2009 wird voraussichtlich in 2012 noch einmal verschärft, wobei der Verbrauch des 100-Standards um weitere 30 % gesenkt werden soll. Zu diesem Zeitpunkt wird das Sieben-Liter-Haus zum Standard, das dann auch nicht mehr gefördert wird. Dieses hat auch zur Folge, dass sich das neu definierte Effizienzhaus KfW 55 dem Passivhaus annähert, und somit auch über die Wintermonate ganz ohne konventionelle Heizung auskommt.

### **KfW-70-Haus**

Das neu definierte KfW-70-Haus entspricht dem alten KfW-Haus 60 und verbraucht nur 70 % der Energie des Standardhauses. Dieses Effizienzhaus unterschreitet den Mindeststandard um 30 % und erfordert einen Primärenergieaufwand von ca. sieben Liter Heizöl. Die Verbrauchswerte sind gleich, ob nun nach der EnEV 2007 als KfW 60 oder nach der EnEV 2009 als KfW 70 mit dem Neubau begonnen wurde.

### **KfW-55-Haus**

Das neu definierte KfW-55-Haus unterschreitet den jeweils gültigen KfW-100-Standard um 45 %. Nach dem aktuellen Stand liegt bei diesem Effizienzhaus der Höchstverbrauch bei einer Heizenergie von 40 kWh/m<sup>2</sup> per anno pro beheizter Nutzungsfläche. Dieses entsprach in der Kennzeichnung der EnEV 2007 dem KfW-40-Haus. Die neue Bezeichnung KfW-55-Haus suggeriert zwar einen höheren Verbrauch, aber dieses entspricht aus dem Grund nicht der Realität, weil in der Definition jetzt nicht mehr der Verbrauch sondern das Verhältnis der Einsparung gegenüber dem Mindeststandard zum Ausdruck kommt. Ein KfW-55-Haus entspricht daher im Wesentlichen dem KfW-40-Haus.

Im Gegensatz zum Neubau muss der Gebäudeeigner, der einen nicht sanierten Altbau kauft und diesen auf ein förderungswürdiges Energieniveau sanieren will, im Vorfeld einen kompetenten Energieberater einschalten, der die verschiedenen Maßnahmen koordiniert und die energetischen Potenziale analysiert. Zudem muss bei den Sanierungsmaßnahmen die bestehende Bausubstanz zusammen mit den neuen Materialien in die Energierechnung

mit einbezogen werden. Damit das Endergebnis in der Praxis auch erreicht wird, müssen zur Ausführung die geeigneten Fachhandwerker beauftragt werden.

### Plusenergie-Haus

Hierbei handelt es sich um eine energetische Weiterentwicklung des Passivhauses. Seitens der Architektur wurden zwischenzeitlich innovative und energieeffiziente Häuser entwickelt und errichtet, die im Betrieb mehr Energie produzieren als diese sie verbrauchen. Derartige Gebäude könnten in der Zukunft als Standardbauweise konzipiert werden.

### Sanierungen zum Energieeffizienzhaus-Standard

Neben den 2010 neu eingeführten Energiestandards wird seitens der KfW weiterhin auch das Erreichen der Effizienzniveaus des Energieeffizienzhauses 85 sowie des Energieeffizienzhauses 100 und des Energieeffizienzhauses 115 gefördert.

Der Gebäudeeigner, der nachweislich nach der Sanierung seiner Immobilie einen dieser Energiestandards erreicht, erhält von der KfW nicht nur günstige Kreditkonditionen, wie Förderdarlehen bis zu 75.000 Euro pro Wohneinheit, vorzeitige Rückzahlung des Darlehens ohne zusätzliche Kosten sowie einen Zuschuss bis zu 2000 Euro für eine qualifizierte Baubegleitung, sondern wird auch noch mit einem zusätzlichen Tilgungszuschuss belohnt, der sich in der Höhe nach dem erreichten Energieeffizienzstandard orientiert.

#### 1.2.2.2 Nullenergiehaus

Ein Nullenergiehaus lässt sich nur mit hohem baulichen und anlagentechnischen Aufwand erstellen. Dieser Gebäudetyp benötigt kein Heizsystem und auch keine externe Energiequelle zur Strombereitstellung. Insofern handelt es sich hierbei um ein energetisch autarkes Gebäude.

**Tab. 1-9:** Referenzprojekte – Nullenergiehäuser (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
|  | <b>Nullenergiegebäude</b>  |  |
| Null-Emissions-Solarfabrik Freiburg                      | Fassadenintegrierte PV-Anlagen 56 kWp,   | BHKW mit Rapsölbetrieb   |
| Nullenergiehaus in Leipzig, Fa. Dr. Sol Solarsystem GmbH | Photovoltaikanlage, 20 m <sup>2</sup> mit 2,2 kWp, ca. 1700 kWh/a  | GW-Wärmepumpe, Solarthermie, 20 m <sup>2</sup> ; 10 m <sup>3</sup> -Jahresspeicher   |
| Nullenergiehaus in Voggental, Pool Architekten, München  | Die Heizenergie der passiven Flächen (Decken/Wände) wird an 11.000 l-Zisterne gespeichert; die Kühlenergie der passiven Flächen (Decken/Wände) wird an 12.500 l-Zisterne gespeichert; Restwärme über Wärmepumpe und Solarthermie mit 12 m <sup>2</sup> und Schichtenspeicher 1050 l; Photovoltaikanlage 36,5 m <sup>2</sup> ; ca. 3500 kWh/a | Prototyp mit Vakuumdämmung VIP-Isolierpaneele und VIP-Kern-dämmung; kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) mit Wärmerückgewinnung |

### 1.2.2.3 Passivenergiehaus

Der Begriff Passivenergiehaus bezeichnet einen Baustandard, der durch verschiedene Bauweisen, -formen und -materialien zu erreichen ist. Um in einem Gebäude ganzjährig ein behagliches Innenklima ohne herkömmliche Heizsysteme zu erzielen, soll im wesentlichen die passive Nutzung aus der Sonneneinstrahlung durch die Fenster sowie die Wärmeabgabe von Geräten und Bewohnern ausreichen. Der Jahresheizwärmebedarf darf dabei nicht über  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$  liegen. Der erforderliche Restwärmebedarf kann durch eine Erwärmung der Zuluft, über das in solchen Gebäuden notwendige Lüftungssystem erfolgen. Passivgebäude benötigen etwa 80 % weniger Heizenergie als konventionelle Neubauten. Um den Gesamtenergiebedarf möglichst gering zu halten, soll auch der sonstige Energiebedarf, z. B. der Strombedarf für Elektrogeräte und Beleuchtung, durch Einsatz effizienter Technik minimiert wird.

Folgende Grundsätze sind zu beachten:

- Sämtliche Bauteile der Außenhülle müssen rundum sehr gut wärmegeklämt werden. Wärmebrücken müssen vermieden werden. Alle nicht lichtdurchlässigen Bauteile der Außenhülle des Hauses sind so zu dämmen, dass sie einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) kleiner als  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$  haben, d. h. pro Grad Temperaturunterschied und Quadratmeter Außenfläche gehen höchstens 0,15 Watt verloren.
- Südorientierung und Verschattungsfreiheit: Günstige Ausrichtung und Verschattungsfreiheit optimieren den »passiven« Solarenergiegewinn und dieser wird zum entscheidenden Wärmelieferanten. Dies gilt insbesondere für freistehende Einfamilienhäuser. Im Geschosswohnungsbau und bei anderen kompakten Gebäudeformen kann der Passivhausstandard auch ohne Südorientierung funktionieren.
- Die Fenster (Verglasung einschließlich der Fensterrahmen) sollen einen U-Wert von  $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$  nicht überschreiten, bei g-Werten um 50 % (g-Wert = Gesamtenergiedurchlassgrad, Anteil der für den Raum verfügbaren Solarenergie).
- Luftdichtigkeit des Gebäudes: Die Leckage durch unkontrollierte Fugen muss beim Test mit Unter- und Überdruck von 50 Pa kleiner als 0,6 Hausvolumen pro Stunde sein.
- Passive Vorerwärmung der Außenluft: Die Außenluft kann über einen Erdreichwärmeübertrager in das Haus geführt werden; selbst an kalten Wintertagen wird die Luft so bis auf eine Temperatur von über  $5^\circ \text{C}$  vorerwärmt. Dies ist eine sinnvolle Option, aber nicht unbedingt bei jedem Passivhaus erforderlich.
- Hochwirksame Rückgewinnung der Wärme aus der Abluft mit einem Gegenstromwärmeübertrager: Die Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung bewirkt in erster Linie eine gute Raumlufthqualität, in zweiter Linie dient sie der Energieeinsparung. Im Passivhaus werden mindestens 75 % der Wärme aus der Abluft über einen Wärmeübertrager der Außenluft wieder zugeführt.
- Erwärmung des Brauchwassers mit teilweise regenerativen Energien: Mit Solarkollektoren oder auch mit Wärmepumpen wird die Energie für die Warmwasserversorgung gewonnen.
- Energiespargeräte für den Haushalt: Kühlschrank, Herd, Tiefkühltruhe, Lampen und Waschmaschine als hocheffiziente Stromspargeräte sind ein unverzichtbarer Bestandteil für ein Passivhaus.

**Tab. 1-10:** Referenzprojekte – Passivenergiehäuser (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt   | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
| »Energion« Passivhaus-Bürogebäude Science Park II, Ulm, Architekten: Stefan Oehler Faigle Archkomm, Bretten     | Das Passivhausbürogebäude mit einer Nutzfläche von 7000 m <sup>2</sup> wurde als solaroptimierter Baukörper in Form eines Wankelmotor Grundrisses errichtet. Das Bauwerk enthält eine auf dem 328 m <sup>2</sup> Flachdach des vollständig umschlossenen Atriums integrierte 15 kWp-Photovoltaikanlage mit amorphen Zellen, die direkt in eine Foliendachbahn einlaminert wurde.  | Baukörper mit thermischer Betonkerntemperierung (BKT); Fernwärme (KWK) mit 120 kW; Kälteversorgung, 40 Erdsonden, 100 m tief, mittlere Tagesleistung 120 kW; RLT-Außenluftkonditionierung über 30 m Erdluftwärmeübertrager (E/LWÜ); KV-Wärmerückgewinnung  |
| Justus-von-Liebig-Schule in Waldshut, Architekten: Harter und Kanzler, Waldkirch und Edgar Lasarzik, Stühlingen | Der Neubau wurde mit einer Nutzungsfläche von 3500 m <sup>2</sup> für Unterrichts-, Arbeits- und Gemeinschaftsräume und für ca. 700 Schüler als das erste Schulgebäude in Deutschland mit einer zertifizierten Passivhaustechnologie errichtet. Mit dem an der Schule umgesetzten Energiekonzept reduziert sich der Energiebedarf der Schule um ca. 80 %. Durch die Nutzung der Speichermassen und dem hohen Dämmstandard der Außenhülle sowie dem Einsatz einer kontrollierten Lüftung konnte der Heizwärmebedarf auf unter 15 kWh/(m <sup>2</sup> a) gesenkt werden. Zudem wird durch den effektiven Sonnenschutz eine Überhitzung des Gebäudes verhindert. Nachts öffnen sich die Fenster damit das Gebäude durchflutet und die Speichermassen abkühlt wird. | Die RLT-Zentralen mit einer Wärmerückgewinnungsanlage mit einem Wirkungsgrad von 80 bis 85 % konzipiert. Ca. 32.000 m <sup>3</sup> /h Außenluft werden über Erdkanäle vorkonditioniert. Innerhalb des Foyer-Glasdaches wurde eine Photovoltaikanlage (101 m <sup>2</sup> Modulfläche) und 4,5 kWp integriert. Eine zweite PV-Anlage (150 m <sup>2</sup> Modulfläche) und 15 kWp wurde auf dem Flachdach installiert. |
| Schiestl-Schutzhütte am Hochschwab, Steiermark, Treberspurg & Partner Architekten, Wien                         | Passivhaustechnologie auf 2154 m ü. N. N. 62 m <sup>2</sup> fassadenintegrierte Solarthermiekollektoren; 68 m <sup>2</sup> Photovoltaikmodule an der Terrassenbrüstung; 5,6 m <sup>2</sup> Photovoltaikmodule an den Balkontür-oberlichtern.  | Pflanzenöl-BHKW mit Rapsöl   |

Passivenergiehäuser entsprechen heute dem technischen Standard des energieeffizienten Bauens. In Deutschland wurden bisher umfangreiche Passivenergiehäuser in Form von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Schulen, Kindergärten, Bürogebäuden und Produktionsstätten, etc. errichtet.



**Tab. 1-11:** Referenzprojekte – Biosphärengebäude (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten  |
|--|---|---|
| Biohaus Bürogebäude Paderborn  | Das Biosphärengebäude und Schulungszentrum wurde mit 13 unterschiedlichen Photovoltaiksystemen ausgerüstet.<br>Die Building Integrated Photovoltaic (BIPV) wurde als sichtbare, aber unauffällige Integration der Photovoltaikmodule in die Gebäudehülle integriert.<br>Die »Hybridfassade« zeichnet sich als Besonderheit mit den Elementen zur Belüftung, Klimatisierung und Tageslichtsteuerung aus. | Zusammen mit dem auf dem Dach installierten »Sonnensegel mit Nachführung« wurde eine Modulfläche von 16 m <sup>2</sup> , PV-Leistung über 15 kWp und zusätzlich eine Absorberfläche (CPC-Vakuumröhren) mit 5 m <sup>2</sup> integriert. |
| Biosphärenhaus in Fischbach bei Dahn (Südwestpfalz), BFM Architekten, Köln | Der mehrgeschossige Turmbau des Biosphärenhauses als Informationszentrum für das grenzüberschreitende Biosphärenreservat Pfälzerwald/Nordvogesen beherbergt Ausstellung, Veranstaltungsräume und ein Restaurant.  | Grundwasser-Wärmepumpe, 120.000 Liter-erdgedeckter Wasserspeicher.<br>250 m <sup>2</sup> -Solarthermieranlage; Gebäudeleittechnik   |

### 1.2.3 Energieoptimierte Gebäudehülle

Die Gebäudehüllfläche besteht in Bezug auf den Wärmeschutz aus der Summe der wärmeübertragenden Umfassungsflächen eines Gebäudes (Außenwände, Fenster, an Außenluft grenzende Decken und Dächer, an Erdreich grenzende Fußböden und Wände beheizter Räume, an unbeheizte Räume grenzende Bauteile wie Kellerdecken oder Decken gegen unbeheizten Dachraum).

Die Anforderungen der EnEV 2007 bietet dem Bauherrn genauso wie die EnEV 2009 zumindest theoretisch einen Entscheidungsspielraum: Verbesserung der Wärmedämmung und/oder der Anlagentechnologie. Für die konkrete Entscheidung gibt es jedoch eine eindeutige Regel: Das Gebäude und seine Hülle haben eine lange Lebensdauer (Life-Cycle) und einen dementsprechend langfristigen Energieeinspareffekt. Die zu erwartende Einsparung durch Wärmedämmmaßnahmen liegt im Durchschnitt bei 50 %. Die Anlagentechnologie zur Beheizung eines Gebäudes unterliegt einer schnelleren Abnutzung und damit kürzeren Erneuerungszyklen. Der Einspareffekt der Anlagentechnologie ist aus diesem Grund auch auf einen kürzeren Zeitraum zu berechnen. Zudem sind Energieeinsparmaßnahmen im Gebäudebestand insbesondere dann wirtschaftlich, wenn die zusätzliche Wärmedämmung mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen und Modernisierungen gekoppelt wird.

Je höher der angestrebte wärmetechnische Standard des Gebäudes wird, umso stärker wirken sich aber auch vorhandene bautechnische Schwachstellen aus. Bei einer energetischen Sanierung von Altbauten ist daher in besonderem Maße eine ganzheitliche Betrachtung

tung erforderlich, die nicht nur die Dämmung einzelner Bauteile, sondern auch die Vermeidung von Wärmebrücken sowie die Luft- und Winddichtheit einschließt. Aus diesem Grund werden die meisten Bauherren einer Minimierung der Transmissionswärmeverluste durch den Einsatz einer optimalen Wärmedämmung der Gebäudehülle sowie der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste den Vorrang geben und erst im zweiten Schritt die Anlagentechnologie optimieren. Die dynamischen Einflüsse der Gebäudehülle und Bauweise lassen sich über die Gebäudeautomation individuell abstimmen und führen zu einer erhöhten, gefühlten Behaglichkeit innerhalb des Gebäudes bzw. innerhalb der Funktionsbereiche.

Durch Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Winter wird ein hygienisches Raumklima sowie dauerhafter Schutz der Baukonstruktion gegen klimabedingte Feuchteinwirkungen sichergestellt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Räume entsprechend ihrer Nutzung ausreichend beheizt und belüftet werden.

Durch Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz im Sommer wird eine überhöhte Erwärmung der Aufenthaltsräume infolge der sommerlichen Wärmeentwicklung, bei gleichzeitiger Einhaltung der Behaglichkeitskriterien, ohne Einsatz einer Kühlung erreicht.

Ein guter Wärmeschutz hat bei Gebäuden entscheidende Bedeutung für

- die Gesundheit der Bewohner
- den Schutz der Baukonstruktion
- einen geringen Energieverbrauch bei Heizung und Kühlung
- die Herstellungs- und Bewirtschaftungskosten.

### 1.2.3.1 Energieoptimiertes Bauen (EnOB)

Die Errichtung von »Gebäuden der Zukunft« ist ein zentrales Anliegen für das energieoptimierte Bauen (EnOB) und bezieht sich auf Neubauten gleichermaßen wie auf den Gebäudebestand. In Teilbereichen geht es hier um die Entwicklung neuer Materialien, z. B. Vakuumisolierglas, Vakuumisulationspaneele, Phasenwechselmaterialien im Innenputz oder in Gipskartonplatten, Komponenten, wie Elementfassaden mit integrierter HKK-Technologie, extreme Niedertemperatur Heiz- und Kühlflächen und Systeme unter ganzheitlicher Betrachtung der Gebäudehülle und Gebäudetechnologie bis hin zur Durchführung ambitionierter Demonstrationsgebäude – alles mit dem Ziel die Energieeffizienz und den Nutzerkomfort von Nichtwohngebäuden zu steigern.

Im Teilbereich der EnBau (Energieoptimierte Neubauten) wurden bis Ende 2008 über zwanzig Büro-, Verwaltungs- und Produktionsgebäude mit minimalem Energiebedarf geplant, gebaut und im Betrieb evaluiert. Der Primärenergieverbrauch soll hierbei  $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$  nicht übersteigen, wobei die Arbeitsmittel wie Computer nicht berücksichtigt werden.

Eine sehr wichtige Erfahrung aus diesen Demonstrationsobjekten war es, dass bei der Qualitätssicherung ein Energiekonzept während der Planungs- und Bauphase die Voraussetzung zur Erreichung des Ziels ist. Der entscheidende Erfolg liegt jedoch in der Evaluation und Optimierung des Gebäudebetriebs während der ersten Betriebsjahre. Aus diesem Grund wird in den letzten Jahren die Thematik der energetischen Betriebsoptimierung (EnBop) von Nicht-Wohngebäuden intensiviert.

### 1.2.3.2 Solararchitektur

Die Solararchitektur spart Licht und Wärme. Dazu gehören Lichtlenksysteme, Verschattungselemente und eine Sensorik, die die Helligkeit an kritischen Punkten wie Arbeitsplätzen erfasst. Eine optimierte gemeinsame Steuerung kann den Stromverbrauch für Licht um 25 bis 75 % verringern. Die transparente Wärmedämmung (TWD) ist lichtdurchlässig und eine bessere Nutzung des Tageslichtes ist auch mit einer transparenten Wärmedämmung zu erreichen. Im Gegensatz zu den gegenwärtigen minimierenden Wärmedämmplatten durchdringt die Solarstrahlung die transparenten Wärmedämmungen und wird erst an der dahinter liegenden dunklen Wandoberfläche in Wärme umgewandelt. Sie dringt in das Mauerwerk ein und erreicht zeitverzögert den dahinter liegenden Raum. Wenn auf das Mauerwerk mit dunkler Oberfläche verzichtet wird, erhält dieser Raum Tageslicht, wird aber auch gleichzeitig erwärmt. Die gute Strahlungsdurchlässigkeit der transparenten Wärmedämmung in einer Richtung, verbunden mit der ausgezeichneten Wärmedämmung vom Gebäudeinneren nach außen, kann im Hochsommer zu Überhitzungen führen.

### 1.2.3.3 Green-Building-Architektur

Bei den Green-Building-Objekten handelt es sich um Gebäude jeglicher Nutzungskategorie, bei denen bewusst mit den natürlichen Ressourcen umgegangen wird. Dies betrifft einen möglichst geringen Eingriff in die Natur, umweltfreundliche und gesundheitlich unbedenkliche Materialien, den thermischen und visuellen Komfort, kommunikationsfördernde Raumlösungen, einen geringen Energiebedarf, den Einsatz von regenerativen Energien, die Qualität und Langlebigkeit der Konstruktion sowie einen wirtschaftlichen Betrieb. Um dieses Ziel zu erreichen ist ein ganzheitlicher, gewerkeübergreifender Ansatz erforderlich, der einen möglichst schnittstellenfreien Entwurf und Ausführung der Architektur, Tragwerk, Fassade, Bauphysik, Gebäutetechnik und Energieeinsatz unter Berücksichtigung der Nutzung und des Raumklimas erfordert. Zu der Konzeption dieser Gebäude müssen bereits in der Vorplanungsphase von Green Buildings integrale Systemlösungen, moderne Planungs- und Simulationswerkzeuge eingesetzt werden. Diese Planungswerkzeuge ermöglichen neue Konzeptionen, da mithilfe dieser der Simulationen über die Thermik, Strömung und das energetische Verhalten bereits während der Planungsphase detaillierte Berechnungen erstellt werden können. Insofern können im Vorfeld der erreichbare Komfort und die Energieeffizienz berechnet werden und neue Konzeptionen oder neue Produkte entwickelt und eingesetzt werden, wodurch zudem auch eine größtmögliche Sicherheit hinsichtlich der Investitionen und der Wirtschaftlichkeit erreicht wird.

### 1.2.3.4 LowEx-Gebäude

Innerhalb der LowEx-Gebäude werden zur Wärmeerzeugung keine Verbrennungsprozesse benötigt, weil bei diesen Gebäuden für die Gebäudehülle U-Werte für Dach und Wände von unter  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$  und für Fenster unter  $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$  eingehalten werden. Gute LowEx-Gebäude stellen ein gutes Raumklima (Komfortklasse A) mit möglichst geringem Energieaufwand (Kühlenergieverbrauch unter  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$  und einer hohen Effizienz (Jahresarbeitszahl für das Kühlen  $> 10$ ) bereit. Die Temperierung von Räumen auf ein komfortables

Niveau lässt sich nicht allein durch konventionelle Systeme und Basis einer Verbrennung mit fossilen Energieträgern erreichen. Die Anwendungen der modernen Technologien arbeiten mit sehr geringen Temperaturdifferenzen von maximal 9 Kelvin zwischen dem Heiz-/Kühlmedium und der zu erreichenden Raumtemperatur. Insofern ergeben sich für die Raumheizung Vorlauftemperaturen von maximal 30 °C und für klimatisierte Gebäude ein Kaltwassertemperatur von mindestens 12 °C. Mit diesen Temperaturen werden sehr gute Leistungsziffern erreicht, wobei hier auch die regenerativen Energiequellen besser genutzt werden können. Insofern kann die Solarthermie zum Heizen oder die natürliche Kühle des Erdreichs für Büros genutzt werden.

Derzeit erfolgt die Wärmeerzeugung für die Raumheizung noch überwiegend durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Die Wärme wird hierbei mit hochwertiger Energie mit einem sehr hohen Exergieanteil erzeugt. Hierbei handelt es sich also um den Exergieanteil (d. h. um die mechanische Arbeitsfähigkeit), der in jede andere Energieform umgewandelt werden kann, also zur rationellen Energieanwendung.

Ein Energiestrom ( $Q$ ) besteht aus einem Exergieanteil ( $E$ ) und einem Anergieanteil ( $A$ ).

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} \rightarrow Q = E + A$$

Der Einsatz einer fossilen Wärmeerzeugung bedeutet eine Exergie- bzw. Brennstoffverschwendung. Bei der Anergie handelt es sich um den niederwertigen, nicht weiter umwandelbaren Anteil des Energiestroms (Energie in Form von Wärme auf Umgebungsniveau), z. B. um die Wärme aus der Prozesstechnik oder die Abwasser-, Druckluft-, Erdreich-, Grundwasser- bzw. Luftwärme.

Durch Anhebung auf ein höheres Energieniveau kann mit einem kleinen Exergieanteil kann ein großer Anergieanteil veredelt und nutzbar gemacht werden.

Die effizientesten Systeme zum Heizen und Kühlen ergeben sich durch die Kombination von thermoaktiven Bauteilen (TABs) und Geothermie durch Nutzung der konstanten Erdreichtemperatur von ca. 10 °C in Bereichen von 15 m unter Terrain.

Die derzeit bestehenden Kälteanlagen erfordern zum Betrieb einen enormen elektrischen Strombedarf. Hier kann durch ein kombiniertes Kühlen und Heizen, natürliche Kühlung (Freies Kühlpotenzial) oder eine natürliche Kühlung des Erdreichs und effiziente Wärmerückgewinnung der elektrische Strombedarf eines Gesamtsystems erheblich reduziert werden.

## 1.2.4 Bauphysik

Zur ökologisch und ökonomisch sinnvollen Begrenzung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes ist es unerlässlich, die Wärmedämmung des Gebäudes und die Planung der Technischen Gebäudetechnik (TGA) rechtzeitig und fachkundig durchzuführen. Auf dieser Basis lassen sich die Gesamtkosten minimieren und Energieeffizienz steigern.

Die Massivbauweise zeichnet sich durch hohe thermische Speicherkapazität aus, was gleichbedeutend ist mit Vergleichmäßigung von Temperaturschwankungen (Temperaturamplituden). Dadurch können kürzere sommerliche Schlechtwetterperioden ohne Heizung überbrückt werden und im Winter während der Nacht die Heizung ausgeschaltet bleiben, ohne dass eine nennenswerte Abkühlung erfolgt. Da sich die Massivbauweise auch in der

Übergangszeit positiv auf den Heizwärmebedarf auswirkt, ist in der Jahresenergiebilanz die Massivbauweise gegenüber der Leichtbauweise deutlich im Vorteil.

#### 1.2.4.1 Wärmeschutz und Energieeinsparung nach DIN 4108

Die DIN 4108 legt die Mindestanforderungen an die Wärmedämmung von Bauteilen in der Gebäudehülle fest und gibt wärmeschutztechnische Hinweise für die Planung und Ausführung von Aufenthaltsräumen in Hochbauten. Der Wärmeschutz und die Energieeinsparung umfassen alle Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeübertragung durch die Umfassungsflächen eines Gebäudes und durch die Trennflächen von Räumen unterschiedlicher Temperaturen. Als Normungsbasis der DIN 4108 gelten die Teile 1 bis 10. Anhand von konstruktiven Fallbeispielen können Planer und Energieberater die Investitionskosten abschätzen und ohne viel Aufwand die Wärmeverluste der einzelnen Bauteile ermitteln und damit die effektivste Maßnahme vorschlagen. In der Praxis sollten insbesondere die nachfolgend aufgeführten Kriterien und Konstruktionsdetails beachtet werden:

- Bauphysikalische Grundlagen
- Außenbauteilkonstruktionen
- Wärmedämmverbundsystem
- Wirtschaftlichkeit der Außendämmung
- Raumklima in außenseitig gedämmten Häuser
- Schäden an außenseitig gedämmten Außenwänden
- Schäden an Außenwänden mit Kerndämmung oder Innendämmung
- Wärmebrücken.

#### 1.2.4.2 Innovative Wärmedämmungen

##### Transparente Wärmedämmung (TWD)

Lichtdurchlässige Gebäudeaußendämmung führt während der Heizperiode für Südfassaden immer, für Ost-/Westfassaden fast immer und für Nordfassaden in den Übergangsmonaten zu einer positiven Wärmebilanz. Die auf die Außenhaut der transparenten Wärmedämmung auftreffende Strahlung durchsetzt die TWD-Schicht entsprechend ihrem, von Schichtdicke und Material abhängigen Energiedurchlassgrad ( $g_{\text{eff}}$ ) und erreicht den schwarzen Absorber, wobei die Lichttransmission unmittelbar oder durch Mehrfachreflexion als Streulicht erfolgt.

Im Absorber wird die hier noch ankommende Strahlung in Wärme umgewandelt. Bei ausreichend hoher Differenz zwischen Absorber- und Innenraumtemperatur wird das TWD-Bau/Wandelement zum Wärmeerzeuger. Andernfalls wirkt die TWD-Schicht als zusätzliche Dämmung.

##### Opake Wärmedämmung

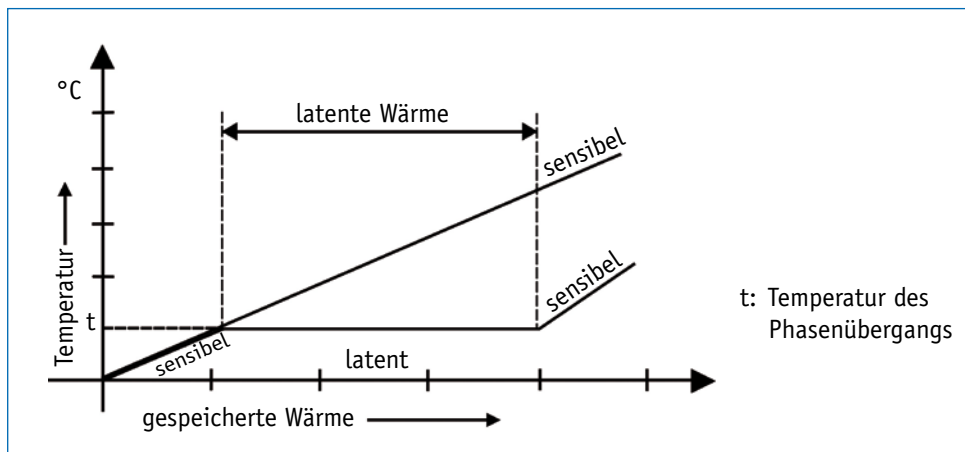
Eine weitere Möglichkeit der Wärmedämmung besteht in der Verwendung einer opaken Wärmedämmung, d. h. in der Dämmung mittels lichtundurchlässiger Stoffe mit sehr großem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und somit auch mit großer Porosität. Opake Wärmedämmung mindert über die Wintermonate den Wärme(verlust)strom von innen nach außen und während der Sommermonate von außen nach innen. Eine passive Sonnenenergienutzung durch Hauswände mit opaker Wärmedämmung ist jedoch nicht möglich.

### 1.2.4.3 Thermochemische Speicherung

#### Phase Change Material (PCM)

Um Primärenergie zu sparen bedeutet eine Energiespeicherung, egal ob kurz- oder langfristig, sicher einen zukünftigen Weg der Gebäudeklimatisierung. Voraussetzung für eine erfolgreiche Nutzung ist allerdings die intensive Auseinandersetzung mit den besonderen dynamischen und thermodynamischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. Der Einsatz der Phasenwechselmaterialien dient auch zur passiven Klimatisierung.

Neben dem Vorteil der an die Anwendung anpassbaren Temperatur kommt ein weiterer Vorzug zum Tragen. PCM lassen sich in verkapselter Form in Putze und sonstige Bauwerksteile integrieren, sodass der Einsatz in der Gebäudeklimatisierung ohne Transportverluste möglich wird. Hinzu kommt das Problem der Entladung. Wenn in den Nachtstunden keine ausreichende Kühlung in Form von großen Luftvolumenströmen vorhanden ist, dann funktioniert auch das beste PCM nicht. Hier bleibt daher nur die Kombination mit der aktiven Kältetechnik. Diese Kombinationen sind aber nur dann sinnvoll, wenn auch die dynamischen Vorgänge, insbesondere die Verlustwärmeströme, detailliert betrachtet werden.



**Abb. 1-4:** Wärmespeicherung durch sensible und latente Wärme (Quelle: IB-THEISS, München)

Die Phase Change Materials (PCM, Phasenwechselmaterialien) nehmen die für den Aggregatzustandswechsel erforderliche thermische Energie aus der Raumluft auf, speichern sie verlustfrei und geben sie bei Bedarf wieder ab (Latentwärmespeicher). Dieser Vorgang läuft permanent umkehrbar ab. Als Materialien können beispielsweise Salzhydrate oder Salzhydratmischungen verwendet werden, die auch zunehmend zum Ersatz bzw. zur Reduzierung von Klimaanlage dienen. Durch den Einsatz von Phase Change Material kann die Raumlufttemperatur auf ca. 25 °C passiv klimatisiert werden. Wenn die Raumtemperaturen unter 22 °C absinken, beginnt der Kristallisationsprozess und die aufgenommene Energie wird wieder an die Umgebungsluft abgegeben.

Mit der Klassifizierung RAL-GZ 896 wurde von der RAL-Gütegemeinschaft eine neue Kennzeichnung für Phase Change Materials herausgegeben. Im Bauwesen wird dieser Effekt dazu verwendet, ohne Energiezufuhr heizen oder kühlen zu können. Das neue RAL-Gütezeichen

PCM steht für hohe Qualität und lange Haltbarkeit der PCM-Materialien. Bisher gab es keine reproduzierbaren Verfahren zur Beurteilung der Qualität von Phasenwechselmaterialien. Aus diesem Grund liegen den Güte- und Prüfbestimmungen umfangreiche Forschungen zur Reproduzierbarkeit der Messmethoden der PCM-Qualität zu Grunde. Die Produkte für den Baubereich müssen über Jahrzehnte eine gleichbleibende Qualität garantieren.

### **Thermoaktive Decken- und Wandelemente aus PCM**

Im Gebäudebereich gewinnen zunehmend die Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterialien an Bedeutung. Bei Neubauprojekten oder Modernisierungen bzw. Sanierungsmaßnahmen werden diese Materialien häufig in Wänden und Decken verarbeitet, um die überschüssige Wärme zu speichern und erst dann wieder abzugeben, wenn der Raum auszukühlen beginnt. Als organische Materialien kommen hier z. B. Paraffine zum Einsatz. Weil aber die derzeitigen Phase Change Materialien nur für bestimmte Nutzungen vorgesehen sind, bei denen Wärme auf relativ geringem Temperaturniveau gespeichert wird, gehen die Entwicklungsbestrebungen in Richtung einer Leistungssteigerung der Phase Change Materials, die mit neuen Zusatzbaustoffen zu erreichen ist.

Bei den PCM-Elementen wird der Phasenwechsel ausgenutzt, um einen hohen Anteil von Wärme- und Kälteenergie zu speichern und je nach Bedarf wieder abzugeben. Das Prinzip beruht darauf, dass das PCM-Element unter Einwirkung der Wärmelasten während der Tageszeiten geschmolzen wird und im Umkehrschluss durch Abkühlung mittels des eingelagerten Rohrsystems im Verlauf der Nachtzeiten wieder erstarrt wird. Aufgrund der Energiezwischenspeicherung innerhalb des PCM-Elements wird so innerhalb des Gebäudes die Temperaturamplitude gedämpft. Neben der sensiblen Wärme des Phase Change Materials wird hier auch die latente Wärme genutzt, die während der Aufschmelzphase gespeichert und während der Erstarrungsphase wieder freigesetzt wird. Die beiden Zustandsgrößen verlaufen hierbei bei einer nahezu konstanten Temperatur.

Der Vorteil gegenüber konventionellen Speichermaterialien liegt daher in der thermischen Speicherkapazität, die hier um ein Vielfaches höher ist. Ein Nachteil ist aber darin zu sehen, dass das Paraffin eine erhöhte Brennbarkeit aufweist. Um einen Austritt von flüssigem Paraffin zu unterbinden, müssten gleichzeitig auch erhöhte Anforderungen an den Brandschutz gestellt werden. Um dennoch den thermischen Effekt des Paraffins zu nutzen und gleichzeitig die brandschutztechnischen Belange einzuhalten, wurde ein Verfahren zur Mikroverkapselung des PCM-Elements entwickelt. Hierbei wird das Material so hergestellt, dass es einen Schmelzbereich bei Raumtemperatur aufweist. Das PCM auf Paraffinbasis wird nun in mikrogekapselter Form in eine Gipschicht, die feuchtehemmend wirkt, integriert.

### **Vakuumdämmung**

Die Vakuumdämmsysteme stellen eine relativ neue Entwicklung in der Dämmstoffbranche dar. Bei der Verwendung dieser neuen Dämmsysteme können erhebliche Einsparungen erzielt werden. Wände, Böden oder Decken im Querschnitt wesentlich dünner ausgeführt werden und infolge dessen auch die Raumnutzungsflächen bzw. Raumkubaturen erhöht werden. Die Entwicklung der Wärmedämmstoffe erreicht mit der Vakuumdämmung eine Stufe, die eine Zehnerpotenz über dem Niveau der konventionellen Dämmstoffe liegt. Bei Vakuum-

paneelen, die bis zu 2 cm dünn sein können, ist die Wärmeleitfähigkeit zehnmal geringer als bei den konventionellen Dämmsystemen. Damit ermöglichen die luftleeren Platten z. B. bei Passivhäusern konstruktiv genauso dünne Außenwände wie bei durchschnittlich gedämmten Häusern.

### Vakuumisolationspaneele

Die Funktionsweise eines Vakuumisolationspaneels (VIP) basiert auf dem Grundprinzip einer doppelwandigen Thermoskanne, bei der das wärmeleitende Medium Luft innerhalb des Hohlraums evakuiert wurde. Als Folge dessen kommt es zu einer deutlichen Reduktion des Wärmetransports durch Konvektion und Wärmeleitung. Die Vakuumisolationspaneele bestehen prinzipiell aus einem offenporigen Kernmaterial (z. B. hitzebeständige Kieselsäure) mit niedrigem Innendruck und einer gasdichten Hülle. Der Vorteil der Vakuumisolationspaneele liegt in der geringen Wärmeleitfähigkeit begründet, die im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmstoffen um etwa den Faktor 5 bis 10 unterschritten wird. Die Wärmeübertragung erfolgt bei Normaldruck aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Innerhalb der Wärmedämmstoffe sind die Beiträge der Wärmeleitung sowohl des Festkörpergerüsts als auch des Gases und der Wärmestrahlung zur Wärmeübertragung gering. Die Wärmeübertragung durch Konvektion des im Dämmstoff enthaltenen Gases, in der Regel Luft, leistet hier den größten Anteil.

Ein Nachteil der Vakuumisolationspaneele liegt in ihrer empfindlichen luftdichten Hülle. Wird diese beschädigt, verlieren die Paneele ihre ausgezeichneten Wärmedämmeigenschaften.

**Tab. 1-12:** Referenzprojekte – Vakuumdämmung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
| Ensemble Capricorn<br>Haus in Düsseldorf,<br>Architekten:<br>Gatermann + Schossig,<br>Köln | Das siebengeschossige Büro- und Gewerbegebäude der Capricorn-Gruppe wurde auf einem mäandrierenden Grundriss als Niedrigenergie-Bürogebäude konzipiert das u. a. auch die Anforderungen an ein »Low-Energiegebäude« erfüllt. Die Sandwich-Fassadenpaneele des Capricorn Hauses in Düsseldorf wurden mit Vakuumisolationspaneelen von Vaku-Isotherm ausgestattet. Die Tageslichtlenkung in tiefere Raumzonen erfolgt über feststehende, in das Oberlicht integrierte Retrolamellen. | Aufgrund der fassadenintegrierten RLT-Modultechnologie ließ sich die Betonkernaktivierung problemlos in den Decken einbinden. Die Energieversorgung für den Wärme- und Kühlbedarf erfolgt in Kombination mit einer Grundwasserbrunnenanlage und zweier Wärmepumpen über die geothermische Energiequelle. |
| Das »O2-Village«, Studentenstadt-Freimann,<br>80805 München                                | Vakuumisolierung der Dachflächen wurde von der Vaku-Isotherm GmbH  | Kleinsiedlung aus modernen Wohnwürfeln für Studierende   |



## Fortsetzung Tab. 1-12

| Projekt   | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
| Paul-Wunderlich-Haus (Dienstleistungs- und Verwaltungszentrum) in Eberswalde, Landkreis Barnim, Architekt: GAP Gesellschaft für Architektur & Projektmanagement | Ensemble aus vier Gebäuden mit 22.218 m <sup>2</sup> Bruttogrundfläche (BGF), inkl. der Atrien (Integration klimatischer Pufferzonen). Im Bereich zwischen außenliegenden Sonnenschutz und Fenstersturz wurden zur Unterbindung von Wärmebrücken Vakuumisolationspaneele (VIP) eingesetzt. Die Deckenelemente wurden mit integriertem Phasenwechselmaterial (PCM) bestückt. | Primärenergiebedarf 88 kWh/m <sup>2</sup> -NGF.<br>Bautelaktivierung (BTA) mit Heizen/Kühlen. Ca. 800 Gründungspfähle (9 m tief) wurden 593 mit Absorberregister ausgerüstet. Gebäudeleittechnik |

**Schaltbare Wärmedämmung (SWD)**

Die schaltbare Wärmedämmung (SWD) befindet sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. SWD-Paneele können je nach Bedarf in einen hochdämmenden oder wärmeleitenden Zustand geschaltet werden. Sie bestehen aus einem evakuierten luftdicht abgeschlossenen, verpressten Glasfaserkern der mit einem gasdichten Edelstahlblech umhüllt ist. Im Zentrum des Paneels befindet sich eine elektrisch aufheizbare Kapsel mit Metallhydridgitter. Eine elektrische Leistung von 5 Watt reicht aus, um die Kapsel auf ca. 300 °C aufzuheizen, sodass der zuvor gebundene Wasserstoff freigesetzt wird. Dieser Wasserstoff diffundiert innerhalb von 15 bis 30 Minuten durch den gesamten Glasfaserkern, erhöht den Druck von weniger als 0,01 mbar auf etwa 50 mbar und infolgedessen die Wärmeleitfähigkeit. Wenn sich die Kapsel bei abgeschalteter Heizung wieder auf die Umgebungstemperatur abkühlt, wird der Wasserstoff resorbiert. Dieser physikalische Prozess, bei dem der R-Wert der SWD-Testpaneele um das 40-fache variiert werden kann, ist mindestens einige tausendmal wiederholbar. Die evakuierbaren Materialien mit vergleichsweise grober Porenstruktur verändern bereits bei kleinen Druckschwankungen ihre Wärmeleitfähigkeit. Diese physikalische Eigenschaft lässt sich nutzen, um Fassadenelemente herzustellen, die je nach Bedarf von einem wärmeleitenden Zustand (U-Wert ca. 10 W/(m<sup>2</sup>K)) in einen hochgedämmten Zustand mit einem U-Wert von ca. 0,3 W/(m<sup>2</sup>K) geschaltet werden können.

Bei der Auswahl der Rahmenkonstruktion muss jedoch berücksichtigt werden, dass die thermisch bedingte Ausdehnung am Rand bis zu 1 cm betragen kann. Der Vorteil der SWD-Paneele gegenüber einer transparenten Wärmedämmung (TWD) besteht darin, dass kein mechanischer Sonnenschutz benötigt wird.

**1.2.5 Passive Sonnennutzung**

Die Nutzung der Sonnenenergie kann prinzipiell aktiv oder passiv erfolgen.

Die passive Sonnenenergienutzung kann mit oder ohne Einwirken von Personen verbunden sein. Passiv ohne Mitwirken der Personen wird die solare Strahlungsenergie z. B. durch Absorption in der Atmosphäre oder der Erdoberfläche in Umgebungswärme umgewandelt oder durch photochemische/photobiologische Energiewandlung in Biomasse. Die passive Sonnen-

energienutzung unter Mitwirkung der Personen vollzieht sich z. B. in der solaren Hausenergieversorgung durch die solare Orientierung des Gebäudes und den Wärmegewinn durch die Fenster oder transparente Wärmedämmung. Bei der passiven Sonnenenergienutzung kann es sich aber auch um eine solare Gebäudekühlung handeln.

Das Prinzip der passiven Kühlung besteht darin, die Wärme in der Gebäudemasse im Tageszyklus mit möglichst geringem Energieaufwand abzuführen. Erfolgt dies nicht, würde sich das Gebäude bei weiterem Wärmeeintrag aufgrund der fehlenden Pufferkapazität mehr erwärmen, was zu einer Überhitzung in den Räumen und damit zu einer nicht akzeptablen wärmephysiologischen Unbehaglichkeit der Nutzer führt. Als natürliche Wärmesenken können genutzt werden:

- das Erdreich bzw. das Grundwasser (Betonkernaktivierung, gleichzeitig oder zeitversetzt)
- die Außenluft, wenn die Temperatur geringer als die Innenraumtemperatur ist (Nachtlüftung, zeitversetzt).

### **1.2.5.1 Nutzung der Sonnenenergie ohne technische Umwandlungsprozesse**

#### **Strahlungskühlung**

Die ausschließliche Anwendung passiver und hybrider Kühlmaßnahmen setzt eine systematische und konsequente Detailoptimierung des Gebäudekonzeptes voraus. Hierbei steht an erster Stelle die konsequente Vermeidung externer und interner Wärmelasten, sodass der Restkühlbedarf des Gebäudes möglichst minimiert wird und mittels passiver und hybrider Konzepte gedeckt werden kann. Ausschlaggebend ist, dass bereits während der Planungsphase das Zusammenspiel von Architekt (Gebäudeentwurf), Fachplanern (Gebäudetechnik) und gegebenenfalls einem neutralen Berater, der mit der konzeptionellen Erstellung des Energiekonzeptes betraut ist, funktioniert. Nur unter dieser Voraussetzung kann es gelingen, das Ziel eines energieoptimierten und zukunftsfähigen Gebäudekonzeptes zu erreichen.

Die Strahlungskühlung basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass ein warmer Körper gegenüber einem kälteren Körper Energie in Form von Strahlung abgibt und somit abkühlt. Das Abstrahlen von thermischer Strahlungsenergie geschieht prinzipiell bei jedem Körper zu jeder Tages- und Nachtzeit nach dem Boltzmannschen Strahlungsgesetz. Im Sommer führt dies jedoch nur nachts zu einer Kühlungswirkung. Tagsüber wird dieser Effekt von der erhöhten Sonneneinstrahlung überlagert und führt in der Gesamtstrahlungsbilanz zur Gebäudeaufheizung. Die Systeme der Strahlungskühlung werden in direkte oder passive Strahlungskühlung sowie in hybride Strahlungskühlung unterteilt.

#### **Direkte (passive) Strahlungskühlung**

Ziel der passiven Strahlungskühlung ist die »selbstständige« Abkühlung des Gebäudes durch Wärmeabgabe an die Umgebung. Die bautechnisch am wenigsten aufwendige Variante besteht bei der passiven Strahlungskühlung darin, das Dach weiß zu streichen. Hierdurch wird zunächst eine mögliche Aufheizung durch Sonneneinstrahlung tagsüber minimiert, zugleich wird durch den Anstrich eine verbesserte Abstrahlung zur nächtlichen Abkühlung erreicht. Eine weitere Optimierung dieses Prinzips verwendet bewegliche Isolationssysteme anstatt

der üblichen festen Dachisolierung. Tagsüber wird die Isolierung über das Dach gefahren, um das Aufheizen der Dachmasse infolge der Sonneneinstrahlung zu verhindern. Nachts wird die Isolation wiederum entfernt, damit die Dachmasse und darunter liegende Räume auskühlen können. Im Winter kann dieser Effekt umgekehrt genutzt werden (tagsüber Aufheizen des Daches durch fehlende Isolierung bzw. nachts Speichern der gewonnen Wärme durch erneutes Anbringen der Isolierung). Um diese Art der Strahlungskühlung zu realisieren, müssen bereits bei der Planung des Gebäudes insbesondere hinsichtlich der Dachkonstruktion entsprechende Voraussetzungen geschaffen werden, die im Allgemeinen mit höheren Kosten verbunden sind und sich letztlich in der Praxis als nicht wirtschaftlich umsetzbar erwiesen haben. Die beschriebene direkte Strahlungskühlung ist u. a. auch für mehrgeschossige Bauten weniger interessant, da nur die Räume direkt unterhalb des Daches von der Kühlungswirkung erfasst werden.

### Hybride Strahlungskühlung

In der Praxis werden die Systeme der hybriden Strahlungskühlung bereits in den unterschiedlichsten Varianten umgesetzt. Die Eigenart der hybriden Strahlungskühlung besteht darin, dass ein Medium (Luft oder Wasser) gezielt eingesetzt wird, mit dem die Gebäudewärme (u. a. aus dem Gebäudeinneren) zum Dach bzw. der Gebäudehülle transportiert wird, um dort wiederum mittels Strahlungskühlung an die Umgebung abgeführt zu werden. Hierbei kann das Kühlmedium (Luft und/oder Wasser) z. B. in einer metallischen Dachfläche oder aber ober- oder unterhalb der Dachfläche zirkulieren. Den hybriden Verfahren ist gemein, dass das vom Dach gekühlte Wasser bzw. die gekühlte Luft benutzt wird, um das Innere des Gebäudes, z. B. Decken oder Böden oder die Raumluft, zu kühlen. Die hybride Strahlungskühlung kann daher im Unterschied zur direkten Strahlungskühlung auch für mehrgeschossige Gebäude eingesetzt werden. Eine Kombination der hybriden Strahlungskühlung mit der Verdunstungskühlung wurden z. B. bei den »WhiteCap Systemen« realisiert. Das Wasser zirkuliert bei diesen Systemen unter dem Dach und wird gleichzeitig zur Beregnung des Daches eingesetzt, wobei durch die Verdunstung ein zusätzlicher Kühlungseffekt erreicht wird.

## 1.2.6 Bauteilaktivierung

In den letzten Jahren haben sich die durch die Gebäude beeinflussten Wärmelasten, gefördert durch die Richtlinien und Verordnungen hinsichtlich des Dämmstandards, Niedrigenergie-, Nullenergie-, Passivenergiehaus, etc., entscheidend verringert. Infolgedessen ist nicht nur der Energieverbrauch proportional zur Last gesunken, sondern es haben sich auch die Randbedingungen und Energieeffizienz für das Raumklima, die Wärmeversorgung und für die Klimatisierung entwickelt.

Geringere Wärmelast fördert die Tendenz einerseits zu niedrigeren Vorlauftemperaturen der Heizung unter winterlichen und andererseits zu höheren Versorgungstemperaturen der Klimaanlage unter sommerlichen Temperaturen. Die Heiz- und Kaltwasserströme sowie die Luftströme für Raumluft- und Klimaanlage werden im Temperaturniveau nahe an die Verträglichkeits- und Behaglichkeitstemperaturen innerhalb der Räume angepasst und liegen daher auch näher an den Temperaturen der Abwasser-, Abluft- und Umweltenergieströme.

In Folge dessen haben sich neue Lösungsvarianten für die Wärmerückgewinnung und für die energetischen Kopplungen mit kleinstem Temperaturhub für Wärmepumpen sowie für die Kälte-Wärme-Kopplungen ergeben. Die im Temperaturniveau aneinander gerückten Energieströme lassen sich mit sehr hoher Leistungszahl, natürlich entsprechend den differenzierten Bedingungen mit mehreren kleinen Leistungseinheiten, miteinander verbinden.

### 1.2.6.1 Aktivierbare Speichermasse

Um eine zu große Erwärmung des Gebäudes zu Zeiten des Wärmeeintrags, d. h. über die täglichen Nutzungszeiten zu vermeiden, können diese Inneren Lasten zur energetischen Nutzung zwischengespeichert und an natürliche Wärmesenken abgegeben werden. Die Entladung der Speichermassen erfolgt mittels Betonkernaktivierung über Erdsonden, Massivsohleplatten oder Rückkühlwerke) bzw. durch Nachtlüftung. Die bei der Planung zu beachtenden wesentlichen Parameter (Randbedingungen/Kriterien) erstrecken sich über:

- hohe spezifische Wärmekapazität und gute Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe (Bauphysik)
- große Fläche der speichernden Bauteile, die einen ungehinderten Wärmeübergang durch Konvektion (Raumluft) und Wärmestrahlung (Wärmeübertragung mit den anderen Flächen des Raumes) ermöglichen.

Die wirksamsten Speicher, z. B. in Bürogebäuden, sind freiliegende, nicht abgehängte Betondecken. Hierbei muss aber überprüft werden, ob raumakustische Kompensationsmaßnahmen (Teppichböden oder akustisch vorteilhaftere Wandabsorber) verwendet werden müssen, um die erforderlichen Nachhallzeiten (Raumakustik) einzuhalten.

Alternativ, insbesondere in den Fällen von flexibler Raumaufteilung, können auch Leichtbauelemente mit Phasenwechselmaterialien (z. B. Paraffin) eingesetzt werden.

Zur Ermittlung der Wirkung der Speichermassen können die DIN 4108, Teile 2, 4 und 6 sowie die DIN EN ISO 13786 herangezogen werden. Die Wärmeabfuhr aus den Gebäudespeichermassen erfolgt über ein in die Decken (Fußböden) integriertes wasser-, oder luftführendes Rohrsystem. Als Wärmesenke dient das Grundwasser bzw. das Erdreich oder die Außenluft. Bei der Verwendung von Grundwasser als Wärmesenke besteht die größte Unabhängigkeit vom Außenklima, während beim Erdreich (Erdsonden bis zu 100 m Tiefe) eine Regeneration berücksichtigt werden muss. Das System der Betonkernaktivierung reagiert träge. Der Taupunkt der Raumluft limitiert die Kühlleistung (Wassertemperatur in der Betondecke). Räume mit erhöhten Innenlasten (Kühllast), z. B. mit zwei Außenfassaden mit Fenstern), müssen unter Umständen zusätzlich über ein weiteres System, z. B. Zuluftkühlung über Grundwasser/Erdreich), konditioniert werden. In Kombination mit einer Wärmepumpe ist das System auch als Niedertemperaturheizung im Winter einsetzbar, die Decken (Fußböden) dienen hierbei als Strahlungsheizfläche.

**Tab. 1-13:** Referenzprojekte – Bauteilaktivierung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt  | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten  |
|--|---|---|
| Bürogebäude Energon, Ulm,<br>Architektur:<br>oehler & archkom  | Passive Kühlung (Bauteiltemperierung), Erdsonden, Wärmepumpe, RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung und Erdreichwärmeübertrager Gesamtprimärenergieverbrauch TGA: 76 kWh/(m <sup>2</sup> a) bei Teilbelegung                           | (Passivhauszertifizierung) hoher Dämmstandard: A/V 0,22 m <sup>-1</sup> ; U-Wert (Mittel): 0,48 W/(m <sup>2</sup> K) Tageslichtoptimierung; Photovoltaik; Gebäudeautomation |
| »Kontor 19« im Rheinauhafen, Köln,<br>Architekt:<br>Gatermann+Schossig Architekten;<br>Generalplaner, Köln | In dem 6-geschossigen Büro- und Geschäftsgebäude wurden ca. 82 % der Nutzungszonen mit Betonkernaktivierung ausgeführt.   | Die Grundwasserentnahme erfolgt mittels zweier Saugbrunnen zum Heizen und Kühlen des Gebäudes, d. h. mit 100 % Redundanz.   |
| Forschungs- und Innovationszentrum (FIZ) der BMW-Group in München  | Es werden jährlich 44 Mio. kWh Kälte mit einer Kälteleistung von 5 MW bereitgestellt. Im Vergleich zum Einsatz einer konventionellen Kühlung mit Kompressionskältemaschinen entspricht dieses einer Stromeinsparung von 7 Mio. kWh. | Das Grundwasser aus dem Sammel- und Verteilstollen der Münchener U-Bahn wird zu Kühlzwecken genutzt.  |

Bei einer passiven Kühlung, d. h. einer Aktivierung der Gebäudespeichermassen, ist eine Dimensionierung nicht nach der Kühlleistung, sondern nach der an einem Tag anfallenden und somit auch abzuführenden Wärmemenge durchzuführen, die sich aus den externen und internen Lasten zusammensetzt. Durch den Einsatz einer Nachtlüftung kann eine Wärmemenge von ca. 150 bis maximal 200 W/(m<sup>2</sup>d) abgeführt werden. Mit einem Erdreichwärmeübertrager können ca. 200 W/(m<sup>2</sup>d) sowie über eine Betonkernaktivierung bis zu ca. 250 W/(m<sup>2</sup>d) abgeführt werden.

Durch den Trend zu vollverglasten Fassaden und zunehmend elektronischen Büroausstattungen treten in modernen Bürogebäuden neben den äußeren Wärmelasten noch hohe innere Wärmelasten auf. Als Folge muss ein erhöhter Kühlbedarf während der überwiegend warmen Jahreszeiten bereitgestellt werden. Um ein Aufschwingen der Raumtemperatur zu unterbinden, müssen diese thermischen Lasten optimal abgeführt werden. Im Büro- und Verwaltungsbau können die bisher eingesetzten Kapillarrohrmatten die Möglichkeiten der Bauteilaktivierung erweitern, d. h. die sonst übliche Trägheit der Systeme kann verringert werden. Durch den hohen Anteil an Strahlungswärme stellt sich ein behagliches Raumklima ein und die Temperatur der Heiz- und Kühlflächen kann nahe der Raumtemperatur eingestellt werden. Bei der Erzeugung, Speicherung und Verteilung werden so auch die Verluste verringert und die Umweltenergie oder Abwärme kann für Heizzwecke genutzt werden. Der multivalente Betrieb, also die Anwendung je nach Bedarf zum Kühlen oder Heizen, erhöht zudem die Wirtschaftlichkeit. Diese neuen Technologien müssen daher die herkömmlichen und sehr kostenintensiven Möglichkeiten reduzieren, wie z. B. beim Einsatz von Kühldecken.

Das Energieangebot zur Nutzung des natürlichen Kühlungsangebotes, z. B. die »Freie Kühlung«, Nachtkühlung, etc. kann zeitlich nur entgegengesetzt zur Nachfrage genutzt werden. Aus diesem Grund müssen geeignete Speichersysteme zur zeitlichen Überbrückung verwendet werden. Ein solcher Speicher bietet sich in Form der Gebäudekonstruktion gratis an. Die Bauteilaktivierung kann z. B. mittels thermoaktiver Decken- und/oder Bodensysteme erfolgen. Hierbei wird während des Tages die Energie der Wärmelasten in die Decken und Böden eingelagert, die dann nachts über den Kühlturm an die Außenluft abgegeben oder über Wärmerückgewinnungssysteme für andere Zwecke genutzt werden kann.

Während im Neubaubereich das Rohrsystem für das thermoaktive Bauteilsystem problemlos in die Geschossdecke integriert werden kann, lässt sich ein nachträgliches Verlegen der Rohrsysteme bei Sanierungen bzw. Modernisierungen in Altbauten in der Regel nur schwer realisieren. Analog verhält es sich auch bei Bauvorhaben in Leichtbauweise, weil hier die erforderliche Gebäudemasse fehlt, in welche die thermischen Lasten eingelagert werden können. Bei Umbauten lässt sich das TAB-System nur schwer integrieren, weil hier primär nur deckennahe Installationen, d. h. in den meisten Fällen mit der abgehängten Decke ausgeführt werden. Bei dieser Lösungsvariante wird aber der Energiespeichereffekt, d. h. die Wärmeübertragung zwischen den Wärmequellen und der Gebäudekonstruktion stark gemindert. Diese Diskrepanz hat dazu geführt, dass für den Einsatz in Um- und Leichtbauten thermoaktive Deckenelemente mit Phasenwechselmaterial verwendet werden.

### 1.2.6.2 Hybridsysteme

Ziel einer zeitgemäßen und ganzheitlichen Planung ist es unter anderem, Gebäude mit optimiertem thermischem Komfort, bei gleichzeitig minimiertem Energieverbrauch und reduzierten Anlagekosten zu entwickeln und zu realisieren. Effiziente Energiekonzepte sehen dabei insbesondere die Nutzbarmachung von Umwelt-, vorrangig von Solarenergie vor. Hierzu eignen sich sogenannte Hybridsysteme, die sowohl aktiv als auch passiv das Energieangebot nutzen. Diese werden wiederum in Hybridsysteme auf Luft- oder Wasserbasis unterschieden, wobei letztere Systeme für eine umfassende Solarenergienutzung prädestiniert sind.

Die Bauteiltemperierungen in Verbindung mit der Nutzung von Umweltenergie stellen solche Hybridsysteme dar. Die raumbegrenzenden Bauteile, wie Decken, sind dabei Wärmeübertrager und Speicher zugleich. Eine besonders effiziente Hybridlösung wird zur Beheizung und Kühlung von zumeist großvolumigen Gebäuden realisiert, in Form der reaktions-schnellen Bauteilaktivierung mit Betondecken. Ein wesentliches Systemmerkmal ist dabei fast immer die Abtrennung der Funktionen »Heizen« und »Kühlen« von den raumluftechnischen Anlagen. Im Ergebnis können auf diese Art komfortablere und energiesparendere raumluftechnische Anlagen bei geringeren Luftmengen sowie ein Optimum an Komfort, Funktion und Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

### 1.2.6.3 LowEx-TGA-Systeme

Der Wunsch nach einem komfortablen Raumklima, verbunden mit der Forderung nach einem möglichst geringen Energieverbrauch unterstützt den Trend zu den wasserführenden Systemen zum Heizen und Kühlen mit Umweltenergie. Bei den »LowEx-Konzepten« handelt es sich um Technologien, bei denen die Wärme mit geringer Exergie nutzbar gemacht wird.

Ein LowEx-Gebäude wird aus diesem Grund mittels Anergienutzung (Umweltnutzung), z. B. mit einer Wärmepumpe ausgerüstet. Die Flächenheiz- und -kühlsysteme können mit geringen Temperaturunterschieden zwischen der wärmeübertragenden Fläche und der Raumluft betrieben werden. Als vorteilhaft erweist sich hierbei u. a. das Erdreich, das im Sommer als Wärmesenke und in Verbindung mit einer Wärmepumpe im Winter als Wärmequelle dient. Die geringen Temperaturdifferenzen haben allerdings den Nachteil, dass ein verhältnismäßig hoher Volumenstrom gefördert werden muss, um die entsprechende Wärmemenge zu transportieren.

Im Jahr 2007 wurden in Deutschland bereits ca. 850.000 m<sup>2</sup> thermisch aktivierbare Flächen neu installiert. Knapp 60 % der Büro Neubauten werden über die Sommermonate mittels Flächensystemen gekühlt und über die Wintermonate z. T. beheizt.

Die Low-Exergiekonzepte beruhen auf den bekannten und erprobten Systemlösungen, wie

- Wärmepumpen (Wärmequellen: Abwasser, Erdreich, Grundwasser, Luft)
- Free Cooling (direktes Kühlen mit kühlen Temperaturen der Außenluft, des Erdreichs oder des Grundwassers, ohne Betrieb einer Kältemaschine)
- Adsorptions-, Absorptionstechnologie zur Kälteerzeugung (Prozessabwärme, BHKW- oder Brennstoffzellenabwärme, solare Energienutzung)
- kombiniertes Kühlen und Heizen
- Fern- und Nahwärmeversorgung
- raumluftechnische Anlagen, etc.

## 1.3 Contracting

Der Begriff »Contracting« (engl. Abmachung, Vertrag schließen) wird in Deutschland für eine Dienstleistung verwendet und zielt darauf ab, die Effizienz von Energieversorgungs- und -verteilungssystemen durch Know-how, systematische Modernisierung und innovative Technologien zu steigern. Dabei bietet der Dienstleister (Contractor) je nach Ausgestaltung des Vertrages Beratung, Planung, Finanzierung, Realisierung, Betrieb und Instandhaltung der Systeme an. Der Kunde bezahlt die Leistungen in der Regel über den Preis für die gelieferte Energie. Durch Contracting lassen sich die Durchführung sinnvoller Energiesparmaßnahmen und der Einsatz energiesparender Technologien vielfach beschleunigen, da der Kunde weder Investitionen erbringen noch die technischen Risiken des Anlagenbetriebs tragen muss. Auch bei der Einführung und Erprobung der Brennstoffzelle wird das Contracting eine wichtige Rolle spielen; als Contractor fungieren dabei vor allem Energieversorgungsunternehmen. Die Contractingprojekte werden zu einem Zeitpunkt realisiert, wenn sie wirtschaftliche Vorteile für alle Beteiligten erwarten lassen.

### 1.3.1 Contractinggesellschaftsform

Eine weitere Entscheidung ist die Wahl der Contractinggesellschaftsform sowie die Einbeziehung möglicher Partner. Diese können Geldinstitute, Versorgungsunternehmen und Anlagenhersteller sein. Die Einbeziehung von mehreren Gesellschaftern reduziert hierbei das Risiko für den Einzelnen.



## Risikoverteilung

Bestimmend für die Gestaltung des jeweiligen Contractingmodells ist die Verteilung der Projektrisiken auf den Contractor und Nutzer. Hierbei sollte angestrebt werden, dass der einzelne Partner jeweils die Risiken übernimmt, die er am ehesten beeinflussen und somit gering halten kann. Die Projektrisiken werden in Bonitäts-, Betriebs- und Technikrisiko unterteilt.

Das Bonitätsrisiko besteht über eine langfristige Zahlungsunfähigkeit des Nutzers. Bei Investitionen im Kommunalbereich ist somit das Risiko als gering anzusehen. Im Industriebereich sollte jedoch das Bonitätsrisiko auf jeden Fall höher eingestuft werden. Eine Möglichkeit des Contractors, dieses Bonitätsrisiko einzuschränken, besteht in der Gründung einer Projektgesellschaft in der Rechtsform einer Kapitalgesellschaft, bei der das Risiko in der Regel auf das von den Gesellschaftern zu erbringende Eigenkapital für das einzelne Projekt beschränkt ist. Bei dieser Form der Projektfinanzierung wird der verbleibende Hauptanteil des Bonitätsrisikos auf das finanzierende Kreditinstitut übertragen. Die übertragenen Bonitätsrisiken werden sich die Kreditinstitute jedoch durch Ausfallbürgschaften der Gesellschaft und/oder höhere Refinanzierungszinsen absichern bzw. entgelten lassen.

Mit dem Contracting wird ein zivilrechtlicher Vertrag umschrieben, der zwischen dem Dienstleister (Contractor) und seinem Kunden (Contractingnehmer) geschlossen wird. Inhalt des Vertrages ist, dass sich der Contractor innerhalb eines Objektes zur Übernahme der Energiebewirtschaftung verpflichtet, wobei andererseits vom Contractingnehmer diese Leistung honoriert wird. Der Anbieterkreis von Contracting erstreckt sich von den Versorgungsunternehmen über Anlagen- und Komponentenhersteller, Energieagenturen, Handwerksbetrieben, Ingenieurbüros bis hin zu den Messdienstfirmen (Verbrauchserfassung durch Fernabfrage) und Gebäudedienstleistern. Hierbei können im Contracting durchzuführende Aufgaben im Rahmen einer gemeinsamen Gesellschaft mehrerer an dem Projekt interessierter Unternehmen erfolgen. Es ist aber auch möglich, dass z. B. ein Gasversorgungsunternehmen (GVU) allein als Contractor auftritt und für die Abwicklung der nicht von ihm selbst durchzuführenden Aufgaben Subunternehmerverträge mit anderen Unternehmen abschließt. Darüber hinaus gibt es bereits eine große Anzahl von Unternehmen, die das Contracting als eigenständigen Geschäftszweig betreiben. Die betriebswirtschaftlichen Vorteile und die guten Praxiserfahrungen in den realisierten und laufenden Projekten zeigen, dass sich in Contractingmodelle für beide Seiten rechnen. Neben der Stromversorgung bietet der Industriedienstleister auch Wärme, Kälte, Kühlwasser, Druckluft, technische Gase und Wasser in verschiedenen Qualitätsstufen, z. B. vollentsalztes oder gereinigtes Wasser für die pharmazeutische Industrie, im Contracting an.

## Vorteile für den Kunden als Energienutzer

Die Projekte zur Erzeugung von Nutzenergie wie Strom, Heizwärme, Warmwasser, Dampf, Kälte, Kühlwasser, etc. können von dem kommunalen oder industriellen Energienutzer selbstständig unter Heranziehung der verschiedenen Marktpartner, wie Planer, Anlagenhersteller, Energielieferanten und Finanzierungsinstitute, durchgeführt werden. Im Hinblick auf eine rationelle, energiekostensenkende und umweltschonende Bereitstellung dieser Nutzungsenergien gewinnen zunehmend neue Technologien, wie z. B. die Kraft-Wärme-Kopplung an Bedeutung. Diese Technologien stellen an den Investor hohe Anforderungen bezüglich der



technischen, wirtschaftlichen, organisatorischen und rechtlichen Projektgestaltung. Dies kann dazu führen, dass der Nutzer letztlich von der wirtschaftlich sinnvollen, jedoch von ihm in alleiniger Regie nicht zu realisierenden Maßnahme Abstand nehmen muss. Gründe hierfür können sein:

- die Investition würde zu einer Überschreitung des verfügbaren Finanzrahmens des Nutzers führen (der Investitionsplan eines Industriebetriebes oder der Haushaltsplan im öffentlichen Bereich)
- die Wirtschaftlichkeit des Projektes, d. h. die interne Verzinsung, Amortisationsdauer liegt nicht im Rahmen der in dem Betrieb des Nutzers üblichen Maßstäbe. Die Investitionen in anderen Bereichen werden aufgrund der Knappheit der Finanzmittel vorgezogen
- das wirtschaftliche und das technische Investitionsrisiko werden vom Nutzer, der sich nicht regelmäßig mit den Fragen der Energieumwandlung beschäftigt, als zu hoch angesehen
- der Nutzer verfügt nicht über das für die Abwicklung der Investition und für den späteren Betrieb der Anlage erforderliche Know-how
- dem Nutzer fehlen die Erfahrungen und die betrieblichen Strukturen, um die für die Projektdurchführung erforderlichen Verträge mit einer Vielzahl von beteiligten Partnern zu verhandeln und abzuschließen.

Entscheidungskriterien und zugleich Impulse für ein Energiedienstleistungscontracting sind u. a. die BImSchV und die EnEV, da hier auch für die Gewerke HKL neues Terrain aufgezeigt wird. Contractinglösungen werden z. B. von Heizanlagenherstellern, Dienstleistern der Energietechnik, großen Handwerks- und örtlichen Energieversorgungsunternehmen oder auch Energieagenturen angeboten. Die Vertragsleistung beinhaltet das Dienstleistungskonzept, das die Effizienz bei der Energieerzeugung, -umwandlung und -nutzung in sämtlichen Verbrauchsbereichen verbessern soll. Ein außen stehender Investor (Contractor) übernimmt je nach Vertragsumfang die Planung, Finanzierung, Bauausführung sowie den laufenden Betrieb des Investitionsprojekts, z. B. die Errichtung und den Betrieb eines BHKW.

Zur Entscheidung, welches Contractingmodell bevorzugt werden soll, spielen die Stromlieferverträge die Laufzeiten, Preise, Sonderkonditionen, Finanzierungen, etc. eine entscheidende Rolle. Ein Contractingvertrag wird u. a. interessant für die Errichtung oder Sanierung von Mittelspannungsschaltanlagen, Trafostationen, Notstromersatzanlagen, USV-Anlagen oder die Sanierungen von veralteten Beleuchtungsanlagen. Gemeinsam ist allen Contractingmodellen, dass der Energienutzer mit mindestens einem weiteren Partner, dem Contractor, ein Vertragswerk (den Contract) abschließt. Der Contractor wird so mit der Ausführung des Projektes und mit der Übernahme der hiermit verbundenen Investition beauftragt.

Zur Vorbereitung eines Contractingprojektes gehören u. a. die exakte Definition der technischen Schnittstellen, die Vorgabe der finanziellen und kaufmännischen Spielregeln sowie die Entwicklung der erforderlichen vertraglichen Rahmenbedingungen. Zur Angebotserstellung gehört eine exakte Leistungsbeschreibung, die Regeln bei der Tarifgestaltung, Verbrauchsmessungen und Abrechnung, Preisanpassungsmechanismen, Vertragslaufzeiten und die Endschaftsbestimmungen, Verantwortungs- und Gewährleistungsfragen. Am Ende des

Contractingzeitraumes geht grundsätzlich die Energieanlage in das Eigentum des Energienutzers über. Die Refinanzierung erfolgt aus dem Cashflow der Investition.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt die Basis zur Grundsatzentscheidung, d. h. die Pro-/Contra-Realisierung des Contractingprojektes dar. Neben den Investitionen bestimmen hier weitere Parameter die Wirtschaftlichkeit wesentlich:

- Energiebezugskosten/Einspeisevergütung
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Personalkosten (Betreiberfunktion)
- Versicherungen.

Darüber hinaus spielen die Finanzierungsart (Eigen-/Fremdfinanzierung) sowie die Finanzierungskonditionen eine große Rolle. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Prüfung der Förderungsmöglichkeiten, insbesondere in Verbindung mit umweltschonenden Anlagenkonzeptionen. Bei einem positiven Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird seitens des Contractors ein verbindliches Angebot erstellt. Ein Vorvertrag sichert die weiteren Aktivitäten ab. Basis zur Ausschreibung und Umsetzung bietet der »Energiesparcontracting-Leitfaden« der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

### 1.3.2 Energiesparcontracting (Performancecontracting)

Dieses Modell zielt auf die Verringerung des Energiebedarfs ab, d. h. beim Energiesparcontracting amortisiert sich die Investition über die durch die Erneuerung (Sanierungsmaßnahmen) einer vorhandenen Anlage freigesetzten Energieeinsparpotenziale. Das Entgelt für den Contractor orientiert sich an den nachgewiesenen Kosteneinsparungen. Diese sollten ausreichen, um die Investitionsausgaben innerhalb der technischen Anlagelebensdauer zu refinanzieren. Die Kosten beim Contractingnehmer setzen sich während der Laufzeit aus den reduzierten Kosten für den Energiebezug und aus den Contracting-Raten zusammen. Das Energiesparcontracting (Performancecontracting) ist eine Form des Contracting, bei der die eingesparten Energiekosten Grundlage für die Finanzierung der Investitionen des Contractors sind. Besonders geeignet für energieintensive Unternehmen und Betriebe, aber auch im Gebäudebereich, wenn ein hoher Nachholbedarf bei der energetischen Sanierung besteht.

### 1.3.3 Wärmecontracting ohne Eigenkapital

Immer mehr Immobilienbesitzer verlangen bei der Wärmeversorgung Komplett-Angebote und viele suchen zudem Finanzierungsalternativen. Beim Wärmecontracting handelt es sich hierbei um ein Dienstleistungskonzept, das über die gesamte Vertragslaufzeit Heizungsanlagen inklusive Brennstoff, Wärmegarantie zum monatlichen Preis, analog einer Leasingrate, garantiert. Also vergleichbar mit der Handynutzung: Grundgebühr plus monatliche Einheiten nach Verbrauch.

Die neuen Marktvarianten stellen zwar vom Ansatz her eine Alternative dar, die jedoch auf jeden Anwendungsfall bezogen und hinsichtlich

- des finanziellen Risikos
- ohne jegliche Abstriche in der unternehmerischen Eigenständigkeit sowie
- der eigenen Unternehmensidentität

gut durchdacht und sehr kritisch hinterfragt werden sollte.

### 1.3.4 Anlagencontracting

Beim Anlagencontracting wird auf der Grundlage der Investition und der zu erwartenden Betriebskosten ein Nutzen-Energiepreis kalkuliert. Der Kunde bezahlt hier nur noch die benötigte Energie und der Contractor übernimmt die Betriebs-, Instandsetzungs- und Wartungskosten. In einigen Fällen wird der Austausch von Komponenten auch dazu genutzt, die Anlage hygienisch zu verbessern. Es muss jedoch in Einzelfällen überprüft werden, ob und inwieweit zusätzliche Maßnahmen zur Hygieneverbesserung über die Energie-Einsparung mitfinanziert werden können. Um auch bei knappen Budgets notwendige Sanierungen, Modernisierungen, Optimierungen und hygienische Verbesserungen realisieren zu können, wurden von der Industrie spezielle Energiespar-Contracting-Modelle entwickelt. Ein solches Performancecontracting (PFC) beinhaltet z. B. Maßnahmen zu Sanierungen, Modernisierungen und Optimierungen, die zu einer dauerhaften Reduzierung von Energie- und Betriebskosten innerhalb der Gebäudebewirtschaftung führen.

Das Finanzierungsmodell Performancecontracting hat sich in den letzten Jahren bei der Modernisierung und Optimierung von RLT-Anlagen bewährt. Das Besondere dieses Finanzierungskonzeptes ist eine vertraglich garantierte Kosteneinsparung durch den Anbieter. Ein Performancecontracting eröffnet somit den Gebäudebetreibern die Möglichkeit, Maßnahmen zur effizienten Energienutzung im Wege einer Drittmittel-Finanzierung durchzuführen. Hierdurch ergeben sich sowohl wirtschaftliche Vorteile (hohe Kosteneinsparung) als auch eine Anlagensystem-Qualitätsverbesserung und eine Entlastung der Umwelt hinsichtlich der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Tätigkeitsschwerpunkte sind hier u. a. der Einbau von Energierückgewinnungssystemen, elektronisch geregelte Ventilatoren und Pumpen mittels Frequenzumrichter, Umstellung von Konstantvolumenstrom auf variable Volumenstromregelung, Anpassung der Sollluftmengen, Austausch von Ventilatoren, Erneuerung von Antrieben, Austausch der Regelungstechnologie sowie Umstellung auf eine mehr am Bedarf orientierte Betriebsweise.

*Beispiele:*

- Einsatz von BHKW
- RLT-Wärmerückgewinnungsanlagen
- Einsatz von Wärmepumpen
- Sanierungsmaßnahmen in Krankenhäusern.

Im Rahmen notwendiger Modernisierungsmaßnahmen der gebäudetechnischen Anlagen empfiehlt es sich neben der mechanischen und energetischen Verbesserung auch die hygienischen Rahmenbedingungen zu überprüfen. Das Finanzierungsmodell Energiesparcontracting bietet hier einen ganzheitlichen Lösungsansatz.

### 1.3.5 Betriebsführungs- und/oder Instandhaltungscontracting

Bei diesem Modell wird eine Anlage losgelöst von den o. a. Modellen betrieben. Für die Betriebsoptimierung, Überwachung, Wartung und den Anlagenunterhalt sowie für die Disposition des Primärenergieeinkaufs erhält der Contractor ein vertraglich festgesetztes Honorar.

### 1.3.6 Referenzprojekte

**Tab. 1-14:** Referenzprojekte – Contracting (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt / Contractor   | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten  |
|--|--|---|
| Hamburger Klinikum Nord, Urbana Energietechnik                   | Zwei Brennwertwärmeerzeuger; ges. 5 MW; drehzahlgeregelte Brenner und Pumpen   | Ergebnisse: ca. 32 % geringere CO <sub>2</sub> -Emissionen; ca. 70 % geringere NOX-Emissionen |
| St. Franziskus-Krankenhaus und Seniorenheim in Eitorf/a. d. Sieg | NT-Wärmeerzeuger 500 kW und Brennwertwärmeerzeuger 978 kW-FU-Ventilatoren und neue GLT   | Energieeinsparung der Haupt-RLT-Anlagen ca. 35 % bzw. 500.000 kWh/a                           |
| Evangelisches Krankenhaus in Wesel (NRW), HEW-Contract           | Neue Wärmeerzeuger sowie hydraulische und regelungstechnische Optimierung.Reduzierung der Wärmeenergien von 9,1 MW auf 3,5 MW und Dampfleistung von 2 x 1500 kg/h auf 2 x 600 kg/h | Energiesparcontracting Erdgasbedarf um 23 % reduziert   |

## 1.4 Förderprogramme

Seit 1. Januar 2008 gibt es neue Fördermöglichkeiten für den Einsatz regenerativer Energien und rationaler Energieumwandlungstechnologien, die mit normativen Rahmenbedingungen verbunden sind. In der 20-seitigen Richtlinie des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) stecken umfangreiche neue Förderungen, wie z. B. ein Kombinations- und Effizienzbonus.

### 1.4.1 ERP-Umwelt- und Energiesparprogramm (Darlehen für Umweltschutzmaßnahmen)

Das ERP-Umwelt- und Energiesparprogramm unterstützt Umweltschutzmaßnahmen in Deutschland, u. a. die Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien. Gefördert werden private Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, Freiberufler sowie Betreiber- und Kooperationsmodelle zur Erfüllung hoheitlicher Aufgaben, z. B. Public Private Partnerships. Nicht gefördert werden Unternehmen, die sich in einer Sanierungsphase befinden. Bevorzugt werden kleine und mittlere Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. € oder einer Jahresbilanzsumme von max. 43 Mio. €. Die Kreditlaufzeit beträgt bis zu 15 Jahre (Bauvorhaben sogar 20 Jahre) in den neuen Bundesländern und Berlin, davon bis zu fünf Jahre tilgungsfrei. In den alten Bundeslän-

dern beträgt die Kreditlaufzeit bis zu zehn Jahre (Bauvorhaben bis 15 Jahre), davon bis zu zwei Jahre tilgungsfrei.

### 1.4.2 Förderungen im Marktanreizprogramm

Für die Marktanreizprogramme wurden die bisherigen Zuschüsse verändert und die Förderfähigkeit für Wärmepumpen aufgenommen. Durch ein neues Bonussystem können deutlich höhere Förderbeträge bezogen werden. Wenn ein Nutzer z. B. Solarkollektoren in Verbindung mit Biomassewärmeerzeugern, Wärmepumpen, Gas- oder Öl-Brennwertwärmeerzeugern installieren lässt, erhält er einen zusätzlichen Kombinationsbonus. Für bestehende Gebäude, deren Transmissionswärmeverlust bestimmte Werte nicht überschreitet, kann zusätzlich ein Effizienzbonus geltend gemacht werden. Besonders innovative Anlagen, z. B. große Solar-Kollektoranlagen oder Biomassewärmeerzeuger mit hochwirksamen Staubfiltern, profitieren von der Innovationsförderung. Der Kreis der Antragsberechtigten wurde nicht verändert; die Anträge sind zu stellen, wenn die Anlage betriebsbereit ist.

Die Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 20. Februar 2009 und die Antragsformulare sind als Download auf [www.bafa.de](http://www.bafa.de) erhältlich.

### 1.4.3 Zusätzliche Förderungsmöglichkeiten

Über den Förderbaustein »Wärme aus erneuerbaren Energien in Schulen und in der Kirche« können Mehrausgaben, z. B. für elektronische Anzeigetafeln, zusätzlich bezuschusst werden. Der Antrag muss jedoch vor Beginn der Maßnahmen gestellt werden. Zudem wurde auch die Förderung gewerblicher Investitionen deutlich ausgebaut. Gefördert werden große Biomasseanlagen, große solarthermische Anlagen, Nahwärmenetze und Tiefengeothermieanlagen.

Neu ist auch ab 2008 die Förderung von großen Wärmespeichern, Anlagen zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität und Biogasleitungen. Die neue Förderrichtlinie ist unter [www.bmu.de](http://www.bmu.de) oder [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de) abrufbar.

#### Förderungsprogramm für die energetische Altbausanierung

Mit diesem Programm fördert die KfW Investitionen, die den Energieverbrauch von bestehenden Gebäuden maßgeblich senken. Diese Kreditvariante steht sämtlichen Investoren zur Verfügung. Der niedrigste Zinssatz wird im Einzelfall geklärt und ist auf max. 10 Jahre Laufzeit festgeschrieben. In jedem Fall hängt der Zinssatz vom Umfang der Sanierungsmaßnahmen ab und ist um ein vielfaches niedriger als bei den Banken. Generell gilt: je weniger Energie das Gebäude nach der Sanierung benötigt, desto niedriger sind die Zinssätze.

#### 1.4.3.1 Förderbedingungen der KfW (Anpassung an die EnEV)

Das »Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien« (Bundesgesetz), schreibt Mindestvergütungen, Anschlussbedingungen und weitere Vertragsbedingungen für die Strom-einspeisung erneuerbarer Energien ins öffentliche Stromverbundnetz vor.

## Einspeisevergütung

Der örtliche Stromnetzbetreiber muss Strom aus erneuerbaren Energien kaufen und einen Mindestpreis (Vergütung) entsprechend dem EEG bezahlen. Seit Anfang 2000 regelt das EEG die Abnahme und Vergütung des Stromes, der ausschließlich aus regenerativen Energien, z. B. der Wasserkraft gewonnen wird, um im Sinne des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag erneuerbarer Energien an der Stromversorgung in Deutschland deutlich zu erhöhen. Unter dem Einfluss der im EEG festgelegten Voraussetzungen sind die Netzbetreiber zur Abnahme und Vergütung verpflichtet, sodass sich – zusammen mit Mitteln aus der Förderung regenerativer Energien – entsprechende Investitionskosten amortisieren können. Zweck des Gesetzes ist es, im Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen.

Durch das EEG sind die Netzbetreiber verpflichtet, Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbarer Energie an ihr Netz anzuschließen, den Strom abzunehmen und dem EEG entsprechend zu vergüten. Das EEG regelt die Abnahme und die Vergütung von ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen gewonnenem Strom durch Versorgungsunternehmen, die Netze für die allgemeine Stromversorgung betreiben. Die Netzbetreiber sind nach dem EEG verpflichtet, Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und nach §§ 6 bis 12 zu vergüten. Ziel des Gesetzes ist es, den Anteil an erneuerbaren Energien bis 2010 auf mindestens 12,5 %, bis 2020 auf mindestens 20 % zu erhöhen.

Der Begriff »Erneuerbare Energien (regenerative Energien)« definiert Energiequellen, die sich laufend erneuern und damit sehr lange zur Verfügung stehen. Das technisch nutzbare Angebot sämtlicher erneuerbaren Energien ist um ein Vielfaches höher als der den menschlichen Bedürfnissen entsprechende Energieverbrauch. Zudem sind sämtliche erneuerbaren Energieträger kohlendioxidneutral, d. h. sie emittieren entweder keinen Kohlendioxid oder nicht mehr, als sie während ihrer Entstehung aufgenommen haben. Zu den wichtigsten erneuerbaren Energien zählen Bioenergie, Sonnenenergie, Erdwärme, Wasserkraft und Windenergie.

## Mindestvergütungssätze nach dem EEG (für den Zeitraum bis 2013)

Der § 5 Absatz 1 des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien, kurz Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), regelt die Vergütungspflicht:

*»Netzbetreiber sind verpflichtet, Strom, der in Anlagen gewonnen wird, die ausschließlich erneuerbare Energien oder Grubengas einsetzen und den sie nach § 4 Abs. 1 oder Abs. 5 abgenommen haben, nach Maßgabe der §§ 6 bis 12 zu vergüten.«*

Die Vergütungssätze sind im EEG selbst geregelt. Zusätzlich hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit eine 18-seitige Publikation über die Mindestvergütungssätze nach dem neuen EEG herausgegeben. In diesem Dokument werden – in Abhängigkeit vom Jahr der Inbetriebnahme – in verschiedenen Tabellen die Vergütungssätze für den Zeitraum 2004 bis 2013 vorgestellt.

### 1.4.3.2 Förderungen nach dem EEWärmeG

Der Bundestag hat am 06. Juni 2008 das EEWärmeG verabschiedet, nach dem zukünftig der Wärmeenergiebedarf in Neubauten, die nach dem 31. Dezember 2008 fertig gestellt werden, anteilig aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Das neue Gesetz ist Teil des Ende 2007 beschlossenen Klima- und Energieprogramms. Es benennt verschiedene Maßnahmen zur Erfüllung dieser Nutzungspflicht. Hierzu gehört z. B. die Installation einer Öl-Brennwertheizung in Kombination mit einer Solarthermieranlage. Mit dieser Kombination lassen sich in vielen Fällen die Anforderungen des EEWärmeG vergleichsweise kostengünstig erfüllen. Bei Ein- und Zweifamilienhäusern reicht eine Solar Kollektorfläche von 4 % der Nutzfläche des Gebäudes aus. Bei einem 150 m<sup>2</sup> großen Haus sind daher 6 m<sup>2</sup> Kollektorfläche ausreichend, um das Gesetz zu genügen. Mit einer derartigen Anlagenkonzeption können über das gesamte Jahr betrachtet ca. 60 % des Energiebedarfs für die Warmwassererzeugung gewonnen werden. Dies entspricht einer Heizöl-einsparung von rund 200 bis 250 Liter pro Jahr und dieses bei den stets anhaltenden Ölpreissteigerungen. Eine weitere Absenkung des Heizölverbrauchs ist möglich, wenn die Solarthermie auch zur Heizungsunterstützung genutzt wird. In den Übergangsmonaten kann überwiegend einerseits mit der solar gewonnenen Wärme geheizt werden und zum anderen im Winter das Heizungswasser vorgewärmt werden, wenn die Kollektorfläche bei derselben Nutzfläche ca. 10 m<sup>2</sup> groß dimensioniert wird. Der wesentliche Vorteil einer Solar-Öl-Brennwertheizung besteht in der Unabhängigkeit von leitungsgebundenen Energieträgern.

Das EEWärmeG sieht für bestehende Gebäude zwar keine Nutzungspflicht der erneuerbaren Energien vor, aber auch hier gilt der Einsatz von Öl-Brennwerttechnik in Kombination mit einer Solarthermieranlage als eine der effektivsten und wirtschaftlichsten Modernisierungsmaßnahmen. Ein weiterer Vorteil besteht in den Zuschüssen, die bei einem bestehenden Gebäude für Systeme zur Wärmegewinnung aus erneuerbare Energien gewährt werden.

## 1.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Um die Vorteile einer Maßnahme zum technisch effizienten, ökologisch sinnvollen und zudem wirtschaftlichen Einsatz von Energien einschätzen zu können, werden in der Praxis bereits im Zuge der Vorentwurfsplanung die erforderlichen Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt.

Zu beachten ist hierbei, dass sich nicht sämtliche Vorzüge eines maßvollen Energieeinsatzes quantitativ bzw. qualitativ erfassen lassen. Wenn die Wirtschaftlichkeit einer Investition durch den Vergleich mehrerer möglicher Varianten optimiert werden sollen, sollten in die Beurteilung nachfolgend aufgeführte Parameter einfließen:

- Investitionshöhe
- Nutzungsdauer
- Kapitalverzinsung
- jährlicher Energieverbrauch
- anzunehmende Entwicklung der Energiepreise
- anfallende Wartungs- und Unterhaltskosten.

Als Normungsgrundlage dient hier die DIN EN 15459:2008-06, für Heizsysteme in Gebäuden; Erforderliche Daten für einheitliche wirtschaftliche Betrachtungsverfahren in Verbindung mit Energiesystemen in Gebäuden, einschließlich erneuerbarer Energiearten. Die DIN EN 15459 ist Teil der Berechnungsmethode für die Wirtschaftlichkeit von Energieeinsparmöglichkeiten in Gebäuden, z. B. Isolierung, effizientere Erzeugungs- und Verteilungssysteme, effizientere Beleuchtung oder Einsatz von erneuerbare Quellen sowie rationelle Energieanwendungen mittels Brennwertechnologie, Brennstoffzellen, Kraft-Wärme-Kopplung, etc.

In der DIN EN 15459 wird eine Berechnungsmethode für die wirtschaftlichen Aspekte von Heizungssystemen und anderen Systemen beschrieben, die in den Energiebedarf und den Energieverbrauch eines Gebäudes einbezogen sind. Die Norm gilt für sämtliche Gebäudetypen und enthält primär die Definitionen und Strukturen der Kostentypen, die für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Einsparmöglichkeiten in Gebäuden beachtet werden sollten. Ferner enthält diese Norm die Daten, die erforderlich sind zur Definition der Kosten, die mit dem betrachteten System in Verbindung stehen sowie die Berechnungsmethoden, Darstellungen der Ergebnisse der wirtschaftlichen Berechnung. Für die Berechnungen sind in den informativen Anhängen die Anhaltswerte für die Life-Cycle-Costs (Lebensspanne, Reparatur- und Instandhaltungskosten, etc.) aufgeführt.

Die gängigsten Methoden zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung basieren auf einem Vergleich der Gesamtkosten. Als Basis dient hier die Kapitalwertmethode, wobei als Kapitalwert die Summe sämtlicher Kosten verstanden wird, die während der Nutzungsdauer anfallen. Mit dem Bezugszeitpunkt  $t_0$  wird der Moment definiert, an dem die Investition getätigt wird. Hierbei werden sämtliche später anfallenden Kosten nicht mit ihrem Nominalbetrag berücksichtigt, sondern diskontiert, d. h. es wird der Betrag ermittelt, der zum Zeitpunkt  $t_0$  unter Einbeziehung der Inflationsrate hätte angelegt werden müssen, um die nachfolgenden Kosten zu decken. Der Kapitalwert entspricht insofern dem zum Kalkulationszins anzulegenden Gesamtbetrag, der erforderlich ist, um zusammen mit den Zinsen sämtlich investitions- und laufenden Kosten, die also auch über den späteren Nutzungszeitraum entstehen, abdecken zu können. Das Ziel bei einer Investition ist es daher, die Gesamtkosten natürlich möglichst niedrig zu halten. Für den Fall, dass durch die Investitionen auch Einnahmen erzielt werden, muss anstelle der Kosten die Differenz aus Ausgaben und Einnahmen eingesetzt werden. Der Kapitalwert entspricht dann dem Barwert sämtlicher Zahlungsflüsse. Der Nachteil der Kapitalwertmethode liegt in der Abstraktheit des Ergebnisses begründet.

Das entscheidende Ergebnis wird durch Zugrundelegung der Annuitätenmethode erreicht, wobei hier der Kapitalwert unter Berücksichtigung der Zinsen über die Nutzungsdauer auf gleich hohe jährliche Anteile (Annuitäten) verteilt wird. Abschließend werden die Bilanzen und Jahreskosten bzw. Kapitalkosten in einem Kostenspiegel entsprechend den unterschiedlichen Varianten und mit verschiedenen Lösungsansätzen aufgeschlüsselt und verglichen. Bei dieser Kostenanalyse sollte eine besondere Beachtung auf einen niedrigen Energieverbrauch gelegt werden. Unter den Lösungen mit dem niedrigsten Energieverbrauch sind als Ergebnis die Systemfindungen mit den geringsten Gesamtkosten zu bevorzugen. Bei der Optimierung der einzelnen Anlagenkomponenten sollte auch ihr wechselseitiger Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz berücksichtigt werden, da sonst die primären Ansätze für Optimierungsmaßnahmen durchzuführen sind.



In der graphischen Darstellung des Energiesektors wird sich in der Regel insbesondere bei den betriebswirtschaftlichen Kostengrafiken ein flacher Kurvenverlauf darstellen. So haben z. B. die gewählten Dämmstoffdicken bei Dämmungsmaßnahmen zwar nur einen geringeren Einfluss auf die Gesamtkosten, aber dennoch ist deren Wirkung auf den Energieverbrauch erheblich. Insofern können die Lösungen, die hinsichtlich der Investition vom berechneten Kostenoptimum abweichen, nur geringfügig teurer aber energetisch gesehen wesentlich günstigere Ergebnisse anzeigen. Bei der optimalen Gestaltung sämtlicher Energieeinsparmaßnahmen zeigt sich ein weiteres Kriterium in der Form, dass die Parameter erheblich von der künftige Preis- und Zinsentwicklung abhängig sind. Aus diesem Grund sollen die Varianten mit den geringsten Differenzen nach der Umweltverträglichkeit ausgewählt werden.

In jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung stellt die Amortisationszeit einen weiteren Aspekt dar. Hierbei ergibt sich als Bezugsgröße die Anzahl der Jahre, in der sich die Investitionen aus den Erträgen durch die Energieeinsparungen zurückzahlen lassen. Diese Rückzahlfrist ist insofern der Gradmesser für das Investitionsrisiko. Je kürzer sich dieser Zeitraum darstellt, desto geringer wird die Unsicherheit über die zugrunde gelegten Annahmen. Die Länge der Amortisationszeit lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die Rentabilität einer Investition zu. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden hinsichtlich der statischen Amortisationsdauer nachfolgend aufgeführte Mittelwertfaktoren  $m$  (e/u) empfohlen:

Nutzungsdauer ca. 15 Jahre  $\Rightarrow m = 1,5$

Nutzungsdauer ca. 25 Jahre  $\Rightarrow m = 2,0$ .

Zur Einschätzung der Nutzungsdauer sollten die Herstellerangaben zugrunde gelegt werden. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt entsprechend den nachfolgend aufgeführten mathematischen Zusammenhängen:

$$K_a = m_e \cdot (K_e + m_u) \cdot (K_u + K_i) \quad \text{€/a}$$

$$K_{e,m} = K_{e,0} \cdot m_e = E_w \cdot EBF \cdot k_{e,0} \cdot m_e$$

$$m_e = \frac{(1+s)}{p-s} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{(1+s)}{(1+p)} \right)^n \right] \cdot a_{p,n}$$

$$K_i = I_0 \cdot a_{(p,n)}$$

Hier bedeuten:

|             |  |
|-------------|--|
| $K_0$ :     | Kapitalwert  |
| $K_t$ :     | Kosten im laufenden Jahr                                 |
| $K_a$ :     | Jahreskosten   |
| $K_e$ :     | Energiekosten  |
| $K_{e,m}$ : | mittlere jährliche Energiekosten                         |
| $K_{e,0}$ : | jährliche Energiekosten bei gegenwärtigen Energiepreisen |
| $k_{e,0}$ : | gegenwärtiger Energiepreis                               |
| $K_u$ :     | Unterhaltskosten   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $K_{u,m}$ :        | mittlere jährliche Unterhaltskosten  |
| $K_{u,0}$ :        | jährliche Unterhaltskosten bei gegenwärtigen Preisen                             |
| $K_i$ :            | jährliche Kapitalkosten  |
| $I_0$ :            | Investitionen zum Anfangszeitpunkt   |
| $m_e$ bzw. $m_u$ : | Mittelwertfaktor der Verteuerung<br>(jeweils Energie oder Wartung und Unterhalt) |
| $a_{p,n}$ :        | Annuitätsfaktor  |
| $s$ :              | jährliche Energieteuerungsrate   |
| $p$ :              | Kalkulationszinssatz   |
| $n$ :              | Nutzungsdauer  |
| $m$ :              | statische Amortisationsdauer, d. h. (Mehr-) Investition/jährliche Einsparung     |

$$m = \frac{(\text{Mehr-})\text{Investition}}{\text{jährliche Einsparung}}.$$

Die Annuität entspricht den jährlichen Aufwendungen für Kapitalzinsen und Tilgung.

$$a(p,n) = \frac{p}{1 - (1 + p)^{-n}}$$

Die Jahreskosten setzen sich aus den Betriebs- und Kapitalkosten zusammen.

Die Energiekosten ergeben sich aus dem Energieverbrauch und dem mittleren Energiepreis, d. h. aus dem aktuellen Energiepreis multipliziert mit dem Mittelwertfaktor. Beispielsweise bedeutet eine angenommene nominale Teuerungsrate von 6 % eine reale mittlere Verteuerung für Energie von 3 % pro Jahr. Die Wartungs- und Unterhaltskosten werden aufgrund der nachgewiesenen Herstellerangaben ermittelt bzw. aus den Wartungsverträgen übernommen.

Die Kapitalkosten ergeben sich aus den Investitionen, abzüglich der evtl. Zuschüsse, z. B. in Form von Fördergeldern, multipliziert mit dem entsprechenden Annuitätsfaktor. Für den Kapitalzinssatz ist die Art der Finanzierung ausschlaggebend. Hierbei ist bei einer Eigenfinanzierung der Zinssatz für die Eigenkapitalverzinsung sowie für die Fremdfinanzierung der Zinssatz für das Fremdkapital zugrunde zu legen.

Für den in der Praxis häufigsten Fall einer Mischfinanzierung muss der gewichtete Mittelwert der jeweiligen Annuitäten herangezogen werden. In diesem Fall müssen jedoch noch die evtl. Aufwendungen für Versicherungen, Verwaltungskosten, etc. hinzu addiert werden.

Demgegenüber sind die Zinsvergünstigungen, Abschreibungsmöglichkeiten sowie die steuerlichen Absetzbarkeiten, etc. zu subtrahieren. Bei Umbauten wird lediglich der Kostenanteil betrachtet, der sich hinsichtlich des Energieverbrauchs als wirksam erweist. Hierbei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass die Kosten, die bei jeder Erneuerung anfallen, nicht der Energieeinsparinvestition zugerechnet werden. So sind z. B. im Falle einer Fassadenerneuerung die Erneuerungskosten von den Gesamtkosten für die Außenwanddämmung zu subtrahieren. Andererseits sind bei einem erforderlichen Auswechseln der Fenster nur die Mehrkosten für eine Wärmeschutzverglasung zu veranschlagen.



## 2.0 Regelwerke

### 2.1 Begriffsbestimmungen, Definitionen

#### 2.1.1 Normen und Richtlinien in der Europäischen Gemeinschaft

Bei den mit EN, DIN EN und bei den mit DIN EN in Verbindung DIN VDE gekennzeichneten Ausgaben handelt es sich nicht um Richtlinien, sondern um Normen. So handelt es sich z. B. bei den EU-Richtlinien 98/37/EG um die Maschinenrichtlinien oder bei der 73/23/EWG um die Niederspannungsrichtlinie. Eine Unterscheidung ist insofern äußerst wichtig, da sich die Normen und EU-Richtlinien sowohl in ihrem sachlichen Inhalt als auch in ihrer rechtlichen Bedeutung erheblich unterscheiden. Zudem hat ein Verstoß gegen die Normen oder EU-Richtlinien auch sehr unterschiedliche Auswirkungen.

Der deutsche Begriff für eine Richtlinie ist durch ein sehr breites Spektrum gekennzeichnet, weil hier auch solche Regelwerke umfasst werden, denen die juristische Bedeutung der EU-Richtlinien nicht zukommt. Dieses bedeutet aber: Wenn der Anwender auch in der Praxis im täglichen Sprachgebrauch nicht so konsequent mit den Begriffen verfährt, so ist es dennoch wichtig zu wissen was gemeint ist.

Die EU-Richtlinien werden von der EU-Kommission erlassen und sämtliche EU-Mitgliedstaaten sind vertraglich verpflichtet diese innerhalb einer bestimmten Frist in ihrem Land unverändert in einer juristisch verbindlichen Form zu übernehmen, d.h. sie werden so zu einem Gesetz.

Auf Deutschland bezogen, werden die EU-Richtlinien somit Bestandteil des deutschen öffentlichen Rechts. Ein Verstoß bedeutet gleichermaßen eine Gesetzesverletzung und kann entsprechend geahndet werden, auch ohne dass ein Schaden aufgetreten ist.

#### 2.1.2 Nationales Recht (Bundesrecht)

- Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz (EnEG))
- Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung (EnEV))
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 13 der EnEV (AVV Energiebedarfsausweis)
- Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV)
- Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG).

#### 2.1.3 Landesrecht

Nach dem aktuellen Stand der Bundesländer.

## 2.2 Regelwerksystematik

Zum richtigen Verständnis der Regelwerke ist es erforderlich die Begriffe und Beziehungen zu den unterschiedlichen Regelwerken sowie deren Wertigkeit untereinander zu kennen.

### 2.2.1 Normenkenntnis als Notwendigkeit

Die Normen stellen sich auch als ein für den jeweiligen Anwender erforderliches Rüstzeug im Wettbewerb dar. Bei der Missachtung von Sicherheitsnormen kann es z. B. zu strafrechtlichen und zivilrechtlichen Verfahren kommen. Hier gilt der juristische Grundsatz: *»Unkenntnis schützt vor Strafe nicht«*. Um nicht Gefahr zu laufen, ist es daher notwendig, den aktuellen Stand der Normen zu kennen. Die Kenntnis des Normenstandes eröffnet zudem die Vorteile, dass

- die Leistungen nicht überteuert angeboten werden, weil die normativen Anforderungen abgesenkt wurden
- die Leistungen nicht vollständig bezahlt zu bekommen, weil nur die Mindestanforderungen vertraglich vereinbart waren
- teure Nachrüstung vornehmen zu müssen, die zu Lasten des Auftragnehmers gehen, da Normen nicht eingehalten wurden
- ferner aufgrund von Personen- oder Sachschäden strafrechtliche oder zivilrechtliche Probleme aufgrund einer mangelnden Sicherheit drohen, weil nur die normativen Anforderungen erhöht wurden.

Der Aufwand der Normenarbeit wird insofern durch den späteren Nutzen belohnt. Voraussetzung ist allerdings, dass die Anwender auch Normen erhalten, die anwenderfreundlich und lesbar sind.

Das Ziel der Normenarbeit ist es daher Probleme zu verhindern und Zeit zu sparen, d. h., dass letztlich auch der Nutzen der Normung indirekt Geld spart.

### 2.2.2 Entstehung der Normen

Beim Hinweis »Stand der Technik« handelt es sich insofern quasi um ein Vorstadium der anerkannten Regel der Technik. Der Stand der Technik basiert zwar auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen, muss aber noch nicht einer Mehrheit der Fachleute bekannt sein. Erst wenn die Mehrheit der repräsentativen Fachleute hieraus eine »technische Festlegung« dokumentiert, wird daraus eine »anerkannte technische Regel«. Da der Begriff »Mehrheit repräsentativer Fachleute« weitläufig zu verstehen ist, kann hierzu auch keine spezifizierte Aussage getroffen werden. Aufschlüsse hierzu sind allerdings in der DIN EN 45020 zum Begriff »normatives Dokument« zu finden:

*»Ein normatives Dokument [...] wird zum Zeitpunkt seiner Annahme als [...] Anerkannte Regel der Technik anzusehen sein, wenn es in Zusammenarbeit der betroffenen Interessen durch Umfrage- und Konsensverfahren erzielt wurde«.*

Der Begriff »normatives Dokument« ist zwar auch wieder weitläufig, erfüllt jedoch bei allen DIN-, EN-, VDE-, IEC-Normen, etc. den Anspruch, da sie von einer Gruppe von Fachleuten in einem öffentlichen Konsensverfahren erstellt wurden.

An der Normenarbeit kann sich jeder beteiligen der sich für kompetent hält, d. h. bei der Erarbeitung des Normvorschlages, bei dem nachfolgenden öffentlichen Einspruchsverfahren und/oder bei späteren Überarbeitungen der Norm mit zu wirken. Die Anmerkung sagt andererseits auch sehr deutlich aus, dass eine Norm streng genommen nur zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung als eine aktuelle anerkannte Regel der Technik anzusehen ist. Insofern kann sie gegebenenfalls vom Stand der Technik überholt werden.

### 2.2.3 Die Bedeutung des Farbdrucks bei der Normung

Bei den auf weißem Papier gedruckten DIN-Normen (Bestimmungen) handelt es sich um die verbindliche Fassung der Normung. Eine Vornorm (V) beinhaltet das Ergebnis der Normungsarbeit innerhalb der einzelnen Fachgremien, dass z. B. aufgrund der noch vorhandenen Vorbehalte o. ä. Argumente derzeit, d. h. in der Übergangsphase noch nicht als Norm herausgegeben wird. Demgegenüber werden die nationalen Normenentwürfe (E) auf gelbem Papier und die internationalen Normenentwürfe, z. B. die Europäische Norm (prEN) auf rosa-rotem Papier gedruckt. Die offiziellen Entwürfe (Gelbdruck) dienen zur Information der Normenanwender. Die »Gelbdrucke« sollen den Fachleuten und Fachkreisen Gelegenheit zur Meinungsäußerung hinsichtlich der geplanten Änderungen geben. Zu diesem Zeitpunkt können noch Einsprüche eingelegt werden und es kann bereits auch für den Fall danach verfahren werden, dass die neuen Festlegungen als gut und richtig betrachten. Um hier jedoch eine Rechtssicherheit zu erhalten, muss gegenüber dem Auftraggeber schriftlich begründet und verantwortet werden, warum sich der Auftragnehmer an die im Entwurf formulierte Vorgabe orientiert hat.

Bei sämtlichen Diskussionen über die Gültigkeit der Normenvorgaben auf Basis der unterschiedlich gefärbten Papieren sollte der Auftragnehmer bzw. der Ausführende nicht übersehen, dass stets der Auftraggeber (Anwender) das letzte Wort hat, nach welcher Normenfassung die Planung und Ausführung erfolgen soll. Dieses betrifft auch jede Entscheidung des Auftraggebers, ob der Ausführende nach dem, wie es im »Weißdruck« steht verfahren soll oder nicht.

### 2.2.4 Gesetzeslage der Normung

Bei den Normen handelt es sich im Gegensatz zu EU-Richtlinien um keine Gesetze, d. h. es gibt keine gesetzliche Grundlage bestimmte Normen anzuwenden. Die Anwendung von Normen basiert daher auf freiwilliger Basis. Der Ausführende darf insofern praktisch frei entscheiden, ob und welche Normen er anwendet oder dieses auch mit seinem Kunden vertraglich vereinbart. Dieser Grundsatz hat für sämtliche Normen, gleichgültig ob VDE-, DIN-, EN-, IEC- oder ISO-Normen und ist weltweite verbindlich. Dies bedeutet aber andererseits nicht, dass die Normen von Planern, Ausführenden, etc. unbeachtet bleiben dürfen, sondern es sprechen viele gute Gründe für eine Anwendung der Normen.

In den Gesetzen, Verordnungen, Durchführungs-Verordnungen, Unfallverhütungsvorschriften, etc. wird in der Regel vorgeschrieben, dass die Produkte entsprechend dem »Stand der Technik« oder nach den »Anerkannten Regeln der Technik« erstellt werden müssen. Hierbei handelt es sich dann wieder um eine gesetzliche Forderung, auch wenn diese nicht klar präzisiert wird. Eine genaue Definition dieser Begriffe wird in DIN EN 45020 wiedergegeben. Dementsprechend wird hier definiert:

*»Stand der Technik« – »ein entwickeltes Stadium der technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, [...] basierend auf den diesbezüglichen gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung«*  
und

*»Anerkannte Regel der Technik« – »eine technische Festlegung, die von einer Mehrheit repräsentativer Fachleute als Wiedergabe des Standes der Technik angesehen wird.«*

### 2.2.4.1 Anerkannte Regel der Technik

Unter dem Begriff »anerkannte Regel der Technik« wird das Merkmal einer allgemeinen Anerkennung in Theorie und Praxis umschrieben, wobei es hierbei sekundär ist, ob sich die Regel in ihrer praktischen Umsetzung als bequem oder auch Kosten sparend erweist. Zu beachten ist jedoch, dass nicht jede technische Regel mit einer »anerkannten Regel der Technik« gleichzusetzen ist. Einerseits kann aufgrund ihres Zustandekommens auch behauptet werden, dass der Beweis des ersten Anscheins dafür spricht, dass die DIN-Normen (VDE-Bestimmungen) analog den allgemein anerkannten Regeln der Technik widerspiegeln, da diese Normen aufgrund einer intensiven Gemeinschaftsarbeit von Experten – bei Europeanormen auch aus den anderen CENELEC-Mitgliedsländern – mit hohem technischen Sachverstand erstellt wurden. Im Zweifels- oder Streitfall entscheiden aber stets die Gerichte, gestützt auf ein entsprechendes Sachverständigengutachten. Wenn andererseits eine »Regel der Technik« im juristischen Sinne noch nicht oder nicht mehr allgemein, d. h. von der übergroßen Mehrheit angewendet wird, dann besitzt sie entweder noch nicht oder inzwischen nicht mehr den Statuts, einer anerkannte Regel der Technik.

### 2.2.4.2 Stand der Technik

Bei der Definition »Stand der Technik« liegt analog zu »anerkannte Regeln der Technik« ein bestimmter Rechtsbegriff vor, der im konkreten Fall einer juristischen Ausführung bedarf.

Bezogen auf das Bundesimmissionsschutzgesetz wurde seitens des Gesetzgebers ursprünglich definiert:

*»[Als] Stand der Technik [...] wird ein fortschrittliches Entwicklungsverfahren für Einrichtungen oder Betriebsweise von Anlagen oder Anlagenteilen definiert, das die praktische Eignung einer Maßnahme gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt sind.«*

Daraus folgt: Die »allgemein anerkannten Regeln der Technik« bringen das allgemein eingeführte sowie bewährte Fachwissen zur Geltung. Demgegenüber stellt der Stand der

Technik das noch nicht allgemein eingeführte, bei nur wenigen Fachleuten verfügbare Fachwissen dar.

Beim »Stand der Technik« handelt es sich um einen fortschrittlichen Entwicklungsstand, der auf den anerkannten Regeln der Technik aufbaut und dessen Erprobung auch schon eine Eignung für die Praxis ergeben hat. Im Gegensatz zu den anerkannten Regeln der Technik fehlt hier allerdings noch das Merkmal, dass sich dieser Entwicklungsstand schon so weit in Theorie und Praxis durchgesetzt hat, dass er überwiegend vorherrscht, d. h. daher: *»er ist noch nicht zur Regel geworden«*.

### 2.2.4.3 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Definition »Stand von Wissenschaft und Technik« trägt den Status der Fortschrittlichkeit in sich, d. h. insofern des technischen Machbaren. Seitens des Bundesverfassungsgerichts sind die drei vorgenannten Rechtsbegriffe vergleichbar mit den Sprossen einer Leiter zu verstehen.

Der »Stand der Technik« stellt die nächst höhere Sprosse dar. Die »anerkannten Regeln der Technik« bilden die unterste Sprosse; auf diese Regeln kann, bzw. sollte sich jeder praktisch einstellen. Derjenige, der die höchste Sprosse, d. h. den »Stand von Wissenschaft und Technik« erreichen will, muss daher auch wissenschaftlich gesicherte technische Spitzenleistungen vorweisen können.

### 2.2.4.4 Einhaltung der Normen und Vorschriften

#### Verantwortungsbereich

Die Vorgesetzten müssen Normen und Vorschriften einhalten und haben nach den berufs-genossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft die Pflicht sich z. B. an die BGV A2 zu halten.

Eine fachgerechte Durchführung von Revisionsarbeiten wird von den Fachfirmen festgelegt und ist von den Fachkräften mit festgelegten Tätigkeiten durchzuführen. Die Verantwortung liegt natürlich bei der verantwortlichen Meister, staatlich geprüfte Techniker oder Betriebsingenieur. Die Fachabteilung hat sich mit der verantwortlichen Fachkraft dem Meister, Techniker oder Ingenieur vor dem Unternehmen zu verantworten. Bei einer groben Fahrlässigkeit gilt im juristischen Sinne sogar die Privathaftung. Die Fachabteilung kann interne Aktennotizen – mit Mängelangaben – an die Geschäftsführung des Unternehmens senden, die dann tätig werden muss. Die Haftung geht für den Fall, dass die Mängel nicht beseitigt werden an den Unternehmer über.

Im Sinne der VDE, DIN Norm der BGV A2 haben die Fremdfirmen (Subunternehmer) ebenfalls eine verantwortliche Fachkraft zu benennen, die fachgerecht und meisterlich vor Ort arbeitet. Für die erbrachten Dienstleistungen erstellt die Fachkraft einen Übergabebericht mit Prüf- und Abnahmeprotokoll. Die tätigen Fremdfirmen tragen hierbei für ihre Lieferungen und Leistungen (Haftplichtversicherung) die Gesamtverantwortung. Die Qualität und die Arbeitssicherheit liegt bei der Fremdfirma, die ihr Unternehmen beauftragt hat – siehe auch ISO 9000/9001 Qualitätsmanagement.



## 2.3 Richtlinien und Verordnungen

### 2.3.1 VDI-Richtlinien (Technische Regeln)

Bei den VDI-Richtlinien handelt es sich um allgemein anerkannte Regeln der Technik, die ihre Legitimationen dadurch erhalten, dass sie auf Basis naturwissenschaftlicher Erkenntnisse entwickelt und erstellt wurden bzw. durch praktische Erfahrung erprobt sind und von unparteiischen Fachleuten aufgestellt werden. Aus diesem Grund gelten diese Richtlinien als allgemeiner Handlungsmaßstab für das technische Handeln. Obwohl die VDI-Regeln als Normen für das technische Handeln im Rechtsverkehr fungieren, gehören sie nicht zu den Rechtsgrundsätzen.

Die VDI-Regeln entsprechen im juristischen Sinne den privaten Regelungen mit Empfehlungsscharakter. Da sich die VDI-Richtlinien durch besonders qualifizierte technische Erfahrungssätze auszeichnen, kommt ihnen bei Gericht die Bedeutung eines »objektiven Sachverständigengutachtens« zu. Aus diesem Grund unterliegen die VDI-Richtlinien auch der richterlichen Nachprüfung, gegebenenfalls unter Anhörung eines Sachverständigen und sind daher auf keinem Fall schematisch anzuwenden. Eine Verpflichtung zur Anwendung der VDI-Richtlinien kann entweder durch einen Vertrag oder durch das Gesetz begründet werden. Andererseits besteht die Verpflichtung, die allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik anzuwenden, auch ohne eine ausdrückliche Bezugnahme in einem Gesetz, wenn es sich beispielsweise um eine Norm in Form einer Generalklausel handelt, die eine Gefährdung durch ein bestimmtes technisches Handeln verbietet, ohne dass die Mittel benannt werden, mit denen die Gefahr abgewehrt werden soll.

### 2.3.2 VDE-Bestimmungen

Die VDE-Bestimmungen sind Empfehlungen und erhalten durch Gesetz (Gerätesicherheitsgesetz, Allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung, Unfallverhütungsvorschrift u. a.) ihre Verbindlichkeit. Gleichzeitig wird dem Ausführenden durch diese Gesetze aber auch erlaubt, die Sicherheit auch auf eine andere, ebenso wirksame Weise herzustellen. Insofern bleibt es dem Ausführenden auch vorbehalten, ob er ganz anders verfahren möchte, als in der Norm angegeben, oder sich bereits nach Normenentwürfen richtet oder nicht.

### 2.3.3 VdS-Richtlinien

Der Verband der Sachversicherer (VdS) heute der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GVU) erlässt eigene Richtlinien. Die VdS-Richtlinien haben zwar keine Verankerung im Baurecht, können jedoch in den Fällen von Bedeutung sein, wenn es sich um die Gewährung eines Prämienrabattes bei der Feuerversicherung von Industriegebäuden handelt.

## 2.3.4 Sonstige Richtlinien und Merkblätter

Hierzu fallen:

- Technische Regeln, wie DVGW, TAB, TA-Luft, TRB, TRD, TRGI, TRF  
VDMA-Einheitsblätter
- Ergänzende Bestimmungen und Merkblätter, wie Merkblatt ATV-A251 (Kondensat aus Brennwertkesseln) oder AGFW (Wärmemessung und Wärmeabrechnung), ATD, ATV und DWA.

## 2.4 Verzeichnis der Normen in Kapitel 1 bis 5

### Kapitel 1 Grundlagen

#### **DIN 276-1, Norm, 2006-11**

Kosten im Bauwesen; Teil 1: Hochbau

#### **DIN 276-1 Berichtigung 1, Norm, 2008-12**

Kosten im Bauwesen; Teil 1: Hochbau

#### **DIN 4108-2, Norm, 2003-07**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

#### **DIN 4108 Beiblatt 2, Norm, 2006-03**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele

#### **DIN 4108-2, Norm, 2001-03**

Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

#### **DIN 4108-3, Norm, 2001-07**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung

#### **DIN 4108-3 Berichtigung 1, Norm, 2002-04**

Berichtigungen zu DIN 4108-3:2001-07

#### **DIN V 4108-4, Norm, 2007-06**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 4: Wärme- und feuchteschutz-technische Bemessungswerte

#### **DIN V 4108-6, Vornorm, 2003-06**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs

**DIN V 4108-6 Berichtigung 1, Vornorm, 2004-03**

Berichtigungen zu DIN V 4108-6:2003-06

**DIN 4108-7, Norm, 2011-01**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele

**DIN 4108-10, Norm, 2008-06**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe; Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe

**DIN V 4701-12 Berichtigung 1, Vornorm, 2008-06**

Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen im Bestand; Teil 12: Wärme-erzeuger und Trinkwassererwärmung; Berichtigungen zu DIN V 4701-12:2004-02

**PAS 1027, Technische Regel, 2004-02**

Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen im Bestand; Ergänzung zur DIN 4701-12 Blatt 1

**DIN V 18599-1, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger

**DIN V 18599-2, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen

**DIN V 18599-10, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten

*DIN EN*

**DIN EN 12831, Norm, 2003-08**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast; Deutsche Fassung EN 12831: 2003

**DIN EN 12831 Beiblatt 1, Berichtigung 1, 2010-11**

Heizsysteme in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast; Nationaler Anhang NA, Berichtigung zu DIN EN 12831 Beiblatt 1:2008-07

**DIN EN 15217, Norm, 2007-09**

Energieeffizienz von Gebäuden; Verfahren zur Darstellung der Energieeffizienz und zur Erstellung des Gebäudeenergieausweises; Deutsche Fassung EN 15217:2007

**DIN EN 15316-1, Norm, 2007-10**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 1: Allgemeines; Deutsche Fassung EN 15316-1:2007

**DIN EN 15459, Norm, 2008-06**

Energieeffizienz von Gebäuden; Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Energieanlagen in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 15459:2007

**DIN EN 15603, Norm, 2008-07**

Energieeffizienz von Gebäuden; Gesamtenergiebedarf und Festlegung der Energiekennwerte; Deutsche Fassung EN 15603:2008

**DIN EN 16001, Norm, 2009-08**

Energiemanagementsysteme; Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung EN 16001:2009

*DIN EN ISO*

**DIN EN ISO 13786, Norm, 2008-04**

Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen; Dynamisch-thermische Kenngrößen; Berechnungsverfahren (ISO 13786:2007); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2007

**DIN EN ISO 13790, Norm, 2008-09**

Energieeffizienz von Gebäuden; Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008

**DIN EN ISO 16484-1, Norm, 2011-03**

Systeme der Gebäudeautomation (GA); Teil 1: Projektplanung und -ausführung (ISO/DIS 16484-1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 16484-1:2010

**DIN EN ISO 16484-2, Norm, 2004-10**

Systeme der Gebäudeautomation (GA); Teil 2: Hardware (ISO 16484-2:2004); Deutsche Fassung EN ISO 16484-2:2004

**DIN EN ISO 16484-3, Norm, 2005-12**

Systeme der Gebäudeautomation (GA); Teil 3: Funktionen (ISO 16484-3:2005); Deutsche Fassung EN ISO 16484-3:2005

**DIN EN ISO 16484-5, Norm, 2011-03**

Systeme der Gebäudeautomation (GA); Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll (ISO 16484-5:2010); Englische Fassung EN ISO 16484-5:2010, nur auf CD-ROM

**DIN EN ISO 16484-6, Norm, 2009-11**

Systeme der Gebäudeautomation (GA); Teil 6: Datenübertragungsprotokoll – Konformitätsprüfung (ISO 16484-6:2009); Englische Fassung EN ISO 16484-6:2009, nur auf CD-ROM

**Kapitel 3 Wärmetechnik**

**DIN V 18599-5, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen

*Trinkwassererwärmung*

**DIN V 18599-8, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen

**DIN EN 15316-3-3, Norm, 2008-06**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 3-3: Trinkwassererwärmung, Erzeugung; Deutsche Fassung EN 15316-3-3:2007

*Wärmeerzeuger*

**DIN EN 15316-4-7, Norm, 2009-02**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 4-7: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Biomassewärmeerzeuger; Deutsche Fassung EN 15316-4-7:2008

**DIN EN 15332, Norm, 2008-01**

Heizkessel – Energetische Bewertung von Warmwasserspeichersystemen; Deutsche Fassung EN 15332:2007

*Wärme- und Kälteedämmung*

**DIN 4140, Norm, 2008-03**

Dämmarbeiten an betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der technischen Gebäudeausrüstung – Ausführung von Wärme- und Kälteedämmungen

**Kapitel 3.2 Komponenten-Optimierung**

**DIN EN 1264-2, Norm, 2009-01**

Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung; Teil 2: Fußbodenheizung; Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden; Deutsche Fassung EN 1264-2:2008

**DIN EN 1264-5, Norm, 2009-01**

Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung; Teil 5: Heiz- und Kühlsysteme in Fußböden, Decken und Wänden; Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühleistung; Deutsche Fassung EN 1264-5:2008

**DIN EN 15377-1, Norm, 2009-02**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium; Teil 1: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. -Kühleistung; Deutsche Fassung EN 15377-1:2008

*Gebäudemanagement*

**DIN EN 15232, Norm, 2007-11**

Energieeffizienz von Gebäuden; Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement; Deutsche Fassung EN 15232:2007

**DIN EN 15316-4-7, Norm, 2009-02**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 4-7: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Biomasse-wärmeerzeuger; Deutsche Fassung EN 15316-4-7:2008

**DIN EN 15377-1, Norm, 2009-02**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium; Teil 1: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. -Kühleistung; Deutsche Fassung EN 15377-1:2008

**Kapitel 3.3 Brennwerttechnologie**

**DIN 4716-2, Norm, 2003-04**

DVGW VP 114, Technische Regel, 1996-07

Neutralisationseinrichtungen für Gasfeuerstätten – Anforderung und Prüfung

**Kapitel 3.4 Brennstoffzellentechnologie**

**DIN EN 62282-3-1; VDE 0130-301:2008-02, Norm, 2008-02**

Brennstoffzellentechnologien; Teil 3-1: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme – Sicherheit (IEC 62282-3-1:2007); Deutsche Fassung EN 62282-3-1:2007

**DIN IEC 62282-3-1; VDE 0130-3-201:2010-05, Norm-Entwurf, 2010-05**

Teil 3-1: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesystem-Sicherheit (IEC 105/251/CD:2009)

**DIN EN 62282-3-3; VDE 0130-303:2008-10, Norm, 2008-10**

Brennstoffzellentechnologien; Teil 3-3: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme – Errichtung (IEC 62282-3-3:2007); Deutsche Fassung EN 62282-3-3:2008

**DIN EN 62282-3-201; VDE 0130-3-201:2011-01, Norm-Entwurf, 2011-01**

Brennstoffzellentechnologien, Teil 3-201: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme, Leistungskennwerteprüfverfahren für kleine Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen-Energiesysteme (IES 105/275/CD:2010)

**Kapitel 3.5 Kraft-Wärme-Kopplung**

**DIN 4709, Norm-Entwurf, 2011-11**

Bestimmung des Normnutzungsgrades für Mikro-KWK-Geräte bis 70 kW Nennwärmebelastung

**DIN V 18599-9, Vornorm, 2007-02**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

**DIN EN 13203-4, Norm-Entwurf, 2010-11**

Gasbefeuerte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch; Teil4: Bewertung des Energieverbrauchs von Gasgeräten mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Warmwasserbereitung und Stromerzeugung, die eine Nennwärmebelastung von 70 kW, eine elektrische Leistung von 50 kWe und eine Speicherkapazität von 550 Liter Wasser nicht überschreiten; Deutsche Fassung prEN 13203-4:2010

**DIN EN 15316-4-4, Norm, 2007-10**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 4-4: Wärmeerzeugungssysteme, gebäudeintegrierte KWK-Anlagen; Deutsche Fassung EN 15316-4-4:2007

**DIN EN 15316-4-6, Norm, 2009-07**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 4-6: Wärmeerzeugungssysteme, photovoltaische Systeme; Deutsche Fassung EN 15316-4-6:2007

**Kapitel 5 Wärmepumpentechnologie**

**DIN 8900-6, Norm, 1987-12**

Wärmepumpen; Anschlußfertige Heiz-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern; Meßverfahren für installierte Wasser/Wasser-, Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen

**DIN 8901, Norm, 2002-12**

Kälteanlagen und Wärmepumpen – Schutz von Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen und Prüfung

**DIN 8930-2, Norm-Entwurf, 2005-10**

Kälteanlagen und Wärmepumpen – Terminologie – Teil 2: Allgemeines

**DIN 8930-5, Norm, 2003-11**

Kälteanlagen und Wärmepumpen – Terminologie – Teil 2: Contracting

**DIN EN 378-2/A1, Norm-Entwurf, 2011-10**

Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 4: Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung; Deutsche Fassung EN 378-4:2008/FprA1:2011

**DIN EN 12102, Norm, 2008-09**

Klimageräte, Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen und Entfeuchter mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und Kühlung – Messung der Luftschallemissionen – Bestimmung des Schallleistungspegels; Deutsche Fassung 12102:2008

**DIN EN 12309-2, Norm, 2000-06**

Gasbefeuerte Absorptions- und Adsorptions-Klimageräte und/oder Wärmepumpengeräte mit einer Nennwärmebelastung nicht über 70 kW; Teil 2: Rationelle Energieanwendung; Deutsche Fassung EN 12309-2:2000

**DIN EN 13313, Norm, 2011-02**

Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sachkunde von Personal; Deutsche Fassung EN 13313:2010

**DIN EN 14825, Norm-Entwurf, 2010-06**

Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung; Prüfung und Leistungsmessung unter Teilastbedingungen; Deutsche Fassung prEN 14825:2010

**DIN EN 15316-4-2, Norm, 2008-09**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen; Teil 4-2: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Wärmepumpensysteme; Deutsche Fassung EN 15316-4-2:2008

**DIN EN 15450, Norm, 2007-12**

Heizungsanlagen in Gebäuden; Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen; Deutsche Fassung EN 15450:2007

**DIN EN 15879-1, Norm, 2011-05**

Prüfung und Leistungsbemessung von Direktaustausch-Erdreichwärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und/oder -kühlung; Teil 1: Direktaustausch/Wasser-Wärmepumpe; Deutsche Fassung prEN 15879-1:2008

**ISO 13261-1, Norm, 1998-04**

Bestimmung des Schalleistungspegels von Luftkonditionierern und Luft-Wärmepumpen; Teil 1: Geräte ohne Kanalanschluss für die Aufstellung im Freien



**ISO 13261-2, Norm, 1998-04**

Bestimmung des Schalleistungspegels von Luftkonditionierern und Luft-Wärmepumpen;  
Teil 2: Geräte ohne Kanalanschluss für die Aufstellung in Räumen

## 2.5 Verzeichnis der Richtlinien und Verordnungen in Kapitel 1 bis 5

### Kapitel 1 Grundlagen

**BImSchG, Gesetz, 2002-09-26**

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG); mit Änderung durch Gesetz vom 26. November 2003 (BGBl. I vom 27. November 2003, S. 2308), Gesetz vom 6. Januar 2004 (BGBl. I vom 9. Januar 2004, S. 2), Gesetz vom 8. Juli 2004 (BGBl. I vom 14. Juli 2004, S. 1578), Gesetz vom 22. Dezember 2004 (BGBl. I vom 28. Dezember 2004, S. 3704), Gesetz vom 24. Juni 2005 (BGBl. I vom 29. Juni 2005, S. 1794), Gesetz vom 25. Juni 2005 (BGBl. I vom 30. Juni 2005 S. 1865)

**EnEV, Ausgabe: 10/2009**

Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden

**EEG, Gesetz, 2011-05-01**

Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften (Artikel 1 Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), Artikel 2 Änderung des Projekt-Mechanismen-Gesetzes, Artikel 3 Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes, Artikel 5 Änderung des Treibhausgas-Emissionsgesetzes); Ursprüngliche Fassung vom 29. März 2000 (BGBl. I, S. 305); Inkrafttreten am 1. April 2000; Letzte Neufassung vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I, S. 2074); Inkrafttreten der Neufassung am 1. Januar 2009; Letzte Änderung durch Art. 1 G vom 12. April 2011 (BGBl. I, S. 619); Inkrafttreten der letzten Änderung am 1. Januar 2011 bzw. 1. Mai 2011 (Art. 6 vom 12. April 2011)

**EEWärmeG, Gesetz, 2011-05-01**

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG) Datum des Gesetzes: 7. August 2008 (BGBl. I, S. 1658); Inkrafttreten am 1. Januar 2009; Letzte Änderung durch Art. 2 G vom 12. April 2011 (BGBl. I, S. 619, 623 ff.); Inkrafttreten der letzten Änderung am 1. Mai 2011 bzw. 1. November 2011 (Art 6 G vom 12. April 2011)

**BiomasseV, Verordnung, 2001-06-21**

Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung – BiomasseV); Die Biomasseverordnung vom 21. Juni 2001 (BGBl. I, S. 1234) wurde durch Artikel 1 der Verordnung vom 9. August 2005 (BGBl. I, S. 2419) geändert

**Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV)**

Merkblatt AMEV-Energieverbrauchskennwerte: Ermittlung spezifischer Energieverbrauchswerte zum Nachweis von Energie- und Kosteneinsparungen

**VDI 2055 Blatt 1, Technische Regel, 2008-09**

Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung; Berechnungsgrundlagen

**VDI 3807 Blatt 1, Technische Regel, 2007-03**

Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude; Grundlagen

**VDI 3807 Blatt 2, Technische Regel, 1998-06**

Energieverbrauchskennwerte für Gebäude; Heizenergie- und Stromverbrauchswerte

**VDI 4600, Technische Regel, 1997-06**

Kumulierter Energieaufwand; Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden

**VDI 4600 Blatt 1, Technische Regel, Entwurf, 1998-06**

Kumulierter Energieaufwand; Beispiele

**VDI 4650 Blatt 1, Technische Regel, 2009-03**

Berechnungen von Wärmepumpen – Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen; Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung

**VDI 4660 Blatt 2, Technische Regel, 2003-05**

Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung

**VDI 4710 Blatt 1, Technische Regel, 2008-12**

Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung – Außereuropäische Klimadaten

**VDI 4710 Blatt 2, Technische Regel, 2007-05**

Meteorologische Daten in der Technischen Gebäudeausrüstung – Gradtage

**VDI 6028 Blatt 1, Technische Regel, 2002-02**

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Grundlagen

**VDI 6028 Blatt 2, Technische Regel, 2004-06**

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Anforderungsprofile und Wertungskriterien für die Sanitärtechnik

**VDI 6028 Blatt 3, Technische Regel, 2002-11**

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Anforderungsprofile und Wertungskriterien für die Heiztechnik

**VDI 6028 Blatt 6, Technische Regel, Entwurf, 2011-03**

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Anforderungsprofile und Wertungskriterien für die Gebäudeautomation

**Kapitel 3 Wärmetechnik**

*Wärme- und Kältedämmung*

**VDI 2055, Technische Regel, 1994-07**

Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen; Berechnungen, Gewährleistungen, Mess- und Prüfverfahren, Gütesicherung, Lieferbedingungen

**VDI 2055 Blatt 1, Technische Regel, 2008-09**

Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung; Berechnungsgrundlagen

**VDI 2067 Blatt 1, Technische Regel, 2000-09**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Grundlagen und Kostenberechnung

**VDI 2067 Blatt 10, Technische Regel, Entwurf, 1998-06**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Energiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude

**VDI 2067 Blatt 12, Technische Regel, 2000-06**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung

**VDI 2067 Blatt 20, Technische Regel, 2000-08**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen

**VDI 2067 Blatt 21, Technische Regel, 2003-05**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Energieaufwand der Nutzenübergabe – Raumlufttechnik

**VDI 2067 Blatt 22, Technische Regel, 2011-02**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Anlagen zur Trinkwassererwärmung

**VDI 2077 Blatt 3.1 Berichtigung, Technische Regel, Entwurf, 2011-02**

Verbrauchskostenerfassung für die Technische Gebäudeausrüstung; Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen; Berichtigung zur Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1:2010-12

**VDI 2310 Blatt 1, Technische Regel, 1988-10**

Zielsetzung und Bedeutung der Richtlinien Maximale Immissions-Werte

**VDI 2310 Blatt 1, Technische Regel, Entwurf, 2010-12**

Maximale Immissions-Werte; Zielsetzung und Bedeutung der Richtlinienreihe VDI 2310

**VDI 2310 Blatt 12, Technische Regel, 2004-12**

Maximale Immissions-Werte zum Schutze der Vegetation; Maximale Immissions-Konzentrationen für Stickstoffdioxid

**VDI 4656, Technische Regel, Entwurf, 2011-04**

Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen

**VDI 4680, Technische Regel, 2011-04**

Blockheizkraftwerke (BHKW); Grundsätze für die Gestaltung von Serviceverträgen

**VDI 6007 Blatt 1, Technische Regel, 2007-10**

Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden; Raummodell

**VDI 6012 Blatt 1, Technische Regel, 2003-08**

Dezentrale Energiesysteme im Gebäude; Grundlagen und Energiespeicher

**VDI 6012 Blatt 1.1, Technische Regel, Entwurf, 2010-09**

Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude; Grundlagen; Projektplanung und -durchführung

**VDI 6012 Blatt 3, Technische Regel, 2002-07**

Dezentrale Energiesysteme im Gebäude; Brennstoffzellen

**Kapitel 3.2 Komponenten-Optimierung**

**VDI 6014, Technische Regel, 2008-01**

Energieeinsparung durch Einsatz drehzahlsteuerbarer Antriebe in der Technischen Gebäudeausrüstung

**VDI 3814 Blatt 1, Technische Regel, 2009-11**

Gebäudeautomation (GA); Systemgrundlagen

**VDI 3814 Blatt 2, Technische Regel, 2009-07**

Gebäudeautomation (GA); Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln

**VDI 3814 Blatt 3, Technische Regel, 2007-06**

Gebäudeautomation (GA); Hinweise für das Gebäudemanagement; Planung, Betrieb und Instandhaltung

**VDI 3814 Blatt 4, Technische Regel, 2003-08**

Gebäudeautomation (GA); Datenpunktlisten und Funktionen; Beispiele

**VDI 3814 Blatt 5, Technische Regel, 2000-01**

Gebäudeautomation (GA); Hinweise zur Anbindung von Fremdsystemen durch Kommunikationsprotokolle

**VDI 3814 Blatt 5, Technische Regel, 2010-03**

Gebäudeautomation (GA); Hinweise zur Systemintegration

**VDI 3814 Blatt 6, Technische Regel, 2008-07**

Gebäudeautomation (GA); Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben

**Kapitel 3.3 Brennwerttechnologie**

**ATV-DVWK-A 251, Arbeitsblatt, 2003-08**

Abwassertechnische Vereinigung; Kondensate aus Brennwertkesseln

**ATV-A 115, Ausgabe: 2003-08**

Hinweise für das Einleiten von Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage

**ATV-M 251, Ausgabe: 2003-08**

Neutralisationsgrenzen

*Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.*

**DVGW-G 260, Technische Regel, 2008-05**

Gasbeschaffenheit

**TRD 509, Technische Regel, 1998-06**

Richtlinie für das Verfahren der Bauartzulassung von Dampfkesselanlagen oder deren Teilen

**TA-Luft, Ausgabe: 2006-02**

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

**VDMA 24199, Technische Regel, 2005-05**

Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwarmwasser- und Raumluftheizungsanlagen

## **Kapitel 3.4 Brennstoffzellentechnologie**

### **VDI 4682, Technische Regel, 2006-05**

Brennstoffzellen-Heizgeräte; Gestaltung von Serviceverträgen

### **VDI 6012 Blatt 1, Technische Regel, 2003-08**

Dezentrale Energiesysteme im Gebäude; Grundlagen und Energiespeicher

### **VDI 6012 Blatt 1.1, Technische Regel, Entwurf, 2010-09**

Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude; Grundlagen; Projektplanung und -durchführung

### **VDI 6012 Blatt 3, Technische Regel, 2002-07**

Dezentrale Energiesysteme im Gebäude; Brennstoffzellen

### **DVGW VP 119, Technische Regel, 2000-10**

Brennstoffzellen-Gasgeräte bis 70 kW

## **Kapitel 3.5 Kraft-Wärme-Kopplung**

### **VDI 2077 Blatt 3.1 Berichtigung, Technische Regel, Entwurf, 2011-02**

Verbrauchskostenerfassung für die Technische Gebäudeausrüstung; Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen; Berichtigung zur Richtlinie VDI 2077 Blatt 3.1:2010-12

### **VDI 4608 Blatt 1, Technische Regel, 2005-03**

Energiesysteme; Kraft-Wärme-Kopplung; Begriffe, Definitionen, Beispiele

### **VDI 4608 Blatt 2, Technische Regel, 2008-07**

Energiesysteme; Kraft-Wärme-Kopplung; Allokation und Bewertung

### **VDI 4655, Technische Regel, 2008-05**

Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen

### **VDI 4660 Blatt 1, Technische Regel, 2000-04**

Umrechnung spezifischer Emissionen bei der Energieumwandlung

### **VDI 4660 Blatt 2, Technische Regel, 2003-05**

Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung

## **Kapitel 4 Sanitärtechnik**

### **DWA-M 114, 2008-09**

Energie aus Abwasser; Wärme- und Lageenergie

## **Kapitel 5 Wärmepumpentechnologie**

### **VDI 4640 Blatt 1, Technische Regel, 2010-06**

Thermische Nutzung des Untergrundes; Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

### **VDI 4640 Blatt 2, Technische Regel, 2001-09**

Thermische Nutzung des Untergrundes; Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

### **VDI 4640 Blatt 3, Technische Regel, 2001-06**

Thermische Nutzung des Untergrundes; Unterirdische Thermische Energiespeicher

### **VDI 4640 Blatt 4, Technische Regel, 2004-09**

Thermische Nutzung des Untergrundes; Direkte Nutzungen

### **VDI 4650 Blatt 1, Technische Regel, 2009-03**

Berechnung von Wärmepumpen, Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen; Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung

## 3.0 Energetische Potenziale in der Wärmetechnik

### 3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

#### 3.1.1 Energetische Bewertung von Gebäuden nach DIN V 18599 (Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs)

Die EU-Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden wurde bis zum 04-01-2006 in nationales Recht umgesetzt. Die Bundesregierung hat zur fristgerechten Umsetzung der Richtlinie das Energieeinsparrecht umfassend novelliert. Neben den öffentlich-rechtlichen Regelungen wie z. B. der EnEV oder Förderungsmaßnahmen mussten auch ergänzende Instrumente für mehr Markt- und Verbrauchertransparenz geschaffen werden.

Parallel zur EnEV wurde auch nach der DIN V 18599 ein neues Verfahren zur Bilanzierung der inneren Wärmegewinne eingeführt. Die Wärmeverluste der Anlagenkomponenten innerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes werden nicht mehr pauschal verringert, sondern in einem gesonderten Verfahren in die Zonenbilanz eingebunden.

Hierdurch kann der Beitrag, den die anlagentechnischen Verluste zur Deckung des Heizwärmebedarfs leisten, wesentlich genauer bestimmt werden. Mit der DIN V 18599-5 können zudem die Auswirkungen eines zeitweise unterbrochenen Betriebs der Heizungsanlage bewertet werden. Zur Bestimmung der rechnerischen Laufzeit wird dabei sowohl eine Absenkung oder Abschaltung in der Nacht als auch am Wochenende berücksichtigt. Die Wärmeverluste der Wärmeerzeuger werden nach der DIN V 18599-5 brennwertbezogen ausgewiesen. Dieses Verfahren wurde deswegen erforderlich, damit das rechnerische Auftreten von negativen Verlusten bei Brennwertwärmeerzeugern in einzelnen Monaten eingebunden wird. Andererseits wird das Endergebnis gegenüber den bisherigen Berechnungsansätzen nicht verändert, weil hier die Verluste vor der primärenergetischen Bewertung in DIN V 18599-1 mit dem Verhältnis Heizwert zu Brennwert des Brennstoffs multipliziert werden.

Die Berechnung der anlagentechnischen Verluste erfolgt, wie bereits nach der DIN V 4701-10, getrennt für die Brennstoff- und Hilfsenergie. Die monatlichen Kenngrößen werden über die Belastungsgrade ermittelt. Die Ermittlung der anlagentechnischen Verluste erfolgt, analog zur DIN V 4701-10 getrennt für die Brennstoff- und Hilfsenergien. Die Bewertung der Wärmeerzeuger, die sowohl für die Warmwasserbereitung als auch für die Heizung genutzt werden, erfolgt im Zusammenhang mit den Vorgaben der DIN V 18599-5, wogegen die Abluftwärmepumpen zur Warmwassererwärmung gemeinsam mit der DIN V 18599-6 bewertet wird.

Die derzeit gültige EnEV beinhaltet die Hauptanforderung auf den Jahresprimärenergiebedarf, deren Bilanzansatz die Kriterien für die

- energetische Qualität der Gebäudehülle
- Effizienz des Heizungssystems und der Anlagen zur Warmwasserbereitung
- Bewertung der Lüftung, einschließlich der Luftdichtheit
- aktive und passive Einbeziehung der erneuerbaren Energien

vereint.



Für den Anwender sind insbesondere nachfolgend aufgeführte Teile der DIN V 18599 zu beachten:

- Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger
- Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen
- Teil 6: Endenergiebedarf von Heizsystemen
- Teil 8: Nutz- und Energiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen
- Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

### **3.1.1.1 Allgemeine Bilanzierungsverfahren: Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger (DIN V 18599-1)**

Der Teil 1 dient als Anleitung für die gesamte Vornorm und bietet einen Überblick über die Berechnungssystematik sowie allgemeine Erklärungen und Definitionen. Zudem werden im ersten Teil die allgemeine Bilanzierungsverfahren und die zentralen Bilanzgleichungen erläutert sowie ein Verfahren, wie die Zonierung eines Gebäudes durchzuführen ist, dargestellt. Ferner die Rechenregeln, wie innere Wärmequellen und die technischen Verluste der Versorgungsbereiche auf die Zonen umzulegen sind.

### **3.1.1.2 Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen (DIN V 18599-2)**

Im Teil 2 der DIN V 18599 wurde generell die Betrachtung der Wärmegewinne und Wärmeverluste erweitert und allgemein formuliert. Die feste Zuordnung von Transmissions- und Lüftungswärmeströmen zu den Wärmeverlusten bzw. von internen und solaren Wärmeeinträgen zu den Wärmegewinnen entfällt. Die allgemeinere Form unterscheidet jetzt Wärmequellen, durch die Wärme in die Gebäudezone eingebracht wird, und Wärmesenken, die der Gebäudezone Wärme entziehen. Die Wärmequellen sind allgemein die inneren Wärmequellen und die solare Einstrahlung, aber auch die Transmission und Lüftung aus angrenzenden wärmeren Bereichen. Zu den Wärmesenken zählen in der Regel die Transmission und Lüftung nach außen. Hier können aber auch die Abstrahlung nach außen oder Kältequellen im Inneren, z. B. Verteilverluste aus Kältemittelleitungen mit einbezogen werden. Das verfahren ermöglicht generell den Einbezug verschiedenster Einflüsse auf den Wärmehaushalt einer Gebäudezone und passt sich somit an die Erfordernisse verschiedenster Gebäudetypen und unterschiedlichster Nutzungen an.

Eine weitere Neuerung in der energetischen Bewertung des Gebäudes ist die Bestimmung der unregelmäßigen Wärmeeinträge des Heizsystems in Abhängigkeit vom bestehenden Bedarf und von der Systemauslastung. Analog verhält es sich in Bezug auf die Kälteeinträge oder Wärmeeinträge aus dem Kühlsystem. Die Abbildung dieser Rückkopplung wurde bisher stets nicht berücksichtigt. Stattdessen wurden die Wärmeeinträge durch Verluste des Heizsystems in der Gebäudebilanz pauschal vorgegeben. Durch das Zusammenwirken der baulichen und gebäudetechnischen Belange wurde nun die Möglichkeit geschaffen, die Wärmeeinträge bedarfsorientiert einzubeziehen. Der Heizwärme- und der Kühlbedarf werden zunächst ohne die Wärme- und Kälteeinträge des Heiz- und Kühlsystems in einer überschläglichen Bilanz

ermittelt. Abhängig von der Belastung der Heiz- und Kühlkreise können hieraus in ausreichender Genauigkeit die Verluste aus Übergabe, Verteilung und Erzeugung ermittelt werden und der in der Gebäudezone wirksame Anteil ausgewiesen werden. Unter Berücksichtigung dieser Wärme- und Kälteeinträge werden anschließend der Ausnutzungsgrad, der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf endgültig bestimmt.

Die DIN V 18599-2 bildet die Grundlage der Bilanzierung des Nutzenergiebedarfs für Heizung und Kühlung einer Gebäudezone (Heizwärme und Kühlbedarf). Die Berechnungsmethode der DIN V 4108-6 für die Nutzenergie dient hier als Basis und wurde um den Kühlbedarf erweitert.

Die Bilanzierungsgleichung des Heizwärmebedarfs wurde um eine weitere Passage erweitert, der die im »normalen« Heizbetrieb in den Bauteilen gespeicherte Wärme, die bei Heizunterbrechung (z. B. an Feiertagen, am Wochenende oder während der Urlaubszeit) abgegeben wird, berücksichtigt. Hinsichtlich der Festlegungen der Temperaturen in unbeheizten/ungekühlten Räumen wurden Präzisierungen durchgeführt. Die Temperaturen in unbeheizten Räumen können entweder über eine Bilanzierung der Wärmeeinträge und Wärmeaussträge oder vereinfacht über Temperaturkorrekturfaktoren ermittelt werden. Die Temperaturkorrekturfaktoren wurden mit den Werten in DIN V 4108-6 abgeglichen.

### 3.1.1.3 Endenergiebedarf von Heizsystemen (DIN V 18599-5)

Die DIN V 18 599-5 enthält ein Verfahren zur energetischen Bewertung von Heizsystemen. Bei der Erarbeitung konnte von der vorhandenen Methodik nach der DIN V 4701-10 ausgegangen werden. Insofern wurden die anlagentechnischen Bilanzierungsabschritte Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung beibehalten. Der Anwendungsbereich der DIN V 18599-5 wurde jedoch wesentlich weiter gefasst, d. h. es gibt für die Praxis fast keine Einschränkungen hinsichtlich der Gebäudenutzung oder des bauseitigen Heizwärmebedarfs. Die Anwendbarkeit für den Bestand macht jedoch die Aufnahme von Standardwerten für ältere Heizsysteme erforderlich, so z. B. die energetischen Kennwerte der alten Wärmeerzeuger oder die U-Werte der bestehenden Verteilungsrohrleitungen.

Die DIN V 18599-5 beinhaltet ein ausführliches Rechenverfahren. Eine vereinfachte Darstellung in Form von Diagrammen oder Tabellen ist aufgrund der zu berücksichtigenden unterschiedlichen Rand- und Nutzungsbedingungen und der Berechnung in monatlichen Zeitintervallen nicht mehr möglich. Zudem werden die Wärmeverluste von Anlagenkomponenten innerhalb der thermischen Gebäudehülle nicht mehr pauschal verringert, sondern in einem gesonderten Verfahren in die Zonenbilanz eingebunden. Insofern kann der Beitrag, der die anlagentechnischen Verluste zur Deckung des Heizwärmebedarfs leistet, wesentlich genauer ermittelt werden. Allerdings ist hier eine energetische Bewertung von Veränderungen der Anlagentechnik ohne eine erneute Berechnung der Gebäudebauphysik nicht mehr möglich. Die wesentlichen Änderungen ergeben sich für die Wärmeübergabe. Das Berechnungsverfahren für diesen Bilanzabschnitt ist sehr umfangreich und liefert grundsätzlich höhere Verlustgrößen gegenüber den Ergebnissen der bisher in der Praxis ermittelten Werte. Mit der DIN V 18599-5 können ferner die Auswirkungen eines intermittierenden Betriebs der Heizungsanlage bewertet werden. Zur Bestimmung der rechnerischen Laufzeit wird sowohl eine Absenkung oder Abschaltung in der Nacht als auch am Wochenende berücksichtigt.

Insofern wird hier eine Ungenauigkeit im bisherigen Verfahren der EnEV beseitigt, die zwar bauseitig eine Nachtabenkung berücksichtigen kann, anlagentechnisch jedoch stets von einem kontinuierlichen Betrieb ausgeht.

Die neuen Verfahren zur Bewertung der Wärmeerzeuger, Wärmepumpen und der Solarthermiesysteme basieren auf den europäischen Normentwürfen. In der DIN V 18599-5 werden die Wärmeverluste der Wärmeerzeuger brennwertbezogen, d. h. auf den unteren Heizwert, ausgewiesen. Dieses Verfahren wurde erforderlich, um das rechnerische Auftreten von negativen Verlusten bei Brennwertwärmeerzeugern in den einzelnen Monaten zu unterbinden. Weil die Verluste in der primärenergetischen Bewertung nach DIN V 18599-1 mit dem Verhältnis des Heizwertes zum Brennwert des eingesetzten Brennstoffs multipliziert werden, wird das Endergebnis gegenüber den bisherigen Berechnungsansätzen nicht verändert. Die Ermittlung der anlagentechnischen Verluste erfolgt nach DIN V 4701-10, getrennt nach der Brennstoff- und Hilfsenergie. Die monatlichen Kenngrößen werden über die Belastungsgrade ermittelt. Das in der DIN V 18599-5 enthaltene Verfahren zur Ermittlung des Stromaufwandes für Umwälzpumpen erlaubt eine genauere Bewertung des Energieeinsparpotenzials der modernen Heizungsanlagen.

### **3.1.1.4 Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen (DIN V 18599-8)**

Die DIN V 18599-8 erlaubt eine energetische Bewertung sämtlicher typischen Systeme zur Trinkwassererwärmung im Neubau und im Gebäudebestand. Es können zentrale und dezentrale Warmwasserversorgungsanlagen auf der Basis von fossilen Brennstoffen, Strom, Fernwärme oder regenerativen Endenergieträgern abgebildet werden. Die DIN V 18599-8 enthält ein Verfahren zur energetischen Bewertung von Warmwassersystemen, bei der die vorhandene Methodik der DIN V 4701-10 zugrunde gelegt wurde. Dieses betrifft insbesondere die warmwasserseitigen Bilanzierungsabschnitte der Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung ebenso wie einen wesentlichen Teil der Berechnungsalgorithmen. Mit der DIN V 18599-8 kann eine energetische Bewertung sämtlicher typischen Systeme der Trinkwassererwärmung im Neubau und im Gebäudebestand durchgeführt werden. Hierbei können sowohl zentrale als auch dezentrale Warmwasserversorgungsanlagen auf der Basis von fossilen Brennstoffen, Strom, Fernwärme sowie regenerativen Energieträgern energetisch analysiert werden. Zur Ermittlung des Warmwasserbedarfs kann auf die in der DIN V 18599-10 hinterlegten Kennwerte zurückgegriffen werden. Der Warmwasserbedarf in Wohngebäuden wird auf die Wohnfläche bezogen und, differenziert nach Ein- und Mehrfamilienhäusern, ausgewiesen. Insofern wird auch innerhalb der Gebäudetypen die unterschiedliche Belegungsdichte berücksichtigt. Die Bedarfswerte für Nichtwohngebäude basieren auf einer Literaturanalyse und sind auf die Nettogrundfläche und zum Teil auf die Nutzung bezogen.

Die Wärmeverluste von Verteilsystemen und Speichern innerhalb des beheizten Bereiches werden in die Zonenbilanz von DIN V 18599-2 übergeführt. Die DIN V 18599-8 enthält zudem ein vereinfachtes Verfahren zur Einschätzung des erforderlichen Speichervolumens aus dem täglichen Trinkwarmwasserbedarf und der Nutzung. Der Bereitschaftswärmeverlust eines Speichers wird hierbei als Funktion des Speichervolumens definiert. Die Bewertung von

Wärmeerzeugern, die sowohl für die Warmwasserbereitung als auch für die Heizung genutzt werden, erfolgt in engem Zusammenspiel mit der DIN V 18599-5. Die Abluftwärmepumpen zur Trinkwassererwärmung werden dagegen gemeinsam mit der DIN V 18599-6 bewertet. Die Verluste der Übergabe werden rechnerisch grundsätzlich zu null gesetzt. Die Wärmeverluste der Verteilungssysteme und Speicher innerhalb des beheizten Bereiches werden in die Zonenbilanz von DIN V 18599-2 übergeführt. Eine pauschale Gutschrift von 85 % der Wärmeverluste von Komponenten innerhalb der thermischen Gebäudehülle, wie diese in der DIN V 4701-10 erfolgt, kann somit vermieden werden.

Die DIN V 18599-8 enthält zudem ein vereinfachtes Verfahren zur Einschätzung des erforderlichen Speichervolumens aus dem täglichen Trinkwarmwasserbedarf und der Nutzung. Der Bereitschaftswärmeverlust eines Speichers wird hierbei als Funktion des Speichervolumens definiert. Bei Altanlagen wird, wie auch bei Verteilungsleitungen, zusätzlich das Baujahr berücksichtigt. Für den Fall, dass die Wärmeerzeugung in einem brennstoffgespeisten System erfolgt, setzt sich der Verlust aus den Anteilen im Volllastbetrieb und den Stillstandsverlusten zusammen. Die für die Warmwasserseite anzusetzende Bereitschaftszeit eines Wärmeerzeugers für Heizung und Warmwasserbereitung wird um die rechnerische Betriebszeit der Heizung reduziert. Insofern fallen die Stillstandsverluste eines Wärmeerzeugers für die Warmwasserseite nur außerhalb der Heizzeit an. Die Wärmeverluste der Wärmeerzeuger werden in der DIN V 18599-8 ebenso wie in der DIN V 18599-5 brennwertbezogen ausgewiesen.

Die energetischen Verluste der älteren Elektrodurchlauferhitzer werden pauschal mit 1 % des Aufwandes angesetzt. Da für die neuen Geräte nach DIN V 18599-8 kein Wärmeverlust berücksichtigt wird, wird an dieser Stelle lediglich eine energetische Wertung nach DIN V 18599-1 berücksichtigt.

Die Ermittlung der anlagentechnischen Verluste wird, analog zur DIN V 4701-10, getrennt für die Brennstoff- und Hilfsenergie durchgeführt. Die Bewertung von Wärmeerzeugern, die sowohl für die Warmwasserbereitung als auch für die Heizung genutzt werden, erfolgt in engem Zusammenspiel mit der DIN V 18 599-5. Die Abluftwärmepumpen zur Trinkwassererwärmung werden gemeinsam mit der DIN V 18 599-6 bewertet.

### **3.1.2 Verfahren zur Berechnung der Normheizlast nach DIN EN 12831**

Das Beiblatt 1 zur DIN EN 12831, d. h. der Nationale Anhang zur europäischen Norm der Heizlastberechnung, ist überarbeitet und im Juli 2008 abgeschlossen worden.

Die Überarbeitung wurde erforderlich, da die mit dieser Norm berechnete Heizlast in etlichen Fällen deutlich höhere Endergebnisse erreichte, als dieses nach dem bisher in Deutschland verwendeten Verfahren der DIN 4701 der Fall war. Aufgrund der Anpassung der Randbedingungen wurde nun erreicht, dass das Rechenergebnis der DIN EN 12831 mit dem der zurückgezogenen DIN 4701 innerhalb einer Toleranz von  $\pm 5\%$  vergleichbar ist.

Im Detail wurden nachfolgend aufgeführte und zugleich die wichtigsten Änderungen durchgeführt:

- Die Änderung mit dem größten Einfluss auf das Gesamtergebnis betrifft die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste auf der Gebäudeebene. Der Gleichzeitigkeitsfaktor von  $\zeta = 0,5$ , in DIN EN 12831 bisher nur für die Aufsummierung der raumweisen Lüftungswärmeverluste durch Infiltration eingesetzt, wird nun auch für den Fall des Mindestluftwechsels angewendet. Dieses entspricht einem Mindestluftwechsel für das gesamte Gebäude von  $0,25 \text{ h}^{-1}$ , d. h. ein Wert, mit dem effektiv auch in der DIN 4701 gerechnet wurde.
- Der Mindestluftwechsel auf der Raumebene ist für fast alle Räume auf  $0,5 \text{ h}^{-1}$  gesetzt worden. Bisher hatten Schulzimmer, Bäder und Küchen deutlich höhere Werte.
- Für gut gedämmte Gebäude mit einer hohen Wärmespeicherfähigkeit (Passivhausgebäude) kann die Normaußentemperatur in Abhängigkeit der thermischen Zeitkonstante  $\tau = C_{\text{Wirk}}/H$  des Gebäudes angehoben werden. Dieser Wert könnte u. a. aus der Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs im Rahmen des EnEV-Nachweises entnommen werden.
- Für die Eingabe der Bauteilabmessungen wurden endgültig die Außenmaße festgelegt. Durch diesen Schritt werden gleiche Bemaßungsregeln für die energetische Bewertung, wie z. B. nach DIN V 18599, die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 und Kühllastberechnung nach VDI 2078 hergestellt.
- Die Wiederaufheizung  $\Phi_{\text{RH}}$  wird jetzt getrennt von der Normlast ausgewiesen.
- Das vereinfachte Berechnungsverfahren wurde für die nationale Anwendung gestrichen.

Die weiteren Änderungen beziehen sich auf

- eine Anpassung der Temperaturkorrekturfaktoren  $b_u$
- die vereinfachte Ermittlung der Wiederaufheizleistung durch Nutzungsprofile
- die Anpassung der Richtwerte für die Luftdichtigkeit  $n_{50}$  in Anlehnung an die DIN V 18599-2
- die Aufnahme eines Berechnungsbeispiels mit ventilatorgestützter Lüftung sowie
- die Überarbeitung der Formblätter.

## 3.2 Komponenten-Optimierungen

### 3.2.1 Verbrennungsregelungen

Zur Erreichung eines hohen Jahresnutzungsgrades und damit zur effektiven Energieeinsparung wird es u. a. erforderlich sein zur geeigneten Betriebsweise auch eine angemessene Brennerregelung (einstufig, mehrstufig oder modulierend) zu berücksichtigen. Bei zweistufig arbeitenden Brennern läuft der Brenner in der Übergangszeit im Teillastbereich und schaltet erst dann auf die Volllaststufe, wenn die Leistung für den geforderten Wärmebedarf nicht mehr ausreicht. Modulierende Brenner arbeiten dagegen innerhalb fester Intervalle stufenlos und können somit ihre Leistung noch besser an die momentane Heizlast anpassen.

Moderne Verbrennungsregelungen mit Lambda-Systemtechnik gewährleisten, dass die Gasbrennwerttechnik besonders zuverlässig und generell zukunftssicher ist. Durch eine Ver-

brennungsregelung können die Geräte problemlos und ohne Auswirkungen auf den Wirkungsgrad auch Gase biogener Herkunft verbrennen, die dem Erdgas beigemischt werden. Mit der Lambda-Systemtechnik wird mithilfe der für die Flammenüberwachung bereits vorhandenen Ionisationselektrode permanent die elektrische Leitfähigkeit der Gasflamme gemessen. Hierdurch sind Rückschlüsse auf die Luftverhältniszahl »Lambda« und damit auf die momentane Qualität der Verbrennung möglich. Wechselnde Gasqualitäten, Luftdruckschwankungen und Veränderungen des Strömungswiderstandes in der Zuluft- und Abgasleitung erkennt die Lambda-Systemtechnik und regelt sie automatisch durch Korrigieren der Gaszufuhr aus.

### 3.2.1.1 Brennverhalten – Betriebsbedingungen

Die Luftverhältniszahl, die auch als Luft- bzw. Primärluftzahl ( $\lambda_p$ ) bezeichnet wird, beschreibt das Verhältnis der vor der Verbrennung tatsächlich zugeführten zur theoretisch für eine vollständige Verbrennung erforderlichen Luftmenge. Eine Luftverhältniszahl von  $\lambda = 1,0$  bedeutet daher ein für einen vollständigen Verbrennungsvorgang genau abgestimmtes (stöchiometrisches) Verhältnis von Brennstoff und Luft.  $\lambda = 1,0$  bedeutet analog das hier genau ein Luftsauerstoffbedarf von 100 % vorliegt oder die Luftzahl ( $\lambda$ ) entspricht dem Betrag  $\frac{\%}{100}$  des stöchiometrischen Luftsauerstoffbedarfs.

Atmosphärische Brenner in Thermen und Wärmeerzeugern entwickeln aufgrund ihrer Düsen- und Venturirohrbestückung ein unterstöchiometrisches, zündfähiges Gas-Luft-Gemisch mit Primärluftzahlen von  $\lambda = 0,4$  bis  $0,6$ . Vormischbrenner erzeugen dagegen ein überstöchiometrisches Gas-Luft-Gemisch mit Primärluftzahlen  $\lambda > 1,0$ .

Ein Lambdawert über oder unter  $1,0$  bedeutet daher, dass ein Ungleichgewicht zwischen dem Brennstoff und Luftsauerstoff vorliegt. So bedeutet beispielsweise  $\lambda = 0,9$ , dass nur 90 % des benötigten Luftsauerstoffs vorhanden ist. Es handelt sich hierbei also um eine unvollständige Verbrennung. Der Luftüberschuss, ausgedrückt durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Abgase, ist z. B. für die Energieausnutzung eines Brennwertwärmeerzeugers noch wichtiger als die niedrigen Heizwassertemperaturen. Durch einen zu hohen Luftüberschuss werden die Abgase verdünnt, wodurch die relative Luftfeuchte in den Abgasen sinkt und die Kondensation erst bei niedrigeren Abgastemperaturen eintritt. Bei genügend hohem Luftüberschuss bildet sich selbst bei sehr kalten Rücklauftemperaturen kein Kondensat mehr. Ein zu hoher Luftüberschuss kann zu einer Wirkungsgradreduzierung von 5 bis 10 % führen.

Im Gegensatz zu den Diffusionsbrennern findet bei den Vormischbrennern die Vermischung der Reaktionspartner Gas und Luft örtlich getrennt von der Zündstelle statt. Das Unterscheidungsmerkmal liegt hierbei in der Mischenergie, die beim Gebläsevormischbrenner vom Impuls des erzeugten Luftstrahls und beim atmosphärischen Brenner vom Impuls des Gasversorgungsdruckes ausgeht. Die bedeutendste Entwicklung ist hier das Prinzip der vollständigen Vormischung, bei der dem Brenngas bereits vor der Verbrennung die gesamte für den Verbrennungsprozess notwendige Luftmenge zugeführt wird. Dieses Verfahren arbeitet sogar mit einem überstöchiometrischen Gas-Luft-Gemisch, d. h. mit Luftverhältniszahlen im Bereich von  $1,2$  bis  $1,4$ .

### 3.2.1.2 Brennerlaufzeiten

Langjährige Untersuchungen haben ergeben, dass ein Wärmeerzeuger ein Haus im Jahr mit nur ca. 15 % der vollen Leistung erwärmen muss. In der restlichen Zeit, also zu 85 % des Jahresanteils, kommen die Heizungsanlagen mit der halben Wärmeerzeugerleistung aus. Um dem realistischen Wärmebedarf angemessen gerecht zu werden, sollte eine Zweistufentechnik mit Anpassung der Luftzahl (Lambdasteuerung) verwendet werden, da ein einstufiger Brenner bis zu 20.000 mal im Jahr schaltet und somit viel Zusatzenergie benötigt sowie die Umwelt unnötig belastet. Zur Kontrolle der Brennerlaufzeiten sollte ein Betriebsstundenzähler installiert werden. Mithilfe dieses Betriebsstundenzählers lässt sich auch die Überdimensionierung eines Wärmeerzeugers feststellen, wobei die Betriebsstunden mindestens über die Zeit eines kälteren Monats ermittelt werden. Bei einem Einfamilienhaus sollte der Brenner ca. 1800 Stunden im Jahr, zuzüglich ca. 200 Stunden für die Brauchwassererwärmung, laufen. Liegt die Brennerlaufzeit deutlich über oder unterhalb der Stunden für die einzelnen Monate, dann ist die Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers zu groß.

### 3.2.1.3 Lambda-Control-System (LCS)

Das Lambda-Control-System regelt das Verhältnis von Gas und Luft über eine pneumatisch betätigte Druckdifferenz-Steuerung, wobei hier die Druckdifferenz zwischen dem statischen Gebläsedruck und dem Druck in der Mischzone gemessen wird. Bei einer Sollwertabweichung erfolgt eine automatische Nachregulierung über den Gasdruck, wobei auch anlagenbedingte Schwankungen (z. B. Förderdruckänderungen) ausgeglichen werden. Hierbei werden Lambdasensoren im Abgas eingesetzt. Diese Lösung konnte sich jedoch in der Praxis aus Zuverlässigkeitsgründen noch nicht ausreichend durchsetzen.

Zur Regelung von Gaswärmeerzeugern mittels Lambdasensor ist eine homogene Flammfront erforderlich. Hierbei ist es erforderlich, dass die Verbrennung innerhalb einer geschlossenen Brennerkammer erfolgt. Bei atmosphärischen oder offenen, vorgemischten Brennern entstehen durch die Flamme Verwirbelungen. Durch den Einsatz einer Lambda-Control-Steuerung wird somit eine sehr gute Verbrennung mit hohen  $\text{CO}_2$ -Werten im gesamten Arbeitsbereich erreicht.

Generell sind für den Einsatz einer Lambdae Regelung mit Halbleitersensor folgende Parameter einzuhalten:

- Verwendung eines voll vormischenden Gasbrenners mit geschlossener Brennkammer
- eine homogene Brennerfläche mit kurzer Flammenlänge
- geringe Belastung, d. h. Infrarotbrenner mit Brenntemperatur um ca. 900 °C
- Regelmöglichkeit für das Gas-Luft-Verhältnis.

Bei einem überdimensionierten Wärmeerzeuger müssen im Brenner kleinere Düsen eingebaut werden, mit denen sich die Brennerleistung bedarfsgerechter einstellen lässt. Hierbei sollten jedoch die auf dem Typenschild angegebenen Grenzwerte für die Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers nicht unterschritten werden. Die im Allgemeinen waagrecht in den Brennraum gerichtete Flamme darf nur mit den dafür vorgesehenen Heizflächen in Berührung kommen, d. h. die Flamme muss dem Brennraum angepasst sein. Trifft die Flamme



bei zu groß eingestellter Brennerleistung auf die kalte Wärmeerzeugerinnenwand, dann verbrennt das Erdgas bzw. das Heizöl nicht vollständig. In der Folge entstehen Ruß, Ölderivate und eventuell sogar toxisches Kohlenmonoxid. Wenn andererseits die Brennerleistung zu gering wird und damit die Flamme zu klein ist, werden die Heizflächen nur ungenügend genutzt und die Rauchgase geben zu wenig Energie an den Wärmeerzeuger ab. Daraus folgt auch, dass die Abgastemperatur ansteigt.

Bei Wärmeerzeugern, die 10 oder 15 Jahre lang laufen, werden trotz Auswechslung zu kleineren Brennerdüsen in der Regel Brennerlaufzeiten von 1250 Stunden und geringer erreicht, d. h. der Wärmeerzeuger sollte aus ökologischen und ökonomischen Gründen ausgetauscht werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Feststellung einer bedarfsgerechten Brennerlaufzeit lässt sich aus der Wärmeerzeugerleistung, dem Brennstoffverbrauch und dem unteren Heizwert des Brennstoffs ermitteln.

### 3.2.1.4 Das SCOT-Control-Verfahren

Im Bereich der Gasverbrennung wurden zwischenzeitlich neue Entwicklungen hinsichtlich selbstständig auf die jeweilige Gasbeschaffenheit einstellbaren Brennern erreicht. Mit dem SCOT-Verfahren ist es nun möglich das Ionisationssignal zur Luftzahlmessung in Gaswärmeerzeugern nutzbar zu machen. Optische und elektrische Flammsignale sind wegen ihrer schnellen und direkten Information vom Ort der Verbrennung einerseits vorteilhaft, da hierbei jede Reaktion der Verbrennung auf die sich ändernden Betriebsbedingungen detektiert wird. Andererseits scheiterte jedoch bisher ihr praktischer Einsatz am Fehlen einer eindeutigen Zuordnung zu einem für die Regelungszwecke brauchbaren Verbrennungsparameter.

Die Entwicklung basiert auf einer elektronischen Verbrennungsregelung, die permanent den Ionisationsstrom der Flammenüberwachung auswertet. Der Ionisationsstrom gibt hierbei die Auskunft über den Verbrennungszustand. Verglichen mit den optimalen Verbrennungsbedingungen folgt daraus gegebenenfalls eine Änderung, die über die Dosierung der Gaszufuhr ausgeglichen wird. Durch Definition des funktionellen Zusammenhangs zwischen dem Ionisationsstrom und der Luftzahl, kann das Ionisationssignal als eindeutiges Kriterium zur Bestimmung des Verbrennungszustandes genutzt werden. Die Auswertung des Ionisationssignals ist wegen der schnellen Information vorteilhaft. Das Ergebnis ist ein eindeutiger funktioneller Zusammenhang mit dem maximalen Ionisationsstrom genau bei einem stöchiometrischen Gas-Luft-Gemisch mit einer Luftverhältniszahl von  $\lambda = 1,0$ .

Bei der Adaption des SCOT-Basisverfahrens an einen speziellen Brenner besteht die Hauptaufgabe darin, nach Möglichkeit eine eindeutige Wechselbeziehung zwischen dem Ionisationssignal und der Luftzahl herzustellen. Parallel dazu muss der Einfluss anderer Größen auf das Ionisationssignal, z. B. bei einem modulierenden Brennerbetrieb die Brennerleistung, minimiert werden. Bestimmende Parameter sind ferner die Positionierung der Ionisationselektrode im Brennraum sowie der Abstand der Elektrode von der Brennoberfläche.

Das Signal aus der Flammenionisation entsteht in der Wechselbeziehung zwischen den Ladungsträgern in der Flamme und dem angelegten elektrischen Feld. Von den Ladungsträgern in der Flamme sind für den Ionisationsstrom überwiegend die schnellen Elektronen ausschlaggebend und nicht die mit Trägheit behafteten Ionen. Aus diesem Grund ist zur



Ermittlung der Parameter und für die Anpassung des SCOT-Verfahrens an einen bestimmten Brenner die richtige Positionierung der Ionisationssonde ausschlaggebend. Durch die Position innerhalb der Flamme wird die Lastabhängigkeit des Ionisationssignals beeinflusst. Hierbei ergibt sich ein typischer Zusammenhang. Bei Flächenbrennern mit laminarer Flamme ist bei einem bestimmten Sondenabstand die Lastabhängigkeit minimal, sodass sich ein eindeutiger, parabelförmiger Zusammenhang zwischen dem Ionisationssignal und der Luftzahl ergibt.

### 3.2.2 Pumpenregelungen

Der wichtigste Bereich zur drastischen Reduzierung des Energiebedarfs ist die Betriebsart der Motoren zum Antrieb der Strömungsmaschinen wie Pumpen, Ventilatoren oder Kompressoren. Mehr als zwei Drittel des Stromverbrauchs in der Industrie entfallen auf die Elektromotoren, davon mehr als die Hälfte auf Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren. Sowohl bei der Neuanschaffung als auch im Betrieb von elektrischen Antrieben gibt es enorme Energieeinsparpotenziale ohne Leistungseinbußen. Die Anforderungen der EnEV bezüglich des Einsatzes elektronischer Motorregelungen sind auch für kleinere Heizungsanlagen mit Leistungen unter 25 kW sinnvoll und werden auch für Neubauten je nach dem Verhältnis zwischen den Außenflächen und dem Gebäudevolumen zur Einhaltung eines maximalen Jahresenergiebedarfs (Primärenergieansatz) gefordert. Der Hintergrund liegt darin begründet, dass bei der Auslegung einer Heizungsumwälzpumpe vom Volllastfall, analog zur DIN 4701, ausgegangen wird, der in der Praxis so gut wie nie erreicht wird. Für ein Heizungsnetz mit einer Temperaturspreizung von 20 K sollte gemäß der DIN V 4701-10 der elektrische Hilfsenergieeinsatz bezogen auf die Jahresbetriebsstunden bei

- Gebäudegrößen bis 100 m<sup>2</sup> nicht über 2 kWh/m<sup>2</sup>a
- Gebäudegrößen bis 10.000 m<sup>2</sup> nicht über 0,2 kWh/m<sup>2</sup>a

liegen.

Die neue EnEV schreibt für Heizungsanlagen ab einer Wärmeleistung von 25 kW den Einsatz selbsttätig regelbarer Pumpen in mindestens drei Stufen vor. Sofern Heizungsumwälzpumpen in Anlagen mit einer Nennleistung von mehr als 25 kW installiert oder beim Austausch defekter Altaggregate erneuert werden, müssen diese Pumpen die elektrische Leistungsaufnahme selbstständig dem betriebsbedingten Förderbedarf angepasst werden. Daraus folgt, dass diese Pumpen entweder stufenlos oder zumindest in drei Anpassungsstufen arbeiten müssen. Zudem fordert die EnEV selbsttätig regelnde Umwälzpumpen für Heizkreise über 25 kW. Der Altbestand ist enorm und daraus resultierend würde sich hier allein in der Umrüstung der im privaten Hausbesitz befindlichen Pumpen ein Betätigungsfeld im Bereich der Pumpensanierung ergeben mit einem enormen volkswirtschaftlichen Energieeinspareffekt. Im Vergleich zu einer unregelmäßigen Pumpe benötigt ein Modell mit Permanentmagnetmotor lediglich 20 % Energie, weil dieser Motor während des Betriebs zur Magnetisierung des Rotors keine elektrische Energie benötigt.

Je höher der Förderstrom, umso geringer wird die Förderhöhe oder umgekehrt. Für Heizungsumwälzpumpen ist dieses jedoch ungünstig, da die Heizleistung vom Förderstrom und

von der Förderhöhe abhängig ist. Je mehr Wärme benötigt wird, umso mehr muss der Förderstrom ansteigen. Die Förderhöhe gleicht hier die Reibungsverluste des Wassers aus, die beim Durchströmen in den Rohren, Formstücken, Armaturen, Regelventilen, Thermostatventilen, etc. entstehen. Je geringer der Förderstrom (analog die Strömungsgeschwindigkeit), umso geringer werden auch die Reibungsverluste und somit umso geringer der Energieaufwand. Dieses Erfordernis steht daher im Gegensatz zu der dargestellten Kennlinie mit steigender Förderhöhe bei sinkender Fördermenge. In der Praxis bedeutet dieses, dass ein erheblicher Energieanteil der zugeführten Pumpenleistung nutzlos im System verschwindet.

Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, d. h. um den Energieverbrauch für eine bestimmte Leistung so gering wie möglich zu halten, muss bei der Pumpenauslegung das Betriebs- bzw. das Auslastungsprofil berücksichtigt werden. Beim Betrieb einer Heizungsumwälzpumpe ändert sich das Belastungsprofil im Jahresverlauf. Beispielsweise wird hier nur an einigen wenigen Wintertagen die maximale Heizleistung und damit der maximale Förderstrom benötigt. Bei steigenden Außentemperaturen sinkt der Heizbedarf und damit auch der erforderliche Förderstrom.

Aufgrund der klimatischen Daten ist bei den Heizungsanlagen in Deutschland entsprechend dem Belastungsprofil während der Heizperiode nur während weniger als 5 % der Heizzeit ein Volumenstrom von mehr als 87 % erforderlich. In 85 % der Heizzeit ist ein maximaler Volumenstrom von 62 % ausreichend. Ein analoges Belastungsprofil ist sinngemäß auch auf den Betrieb der Kaltwasserpumpen in Klima-Kälteanlagen zu verzeichnen. Aus diesem Grund lohnt es sich besonders bei Anlagen mit schwankender Kühl- und Heizlast, elektro-nisch geregelte Pumpen einzusetzen.

### 3.2.2.1 Regelungsmöglichkeiten von Pumpen und energetisch Effekte

Mit Bypass-, Drossel- und Drallregelungen ändert sich am Aggregat selbst nichts, sie verändern nur die Anlagenkennlinie. Die Antriebe (Motoren) laufen weiterhin näherungsweise mit der Nenndrehzahl, wobei diese Maßnahmen mit verhältnismäßig hohen Verlusten verbunden sind.

Bei einer stufenlosen Drehzahlregelung ist es daher vorteilhaft für Drehstrommotore Frequenzumformer einzusetzen. Aufgrund der für Ventilatoren oder Pumpen typischen quadratischen Zunahme des erforderlichen Drehmomentes mit der Drehzahl können die Spannung und der Magnetisierungsstrom bei abnehmender Drehzahl abgesenkt werden. Durch die Einstellung der entsprechenden Kennlinie am Umrichter ergibt sich im Vergleich zu den anderen Regelungsarten der niedrigste Energieverbrauch.

Die anfänglich etwas erhöhten Investitionskosten amortisieren sich aufgrund der reduzierten Betriebskosten bereits innerhalb weniger Monate. Beispielsweise benötigt ein Pumpen- oder Ventilatorantrieb bei halber Förderleistung nur ein Achtel der Energie wie beim Volllastbetrieb. Der Grund liegt im physikalischen Zusammenhang, d. h. die Leistungsaufnahme steigt proportional zur dritten Potenz der Drehzahl. Aus diesem Grund kann im Vergleich zu einer konventionellen Drosselregelung eine Energieeinsparung bis zu 50 % erreicht werden. Zudem arbeiten die Pumpen dann besonders effektiv, wenn sie in eine Gebäudeleittechnik integriert werden. Vor allem in größeren Anlagen ist eine datenbustechnische

Kommunikation zwischen den Pumpen und der Gebäudeleittechnik unerlässlich, wobei sich folgende Vorteile ergeben:

- Anpassung der Pumpenleistung an unterschiedliche Zeitprogramme
- Visualisierung der Pumpenparameter und Erstellung von Trendkurven
- Optimierung der Pumpenleistung nach hydraulischen Kriterien
- Optimierung der Wärmeerzeugersteuerung
- Spitzenlastbegrenzung der elektrischen Energie
- Energiemanagement
- zentrale Stör- und Ereignismeldungen
- Instandhaltungsmanagement.

### 3.2.2.2 Optimierung der Pumpensteuerungen

Mikroprozessorgesteuerte Pumpensteuerungen tragen dazu bei, die Leistung jeder Pumpe exakt nach dem gewünschten Druck, einer Temperatur, Fördermenge, Zeit oder anderen Messwerten anzupassen und somit eine energieeffiziente Betriebsweise zu realisieren. Das automatische Erkennen einer Anlagenkennlinie führt z. B. zur Optimierung der Pumpenleistung wie auch das Einbinden der Pumpenleistung in die Nachtabenkung des Wärmeerzeugers.

#### Motorenergieeffizienzklassen

Die Erreichung einer hohen Energieeffizienz besteht in einer sinnvollen Kombination der Kriterien zur Pumpenauswahl und Pumpendimensionierung. Da ca. 90 % sämtlicher Pumpen mit elektrischen Motoren angetrieben werden, stellt die Antriebstechnik auch einen sehr wichtigen Ansatzpunkt zur Energieeinsparung. Das bereits seit 1999 gültige Klassifizierungssystem der EU hat den Fachplanern und Investoren mit der Wirkungsgradklasse EFF1 für Normmotoren eine gute Entscheidungshilfe vorgegeben. Mit den EFF1-Motoren wird die Verlustenergie im Durchschnitt um 40 % reduziert. Die höheren Investitionskosten amortisieren sich in kürzester Laufzeit.

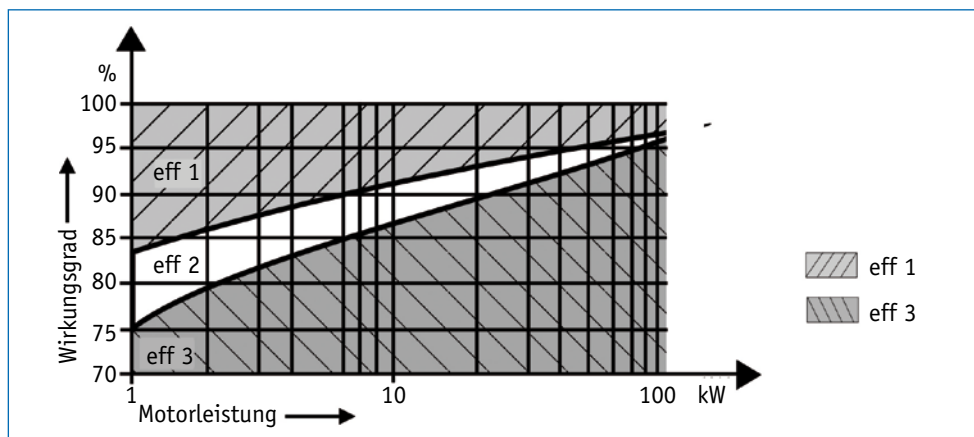


Abb. 3-1: Motorenergieeffizienzklassen (Quelle: IB-THEISS, München)

Bei einem Standardmotor mit einer jährlichen Nutzungsdauer von 3000 h entfallen weniger als 3 % der Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs) auf die Investition; dagegen über 95 % jedoch auf den Energieverbrauch. Aus diesem Grund sollten bereits in der Planungsphase nur hocheffiziente Elektromotoren mit der Energieeffizienzklasse EFF 1 berücksichtigt werden. Die geringen Investitionsmehrungen amortisieren sich je nach Laufzeiten in wenigen Jahren. Bei wechselnder Last besteht ein hohes Energiesparpotenzial durch Verwendung von drehzahlgeregelten elektrischen Antrieben.

### **Bisherige Wirkungsgradklassen von Motoren in Europa und alte Messmethode**

In der seit 1998 bestehenden freiwilligen Vereinbarung zwischen der Europäischen Kommission für Energie und den Motorherstellern innerhalb der CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) wurde eine Einteilung der 2- und 4-poligen Niederspannungs-Drehstrommotoren im Leistungsbereich von 1,1 bis 90 kW in drei Wirkungsgradklassen durchgeführt:

- EFF1 = Motoren mit erhöhtem Wirkungsgrad (High Efficiency)
- EFF2 = Motoren mit verbessertem Wirkungsgrad (Improved Efficiency)
- EFF3 = Motoren mit niedrigem Wirkungsgrad (Standard Efficiency).

Die Mindestwerte der jeweiligen Klassen beziehen sich auf Messungen des Wirkungsgrades nach EN 60034-2:1996.

### **Neue internationale Wirkungsgradklassen für Motoren (IE = International Efficiency)**

In Europa befindet sich die Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EC (EuP-Richtlinie) in der Umsetzungsphase. Die IEC-Norm bildet die Basis der neuen EuP-Richtlinie, die auch die Elektromotoren einbezieht. Sie gewährleistet die Grundlagen der gesetzlichen Anforderungen an die internationalen Standards und die Qualitätsbedingungen sowie die Wettbewerbsfähigkeit. Die erste Maßnahme, die verbindliche Einführung des Mindestwirkungsgrades IE2, wird voraussichtlich im Juni 2011 in Kraft treten. Ab 2015 greifen weitere Maßnahmen und regeln den Einsatz von Frequenzumrichtern zur elektronischen Drehzahlregelung sowie von Motoren der Wirkungsgradklasse IE3. Die neue Norm löst die bisherige Norm EN 60034-2:1996 ab; die alte Norm wurde ab November 2010 ungültig.

Die neue Norm EN 60034-30:2009 definiert weltweit drei Wirkungsgradklassen für Niederspannungs-Drehstrom-Asynchronmotoren im Leistungsbereich von 0,75 bis 375 kW:

- IE1 = Standardwirkungsgrad (vergleichbar EFF2)
- IE2 = gehobener Wirkungsgrad (vergleichbar EFF1)
- IE3 = Premiumwirkungsgrad.

Um die gewünschte Kompatibilität mit den alten Klassen EFF1 und EFF2 zu erhalten, wurden die Grenzwerte von IE1 und IE2 leicht abgesenkt. Beispielsweise ist ein derzeitiger 4-poliger 11 kW-EFF1-Motor mit 91,0 % Wirkungsgrad identisch mit einem zukünftigen IE2-Motor mit 89,8 % Wirkungsgrad. Die Differenz basiert lediglich auf den unterschiedlichen Messmethoden. Die EN 60034-30 definiert zwar die Anforderungen der Wirkungsgradklassen und sorgt damit für eine international einheitliche Regelung, bestimmt aber nicht, wel-

che Motoren mit welchen Mindestwirkungsgraden geliefert werden müssen. Dies ist Bestandteil der jeweiligen Gesetzgebung.

### **Pumpenenergielabel**

Europas führende Pumpenhersteller haben sich zwischenzeitlich zu einer einheitlichen Kennzeichnung des Energieverbrauchs von Pumpen verpflichtet. Die Energieeinstufung wird durch den Europump (Europäischer Verband der Pumpenhersteller) organisiert und durch die Europäische Kommission überwacht. Das neue Label liefert Informationen über den Jahresenergieverbrauch eines Produktes. Die Anzahl an kWh, die die Pumpe im Jahr verbraucht, ergibt eine Einstufung auf einer Skala von A bis G. Hierbei steht das A für einen niedrigen Energieverbrauch und das G kennzeichnet einen hohen Verbrauch. Eine durchschnittliche Pumpe, die heute in den Heizungsanlagen in Europa installiert wurde, erreicht eine Energieklasse D oder E. Der Energieverbrauch einer Pumpe der Klasse A liegt im Vergleich dazu bei ca. 75 % der elektrischen Antriebsenergie.

Leider ist insbesondere in der Wärmetechnik noch immer festzustellen, dass vier von fünf Umwälzpumpen falsch dimensioniert wurden. Mit den neuen Heizungsumwälzpumpen der Energieklasse A stehen leistungsfähige und energiesparende Alternativen zur Verfügung. Ein synchronisierter Permanentfeldmotor in Kombination mit einem Frequenzumformer führt im Vergleich zu einer konventionellen Umwälzpumpe zu einer Energieeinsparung bis zu 80 %.

### **3.2.2.3 Innovative Umwälzpumpentechnologie**

#### **EC-Motorentechnologie**

Die Alternative zu Motoren mit der konventionellen AC-Technik sind Antriebe mit EC-Technologie (electronical commutation). Im Bereich kleinerer Leistungen, d. h. von 0,5 bis 2 kW, verzeichnen die elektronisch kommutierten, permanentmagneterregten Motoren (EC-Motoren) gegenüber den konventionellen Asynchronmotoren in vielen Anwendungsfällen vorteilhafte Ergebnisse. Der Konstruktionsaufbau der EC-Motoren besteht aus den bürstenlosen Gleichstrommotoren mit elektronischer Regeleinrichtung, der Kommutierungselektronik, die im Vergleich zu den AC-Motoren einen höheren Wirkungsgrad aufweisen.

Prinzipbedingt laufen die EC-Motoren synchron, haben keinen Schlupf und damit auch keine Schlupfverluste. Insofern ist dies auch ein Vorteil gegenüber den konventionellen Asynchronmotorsystemen mit Spannungs- und Frequenzregelung. Beim EC-Motor zeigt sich zudem generell das breite Wirkungsgradmaximum ( $\eta_{\max}$ ) als Vorteil. Der EC-Motor arbeitet ohne besondere Anpassung an die Drehzahl- und Lastverhältnisse über einen breiten Stellbereich mit nahezu konstant hohem Wirkungsgrad.

Bei den EC-Motoren bilden die Elektronik und der Motor eine funktionelle Einheit. Daraus folgt allerdings der Nachteil, dass der Motor für einfache Anwendungen nicht ohne Elektronik direkt am Versorgungsnetz betrieben werden kann. Aufgrund der Kommunitierungselektronik sind die EC-Motoren generell stufenlos regelbar. Die entscheidenden Argumente und Kriterien in der Drehzahlstellung liegen im Energieeinsparpotenzial und in der Geräuschreduzierung begründet. Hier in der Antriebstechnologie der Ventilatoren und Verdichter macht sich die bedarfsgerechte Betriebspunkteinstellung besonders deutlich bemerkbar, weil sich die aufgenommene Leistung mit der dritten Potenz der Drehzahl ändert.

## Drehzahl geregelter Permanentmagnetmotor (PMSM)

Die drehzahl geregelten Pumpen spielen auch eine wesentliche Rolle in der Energieverbrauchs Bilanz. Bereits die elektronische Drehzahlregelung von konventionellen Motoren zeigt hier entscheidende Energieeinsparungen. Ein drehzahl geregelter Permanentmagnetmotor (PMSM) verbraucht dagegen sogar bis zu 70 % weniger Antriebsenergie als ein unregelmäßiges Aggregat. Besonders charakteristisch für derartige elektronisch kommutierte Synchronmotoren ist deren hoher Wirkungsgrad, der in der Regel um 30 % über dem konventionellen unregelmäßigen Asynchronmotor liegt. Motoren mit Permanentmagnetläufern (PM-Motoren) zu verwenden wird immer attraktiver. Hierbei sorgen einerseits die elektronisch geregelte Leistungsanpassung der Pumpe an den Heizbedarf und der hohe Wirkungsgrad für eine deutliche Reduzierung des Stromverbrauchs.

In einem Permanentmagnetmotor wird der Elektromagnetismus mit dem Permanentmagnetismus des Rotors kombiniert. Die Energieeinsparung beruht im Wesentlichen darauf, dass der bürstenlose elektronisch kommutierte Synchronmotor für die Magnetisierung des Rotors keine Energie benötigt, weil nur noch der Stator magnetisiert wird. Durch die Steuerung dieses Magnetfeldes kommt es zu einer kontinuierlichen Drehbewegung des Permanentmagnetrotors. Aus der Analyse des Belastungsprofils einer Heizungsanlage, wird ersichtlich, dass die Maximalleistung nur äußerst selten benötigt wird. In der Regel reicht eine Fördermenge von weniger als 50 % aus. Ebenso muss in den meisten Anlagen der Pumpendifferenzdruck nicht konstant gehalten werden, sondern kann als Proportionaldruckregelung auf bis zu  $0,5 \cdot \Delta p_{\max}$  gesenkt werden.

Zusätzliche Energieeinsparmöglichkeiten lassen sich mithilfe einer Nachtabenkungsfunktion erreichen. Mit dieser Funktion wird vermieden, dass die Heizungsumwälzpumpe nachts, wenn die Thermostatventile öffnen, mit maximaler Leistung fährt, Strömungsgeräusche auftreten und unnötige Energie verbraucht wird. Hierbei überwacht ein Temperatursensor in der Pumpe die Medientemperatur. Fällt die Medientemperatur um mehr als 10 K in kurzer Zeit ab, dann schaltet die Pumpe nach einer Zeitverzögerung auf die Minimumkennlinie herunter. Steigt die Medientemperatur andererseits wieder um mehr als 10 K an, dann schaltet die Pumpe sofort wieder auf den Normalbetrieb um.

Heizungsumwälzpumpen mit Permanentmagnetmotoren bieten folgende Vorteile:

- zur Magnetisierung des Permanentmagnetmotors wird kein Strom benötigt
- über einen großen Lastbereich wird ein hoher Wirkungsgrad erreicht
- da kein Magnetfeld aufgebaut werden muss, liegt auch eine niedrigere Belastung des Umrichters vor
- innerhalb des Betriebsbereichs liegt ein gleich bleibend hohes Anlaufmoment vor
- die Drehzahl ist unabhängig von der Belastung, d. h. konstante Synchrondrehzahl ohne Schlupf
- da die Leistung und Drehzahl unabhängig von der Netzfrequenz sind, kann der Pumpenmotor auch übersynchron gefahren werden
- die erforderliche elektronische Kommutierung ist durch geringsten Mehraufwand mit einer Differenzdruckregelung kombinierbar.

Die Pumpen mit konstanter Drehzahl arbeiten stets mit voller Leistung. In den meisten Anlagensystemen der Gewerke Heizung, Raumluft-, Klima- und Kältetechnik sowie der Wasser-

versorgung wird im Betrieb jedoch primär nur eine Leistung im Teillastbereiche benötigt. In diesen Fällen kann die Pumpenleistung durch den Einsatz eines Frequenzumformers stufenlos an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Der Einsatz eines Frequenzumrichters ermöglicht die Drehzahlstellung des Asynchronmotors mit einem hohen Wirkungsgrad, sofern eine ausgewogene Abstimmung auf den Motor und auf die Lastverhältnisse erfolgt. Eine wesentliche Basis zur verbrauchsorientierten bzw. variablen Betriebsweise und damit zur Reduzierung des Energieverbrauchs ist der Einsatz von Frequenzumrichter zum Betrieb von:

- Druckerhöhungspumpen
- Kaltwasserpumpen
- Lufterwärmer- und Kühlwasserpumpen
- Solarthermiepumpen
- Wärmepumpen.

In vielen Projekten wird durch den Einsatz der neuen Frequenzumrichter ein ROI (Return of Invest) von unter zwei Jahren ermöglicht.

*Objektbeispiel:* Obsidian-Hochhaus in Zürich,

Architekten: Baumschlager & Eberle Architekten, Lochau/A.

Der gläserne Büroturm »Obsidian«, der dem städtebaulichen Bild ein neues Profil gibt, befindet sich am westlichen Eingangstor der Stadt. Dieser neue Baukörper soll analog zum namensgebenden dunklen gläsern glänzenden Lavagestein die Offenheit und Transparenz eines neuzeitlichen Innovationszentrums widerspiegeln.

*Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

Die Systemfindung der Gebäudetechnik ermöglicht in den Wechselwirkungen der Gebäudehülle mit der Gebäudetechnik, dass hier auf ein aktives Sonnenschutzsystem verzichtet werden konnte.

Eine kombinierte Wärmepumpe/Kältemaschine dient zur energetisch optimalen Doppelnutzung, d. h. zur Wärme- wie auch zur Kälteerzeugung. Zur Ergänzung der Wärmepumpe übernimmt ein im Dachgeschoss integrierter Gaswärmeerzeuger die Spitzenabdeckung. Die Heiz- bzw. Kühlverteilung erfolgt über ein thermoaktives Bauteilsystem (TAB) sowie über die Zuluft. Dem zukunftsweisenden Trend dezentraler Konzepte für Lüftung und Raumklimatisierung folgend, wird die Zuluft an den Fassaden direkt vom hinterlüfteten Fassadenzwischenraum über ein aktives Bodenklimasystem geführt. Aus Gründen der Energieeffizienz spielte auch die Wahl der Ventilator- und Pumpenantriebe eine entscheidende Rolle. Als Systemlösung wurde die sogenannte EC-Technologie (elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren) umgesetzt.

Die EC-Technologie der Ventilatoren enthält bereits konstruktiv eine Mikroprozessorregelung zur konstanten Volumenstromregelung. Das erweist sich bei möglichen Abschaltungen einiger Etagen bzw. Nutzungsbereiche als vorteilhaft. Zusätzlich gleicht es besonders bei Hochhäusern die Winddruck- oder Windsogwirkungen aus. Ein weiterer Vorteil der EC-Motoren besteht in der Energieeffizienz, da diese Antriebe lediglich 30% der elektrischen Energie gegenüber konventionellen Antriebsmaschinen aufnehmen.





**Abb. 3-2:** Obsidian-Hochhaus in Zürich (Quelle: Kampmann GmbH, Lingen)

**Tab. 3-1:** Referenzprojekte – Pumpen mit EC-Technologie und Frequenzumformer (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|--|---|--|
|  | EC-Pumpenantriebe   |  |
| Alfred Wegener Institut, Bremerhaven Büro- und Laborbereiche des Polar- und Meeresforschungsinstituts mit einer Nutzfläche von 7600 m <sup>2</sup> | Zur Energieeffizienz wurden rund 50 Pumpen unterschiedlichster Bauart, Größe und Leistungen mit neuester Motortechnologie und entsprechender Steuerungstechnik installiert. | Erdgasbetriebenes BHKW mit einer thermischen Leistung von 358 kW und einer elektrischen Leistung von 230 kW. Absicherung der Spitzenlast mittels gasbetriebenen Brennwärmerzeugers. Betonkernaktivierung auf ca. 6000 m <sup>2</sup> mit einer Kühllast von 300 kW bzw. einer Heizlast von 120 kW. |
| Maritim Airport Hotel in Hannover  | Die Pumpentechnologie der insgesamt 90 Pumpen innerhalb der Heiz- und Kühlkreisläufe mit Hocheffizienzpumpen in der Energieeffizienzklasse A umgerüstet.                    | Je nach Bauart und Einsatzbereichen konnten bis zu 90% der für den Pumpenbetrieb erforderlichen elektrischen Energie eingespart werden.  |



Fortsetzung Tab. 3-1

| Projekt/Architekt                               | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten                   |
|---|--|----------------------------------|
|   | Frequenzumformer   |                                  |
| Nobelhotel Jolly Hotel President, Mailand       | Die Kreiselumpen der Kühlaggregate; Kondensatoren, DEA-Anlagen wurden mit drehzahlveränderbarer Regelung mit Frequenzumrichtern ausgerüstet. mittels rund 50 Pumpen unterschiedlichster Bauart, Größe und Leistungen |                                  |
| Kunsthhaus Graz/A; Cook und C. Fournier, London | Frequenzumformung der Pumpen-antriebe  | Gebäudeleittechnik, Lichttechnik |

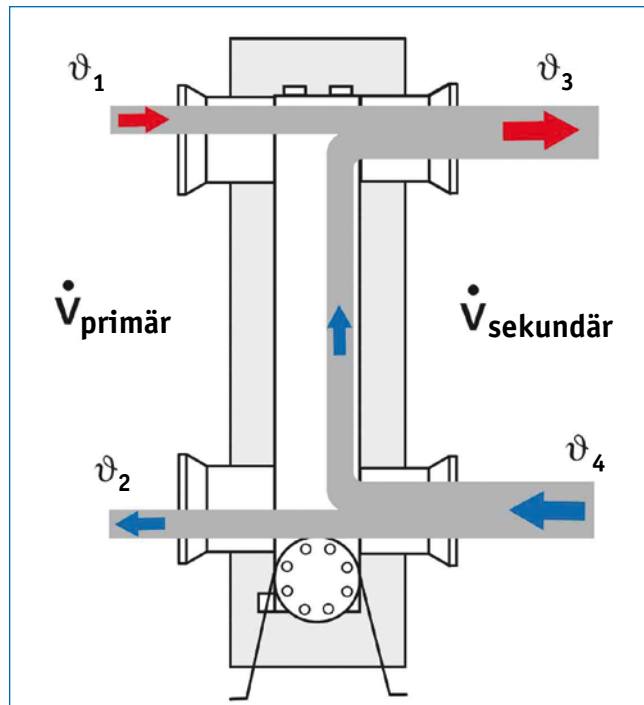
### 3.2.3 Hydraulischer Abgleich

Eine effiziente Gebäudebeheizung setzt nicht nur voraus, dass die Wärmeerzeugungsseite energetisch ausgeführt wurde, sondern auch dass die Wärmeverteilung innerhalb des Gebäudes optimal ausgeführt wird. Eine entscheidende Voraussetzung hierfür besteht im richtigen hydraulischen Abgleich der Wärmeabnehmerseite. Dieser hydraulische Abgleich ist insbesondere in Mehrfamilienhäusern zu empfehlen. Mit dieser Maßnahme soll gewährleistet werden, dass jeder Heizkörper innerhalb des Systems über den zugeordneten Heizwasserstrom mit der tatsächlich benötigten Wärmemenge versorgt wird. Bei fehlendem hydraulischen Abgleich kann der Anlagenbetrieb gravierend beeinträchtigt werden.

Mit dem hydraulischen Abgleich wird die Einregulierung der fließenden Wasserströme in einem Rohrnetz durchgeführt. Durch den Abgleich soll in jedem Teil des Wasserkreislaufes diejenige Wassermenge pro Zeiteinheit fließen, die tatsächlich auch benötigt wird. Die Heizkörper mit dem geringsten Abstand zum Wärmeerzeuger bzw. zur Pumpe werden überversorgt, wobei im Umkehrschluss die am weitesten entfernten Heizkörper aufgrund des zu geringen Heizwasserstroms unterversorgt werden. Ein nicht durchgeführter hydraulischer Abgleich hat zudem zur Folge, dass zwischen Mieter und Vermieter ständig gravierende und ärgerliche Auseinandersetzungen stattfinden über:

- ungleichmäßige Wärmeabgabe, schlechtere Regelbarkeit der Heizkörper über Thermostatventile
- lästige Strömungsgeräusche aufgrund zu hoher Pumpenleistung
- höherer Energieverbrauch und erhöhte Heizkosten
- zu hohe Pumpenleistung, um sämtlichen Nutzern den gleichen Heizungskomfort zu gewährleisten, dadurch auch erhöhter elektrischer Stromverbrauch.

Ferner kann bei den zentralen Heizungssystemen ohne hydraulischen Abgleich das Heizkostenmesssystem nicht ordnungsgemäß arbeiten: Bei den Verdunstern sowie elektronischen Heizkostenverteiltern handelt es sich um Verhältnismesser, mit denen eine einheitliche Verhältnisgrundlage nicht gewährleistet ist.



**Abb. 3-3:** Funktion einer hydraulischen Weiche  
(Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

### 3.2.3.1 Zortström-Hydraulik

Die Verbindung unterschiedlicher Energiesysteme innerhalb einer Heizungsanlage stellt an die Anlagenhydraulik hohe Anforderungen, damit sämtliche Komponenten energieeffizient betrieben werden können. Die Solarwärme wird z. B. nur unzureichend genutzt, wenn sie nur zur Rücklaufanhebung des Wärmeerzeugers dienen soll. Die Zortström-Technologie unterstützt den Betrieb unterschiedlicher Wärmesysteme mit ihren unterschiedlichen Volumenströmen und Systemtemperaturen und erübrigt zudem die Investitionen komplizierter Hydraulikschaltungen.

Regenerative Energien, die nicht zur Alleinheizung eingesetzt werden, können auch in Kombination mit rationellen Energiesystemen verwendet werden. So kann z. B. die Kombination von Solarthermie mit Brennwertheizgeräten oder mit hocheffizienten Wärmepumpen eine optimale Lösung ergeben.

Der Einsatz regenerativer Energietechnologien beschränkt sich jedoch nicht nur auf Ein- und Mehrfamilienhäuser. Zunehmend werden die kostenlosen Energiequellen wie Sonne, Geothermie oder Umweltwärme auch für die Beheizung größerer Objekte genutzt. Als Referenzobjekte wurden z. B. etliche Gewerbeobjekte, Hotels und Verwaltungsgebäude errichtet, in denen Brennwertheizgeräte, Wärmepumpen und Pelletswärmeerzeuger im Parallelbetrieb das Gebäude mit Heizwärme versorgen.

Diese bi- und multivalenten Heizsysteme stellen aber hohe Anforderungen an die Anlagenhydraulik. So wirft z. B. die Kombination eines Brennwert- oder eines Pelletswärmeerzeugers die Frage auf, in welcher Form die Solarthermie in das hydraulische System eingebunden werden kann, damit die Solarwärme auch vorrangig und effizient genutzt werden

kann. Zu beachten ist hierbei, dass die einzelnen Wärmesysteme mit jeweils unterschiedlichen Durchflussmengen und Systemtemperaturen arbeiten. Als Folge daraus entstehen auch innerhalb des Heizsystems unterschiedliche Druckverhältnisse, die sich auf das Fließverhalten des Heizwassers auswirken. Der Nutzer erwartet aber von einem bi- und multivalenten Heizsystem die gleichen Eigenschaften wie von einer einfachen Anlage mit nur einem Wärmeerzeuger, d. h. konstante Vorlauftemperaturen, gleichmäßige Wärmeverteilung, maximale Energieausnutzung sowie jederzeit ausreichendes Brauchwarmwasser mit der gewünschten Temperatur. Ein genereller Planungsansatz sollte daher darin liegen, dass die Erfordernisse der eingesetzten Komponenten berücksichtigt werden. Wärmeerzeugung, wie z. B. Holzpellets- oder Stückholzwärmeerzeuger, Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen erfordert für einen wirtschaftlichen Betrieb eine lange Brenner- bzw. Aggregatelaufzeit. Dieses lässt sich wie folgt erklären:

- Bei Holzpellets-Wärmeerzeugern begründet sich die Notwendigkeit der langen Brennerlaufzeiten durch das Anfahrverhalten. Im Vergleich zu den konventionellen, mit Gas oder Öl betriebenen Wärmeerzeugern müssen die Holzpellets zunächst durch zusätzliche Energiezufuhr (z. B. mittels Heißluftgebläse) entzündet werden, sodass ein Glutbett entsteht. Dieser Vorgang nimmt mehrere Minuten in Anspruch.
- Bei den BHKW und Wärmepumpen verursacht ein häufiges An- und Abschalten zu geringe Nutzungsgrade und zu hohen Materialverschleiß der Einbauelemente. Zudem schalten die BHKW-Aggregate bei einer zu geringen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ab.

Aus diesem Grund muss sichergestellt werden, dass die Wärmeerzeuger die produzierte Wärmeenergie auch ständig an das Heizsystem bzw. an einen Pufferspeicher abgeben können. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Anlagenhydraulik und an das Regelungssystem damit die Wärmeabnehmerseite mit möglichst hohen und konstanten Vorlauftemperaturen betrieben werden kann. Außerdem muss sichergestellt werden, dass die Wärmeerzeuger die produzierte Wärmeenergie auch ständig an das Heizsystem bzw. an einen Pufferspeicher abgeben können. Aus diesem Grund ergeben sich besondere Anforderungen an die Anlagenhydraulik und an das Regelungssystem. Da die Wärmepumpen umso effizienter arbeiten, je niedriger die Vorlauftemperatur ist, sollte auch die Rücklauftemperatur möglichst tief heruntergefahren werden.

Die o. a. Kriterien und Kombinationen lassen erkennen, dass jeder Wärmeerzeuger eigene Anforderungen an die Betriebsweise stellt. Dieses gilt primär für den Einsatz von konventionellen Wärmeerzeugern und BHKW in multivalenten oder Mehrkesselanlagen und bedeutet auch, dass die Hydraulik das wechselnde dynamische Verhalten der unterschiedlichen Massenströme, Druckverhältnisse und Temperaturen an einem zentralen Punkt ausgleichen muss.

### 3.2.3.2 Hydraulischer Nullpunkt

Die o. a. Kriterien und Kombinationen lassen erkennen, dass jede Wärmeerzeugung eigene Anforderungen an die Betriebsweise stellt. Die Anlagenhydraulik muss jedoch bei bi- und multivalenten Heizsystemen dem Holzpelletswärmeerzeuger oder der Wärmepumpe ebenso gerecht werden wie der damit gekoppelten Solarthermieanlage. Gleiches gilt natürlich auch

für den Einsatz von konventionellen Wärmeerzeugern und BHKW in multivalenten oder Mehrkesselanlagen.

Dieses bedeutet aber auch, dass die Hydraulik das wechselnde dynamische Verhalten der unterschiedlichen Massenströme, Druckverhältnisse und Temperaturen an einem zentralen Punkt ausgleichen muss. Diese Systemlösung lässt sich insofern lösen, als die Heizkreise der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung hydraulisch voneinander entkoppelt werden. In ein zwischengeschaltetes Gefäß mit einem entsprechend groß dimensionierten Puffervolumen leiten die Wärmeerzeuger die Heizwärme ein, während die Wärmeabnehmerkreise daraus die benötigten Massenströme aus den zugeordneten Temperaturstufen entnehmen. Dieses Gefäß, d. h. die Zortström-Technologie vereinigt das Sammler- und Verteilersystem und dient gleichzeitig als hydraulische Weiche. Der zwei- oder je nach Bedarf auch mehrstufige Aufbau des zylinderförmigen Verteilers ermöglicht es, dass die Wärmeerzeuger und die regenerativen Energiesysteme unabhängig voneinander mit ihren jeweiligen Massenströmen und Systemtemperaturen betrieben werden können. Der stufenweise Temperaturabbau bewirkt, dass die stets für die Solarthermie- und Brennwertnutzung tiefen Rücklauftemperaturen verfügbar sind.

Die Funktion als hydraulischer Nullpunkt verhindert zudem, dass sich die Pumpen der angeschlossenen Heizkreise nicht gegenseitig beeinflussen können. Letztlich können die Pumpen kleiner dimensioniert werden, was nicht nur eine kostenoptimierte Investition, sondern auch eine geringere Stromaufnahme zur Folge hat, d. h. nicht nur die Betriebskosten werden reduziert, sondern auch die Lebenszykluskosten werden optimiert. Die Funktion als hydraulischer Nullpunkt verhindert zudem, dass sich die Umwälzpumpen der angeschlossenen Heizkreise nicht gegenseitig beeinflussen können – ein entscheidender Faktor, um dem unterschiedlichen dynamischen Verhalten in der Anlagenhydraulik auch unter wechselnden Betriebsverhältnissen gerecht zu werden.

*Objektbeispiel 1: Prinzip der »Vorlaufhochhaltung« in der Nahwärmeversorgung in Regensburg*

Planung: Ingenieurgemeinschaft Dess-Falk GmbH, 90409 Nürnberg

Das Regelungsprinzip für die Nahwärmeversorgung der Wohnoase in Regensburg für 1200 Wohnungen basiert auf einer Heizungsverteilung nach dem Prinzip der Vorlaufhochhaltung.

Für eine energieeffiziente Betriebsweise der BHKW (erdgasbetriebene BHKW, 1 x 800 kW und 2 x 300 kW) und des Gas-Brennwert-Wärmeübertragers mit einer Leistung von 700 kW wird die Wärmeversorgung stets mit einer tiefen Rücklauftemperatur gefahren.

Die Besonderheit des Energiekonzeptes besteht darin, dass sämtliche Einzelgebäude der Wohnoase Regensburg durch die BHKW auch weitgehend mit Strom versorgt werden und dass nur die Abdeckung der starken Lastspitzen seitens der öffentlichen Stromversorgung erfolgt. Die drei Blockheizkraftwerke werden stromgeführt betrieben und sind daher über 24 Stunden im Betrieb. Aus diesem Grund muss innerhalb des Heizsystems sichergestellt werden, dass die laufend erzeugte Wärme auch kontinuierlich abgenommen wird. Als Systemlösung wurde hierfür ein Pufferspeicher mit einem Fassungsvermögen von 100 m<sup>3</sup> zwischengeschaltet.

Die Systemfindung für das Energiekonzept der Nahwärmeversorgung besteht in der Lösung nach einer am besten geeigneten Anlagenhydraulik mit gleichzeitig geringstem regelungstechnischen Aufwand.



**Abb. 3-4:** Hydraulische Weiche – Wohnoase Regensburg (Quelle: Zortström/A)

Da eine Anhebung der Rücklaufftemperatur zu einer Minderung in der Energieeffizienz geführt hätte, wurde hier im Umkehrschluss eine Vorlaufhochhaltung realisiert, bei der die Vorlaufftemperatur als Führungsgröße dient.

Einerseits wurde zur Nahwärmeversorgung in sämtlichen Heizkreisen eine konstante Vorlaufftemperatur von 80 °C gefordert sowie für eine energetisch optimale Ausnutzung der Wärmeenthalpie des Brennwert-Wärmeerzeugers auch eine möglichst tiefe Rücklaufftemperatur gefordert. Andererseits ermöglicht die stromgeführte BHKW-Betriebsweise eine hohe Temperaturspreizung mit einer größtmöglichen direkten Wärmeübergabe in das Nahwärmenetz ohne Umweg über den Pufferspeicher. Im Fall einer wärmegeführten BHKW-Betriebsweise würde eine Rücklauffanhebung dazu führen, dass diese im Schwachlastbetrieb (geringere Wärmeabnahme) aufgrund der geringen Temperaturspreizung abschalten, wodurch sich zwangsläufig ein nachteiliges Betriebsverhalten einstellt, d. h. es würden sich hierbei die Laufzeiten verkürzen und die Startvorgänge unnötig erhöhen. Die Vorgaben nach einer konstanten Vorlauf- und tiefen Rücklaufftemperatur können insofern nur in Abstimmung mit einer optimalen Anlagenhydraulik erreicht werden. Zu diesem Zweck wurde die Zortström-Technologie eingesetzt, wobei der Verteiler und Sammler durch die kompakte zylindrische Konstruktion mit den rundherum angeordneten Anschlüssen gleichzeitig als hydraulische Weiche dient.

Sämtliche Massenströme des hydraulischen Systems laufen an diesem Anlagennullpunkt zusammen und werden von hier aus auch gleichzeitig zu den Wärmeerzeugern geleitet und den Wärmeabnehmern verteilt. Die Wärmeerzeuger-Vorlauftemperatur wird dadurch unterstützt, dass der Heizungsvorlauf in die obere Temperaturebene des Sammel- und Verteilsystems nach der Zortström-Systemeinheit eingespeist wird. Sämtliche Wärmeerzeuger speisen in die obere Temperaturebene ein. Das Regelungsprinzip der Vorlaufhochhaltung sorgt dafür, dass die Nahwärmeheizkreise stets mit einer konstanten Vorlauftemperatur versorgt werden.

Zudem wird hier gleichzeitig der hydraulische Anlagennullpunkt gebildet und aufgrund des stufenweisen Temperaturabbaus auch die erforderliche tiefe Rücklauftemperatur erreicht. Die Zortström-Technologie bewirkt eine Entkoppelung der Wasserströme wobei gleichzeitig durch den stufenweisen Temperaturabbau auch die für eine wirtschaftliche Brennwert- und BHKW-Betriebsweise erforderlichen tiefen Rücklauftemperaturen erreicht werden. Letztlich können sich die im System integrierten unterschiedlichen Pumpen nicht gegenseitig beeinflussen. Die innerhalb der Zortström-Systemeinheit integrierten Turbulatoren trennen die Massenströme in der Form, dass sich abgestufte Temperaturzonen bilden.

Aufgrund der platzsparenden und installationstechnischen Vereinfachung sowie den sparsamen Pumpenbetrieb und Wegfall der aufwendigen hydraulischen Regelkomponenten wurde auch bei der Nahwärmeversorgung der Wohnoase Regensburg eine Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten erreicht.

*Objektbeispiel 2: BodenseeTherme Konstanz,*

Architekt: 4a Architekten GmbH, Dipl.-Ing. Alexander von Salmuth, 70376 Stuttgart ([www.4a-architekten.de](http://www.4a-architekten.de))

Die architektonische Gebäudeform der BodenseeTherme Konstanz als Segelschiff schmiegt sich, ins leicht ansteigende Terrain eingebettet, an das Ufer des Bodensees. Der Westflügel liegt wie ein gewaltiger Schiffsrumpf in See und sein Bug kragt über den See hinaus. Mit ihren beiden Gebäudeflügeln und der 78m breiten und annähernd 9m hohen Glasfassade öffnet sich diese Bäderoase zur weiten Wasserfläche des Bodensees und vermittelt dem Besucher gleichzeitig einen Blick auf die Gipfel der Voralpen.



**Abb. 3-5:** BodenseeTherme  
Konstanz  
(Quelle: Uwe Ditz, Stuttgart)

*Energiekonzept der Gebäudetechnik:*

Neben dem Wunsch nach einer hochwertigen Architektur bestand das primäre Anliegen darin, eine innovative und energetisch optimierte Gebäudetechnik zu integrieren. Insofern beinhaltete bereits die Entwurfsplanung eine ganzheitliche Konzeption bestehend aus winterlichem und sommerlichem Wärmeschutz des Gebäudes, einer primärenergetisch optimierten Wärmeerzeugung und rationeller Energieanwendung bei einer minimalen CO<sub>2</sub>-Schadstoffemission und einem komfortablen Bäderbetrieb während der gesamten Nutzungszeit.

Die Energieerzeugung besteht aus einer Absorptionswärmepumpe mit einer Leistung von 700 kW, die als Wärmequelle die heißen Abgase der Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW) nutzt. Mit der neuartig konzipierten Absorptionswärmepumpe werden das Schwimmbadwasser sowie die Fußboden-, Wand- und Bankheizungen auf die erforderlichen Betriebstemperaturen eingestellt.

Die Berechnungen auf dem virtuellen Prüfstand ergaben, dass es mit dem neuen Energiekonzept möglich ist, im Vergleich zu einer Referenzvariante mit Gaswärmeerzeuger und externen Strombezug, rund 37 % an Energie- und Betriebskosten einzusparen. Ein zusätzlicher Vorteil der Prüfstandsuntersuchung bestand darin, auch den Teillastfall zu analysieren. In der Praxis stellt der Teillastfall in der Regel eine gewisse Problematik dar, weil die Anlagen bei dieser Betriebsweise ins Takten kommen und daher infolgedessen über längere Zeit auch Schadensfälle vorprogrammiert sind.

Aufgrund der Prüfstandsergebnisse wurde eine Regel- und Steuerstrategie entwickelt, die den Wärmebedarf entsprechend der Witterungsprognose vorausberechnet und so die Arbeitsweise der Wärmepumpe optimiert. Das BHKW deckt in Verbindung mit dem 700 kW-Brennwertwärmeerzeuger die Grundlast der Gebäudeheizung und erhöht indirekt die Wassertemperaturen im 18.000 Liter fassenden Pufferspeicher, wobei gleichzeitig der Legionellenschutz für die Duschen garantiert wird. Ein zusätzlicher Gaswärmeerzeuger mit ebenfalls 700 kW dient zur Redundanz und Spitzenlastabdeckung.

In der BodenseeTherme wurde aufgrund der umfangreichen Wärmestromabnehmer mit 31 Systemkreisen und vier Temperaturstufen auf eine platz- und kostenintensive Lösungsvariante mittels konventioneller Heizungsverteiler und Sammler sowie herkömmlicher hydraulischer Weiche verzichtet. Als Systemlösung hat sich hier die innovative Zortström-Technologie angeboten, mit der sich nicht nur die Heizkreise der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung hydraulisch voneinander entkoppeln lassen, sondern die noch zusätzliche Vorteile bietet.

Die Wärmeerzeuger leiten die Heizwärme in ein zwischengeschaltetes Gefäß mit einem Durchmesser von 1,30 m ein, d. h. die Zortström-Systemeinheit mit einem entsprechend groß dimensionierten Puffervolumen, während die Wärmeabnehmerkreise daraus die benötigten Massenströme aus den zugeordneten Temperaturstufen entnehmen, ohne dass sich die Wasserströme gegenseitig negativ beeinflussen können. Die Zortström-Systemeinheit vereinigt das Sammler- und Verteilersystem durch die kompakte zylindrische Konstruktion mit den rundherum angeordneten Anschlüssen und dient gleichzeitig als hydraulische Weiche (hydraulischer Nullpunkt). Die innerhalb der Zortström-Systemeinheit integrierten Turbulatoren trennen die Massenströme in der Form, dass sich abgestufte Temperaturzonen bilden.



Der stufenweise Temperaturabbau bewirkt, dass die stets für die Brennwertnutzung und den Wärmepumpenbetrieb tiefen Rücklauftemperaturen verfügbar sind. Dieses ist ein entscheidender Faktor, um dem unterschiedlichen dynamischen Verhalten in der Anlagenhydraulik auch unter wechselnden Betriebsverhältnissen gerecht zu werden. Aus montage-technischen Gründen wurde der Heißwasservorlauf für Pumpen und Ventile nach unten verlegt. Beim Betrieb mit nur einer Heizungsumwälzpumpe ist der Schwerkraftauftrieb unwirksam.

Aufgrund der platzsparenden und installationstechnischen Vereinfachung sowie des sparsamen Pumpenbetriebs und des Wegfalls der aufwendigen hydraulischen Regelkomponenten wurde auch eine Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten erreicht. Für die angestrebte geringe Schalthäufigkeit des BHKW wurde ein Speicher mit einem Inhalt von 18.000 Liter integriert. Mittels der Zortström-Technologie wird oberhalb des Pufferspeichers stets heißes Wasser mit hoher Energiedichte vorgehalten. Das Wasser wird je nach Bedarf zugeführt oder abgegeben. Durch das sanfte Auf- und Abgleiten der Schichtgrenze im Speicher werden zudem auch ruhige Laufzeiten des BHKW ermöglicht.

Die Verbindung unterschiedlicher Energiesysteme innerhalb einer Heizungsanlage stellt an die Anlagenhydraulik hohe Anforderungen, damit sämtliche Komponenten energieeffizient betrieben werden können. Die Zortström-Technologie unterstützt den Betrieb unterschiedlicher Wärmesysteme mit ihren unterschiedlichen Volumenströmen und Systemtemperaturen und erübrigt zudem die Investitionen komplizierter Hydraulikschaltungen. Das Energiekonzept der BodenseeTherme, das konsequent den Wärmeverbrauch durch Wärmerückgewinnung senkt und die natürlichen Ressourcen in Verbindung mit einer Kraftwärmekopplung ausnutzt, hat Vorbildcharakter und bietet zugleich Lösungsansätze für die Energiekonzepte in anderen Bädern. Mit neuen Simulationswerkzeugen können die innovativen Energiekonzepte schneller entwickelt und unter realen Bedingungen geprüft werden was letztlich auch zu einer Erhöhung der Planungs- und der Betriebssicherheit beiträgt.

**Tab. 3-2:** Referenzobjekte mit Zortström-Technologie (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt                               | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
| Hallen- und Freibad in Bad Neustadt a. d. Saale | Hydraulikabgleich mit Zortström-Multi-Technologie, Zentraleinheit mit 700 mm Durchmesser für vier Temperaturstufen sowie für eine zusätzlichen Zortström-Multi mit zwei Temperaturstufen für vier Außen- und vier Innenbecken | Brennwertwärmeerzeuger 950 kW; Gas-Absorptionswärmepumpe 500 kW für Flusswasser-Wärmeentnahme aus der Saale sowie Blockheizkraftwerk mit 190 kW. |
| Messe Nürnberg                                  | Mit einem 3-Temperaturstufen-Zortström zur maximalen Brennwertnutzung, mit 22 Systemkreisen und einer Gesamtleitung von 42 MW   | Hydraulik-Zentraleinheit in der Heizzentrale und das Verteilnetz innerhalb des Messegeländes   |
| Musikvereinshaus Wien                           | Hydraulikabgleich für die Kühl- und Wärmekreise mit Zortström-Multi-U   | Mengenvariabel für tiefe Rücklauftemperaturen ohne Ladepumpe   |



### 3.2.4 Mess-, Steuer- und Regelungstechnik/ Gebäudeleittechnik

Der steigende Kostendruck zwingt die Besitzer und Betreiber von Gebäuden im privatwirtschaftlichen und im öffentlichen Bereich immer mehr, beim Gebäudebetrieb nach Kosteneinsparpotenzialen zu suchen. Die optimale Methode, mit deren Hilfe die Betriebs- und Unterhaltungskosten nachhaltig gesenkt werden können, besteht in einem Technischen Gebäudemanagement.

Komplexe Neubauten ohne eine leistungsfähige Gebäudeautomation (GA) sind nicht mehr zeitgemäß. Der Trend in Richtung »Intelligentes Gebäude« gilt auch für den Gebäudebestand, z. B. für die energie- und kostenintensiven Gebäude der Verwaltungen, Hochschulen, Universitäten, etc. Hierfür werden derzeit leistungsfähige Facility-Management-Systeme aufgebaut, die auch stets eine intelligente Gebäudeautomationstechnologie einbinden. Um einen freien Wettbewerb zu gewährleisten werden hierbei eine herstellerneutrale Planung und eine offene Kommunikation angestrebt.

Um dem Anspruch nach einer hohen Flexibilität in der Bereitstellung des aktuell erforderlichen Raumbedarfs optimal gerecht zu werden, sind tendenzielle Planungsbestrebungen zu »Raummodulen« zu verzeichnen. Hierbei bildet ein Raummodul die kleinste Einheit, die durch die Kombination mit anderen Raummodulen zu tatsächlich benötigten Räumen führt. Das Ziel ist es bei entsprechender Architektur- und Gebäudetechnikplanung die Umsetzung von Räumen durch wenige bauliche Eingriffe vorzunehmen. Die technischen Einrichtungen werden lediglich über die Software zur neuen Funktion verbunden. In diesem Segment liegt einer der großen Vorteile der modernen Bussyteeme begründet. Zu Beginn der Projektierung wird eine Auflistung sämtlicher Raumarten mit der Beschreibung sämtlicher Funktionen aller Gewerke erstellt. Hierbei ist eine enge Abstimmung mit dem Nutzer wichtig. Aus den Raumanforderungsprofilen entwickeln sich die Raumtypen, z. B. Einzel-, Gruppen-, Großraumbüros oder Konferenz- und Seminarräume. Die Beschreibungen sind organisationsbezogen und unabhängig von der späteren Wahl des Systems. Die Praxis lässt erkennen, dass selbst hochkomplexe Gebäude auf unter 20 verschiedene Raumtypen reduzierbar sind.

#### 3.2.4.1 Die »Weltnorm« DIN EN ISO 16484

Der Begriff »Weltnorm« ist im engeren Sinne zwar überzogen, beruht jedoch auf der Tatsache, dass sich die Richtlinie VDI 3814 mit den GA-Funktionsfestlegungen bei CEN (Europannorm) sowie auch bei ISO (Internationale Norm) als Funktionsliste weltweit durchgesetzt hat. Der ursprünglich vorgesehene Teil 1 »Übersicht und Definitionen« in Form eines Glossars der Gebäudeautomation entfällt, weil die einzelnen Blätter jeweils ihre zugeordneten Begriffe sowie auch eine Übersicht über die einzelnen Teile der Normenreihe enthalten. Aus diesem Grund wurde der geplante Teil 7 zum Teil 1 und für Teil 7 soll die DIN EN 15232 als Basis verwendet werden.

Die DIN EN ISO 16484-1 wird Teil der Normenreihe EN ISO 16484 für Gebäudeautomation und beinhaltet nachfolgende Teilbereiche:

- Teil 1: Projektplanung und -ausführung
- Teil 2: Hardware
- Teil 3: Funktionen
- Teil 4: Anwendungen (insbesondere Raumautomation nach VDI 3813-2)
- Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll (BACnet)
- Teil 6: Datenübertragungsprotokoll – Konformitätsprüfung
- Teil 7: Auswirkungen der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements auf die Energieeffizienz von Gebäuden.

Der Teil 1 beschreibt das planmäßige Vorgehen bei der Ausführung von Projekten der Gebäudeautomation sowie bei der Systemintegration. Im Teil 2 werden die Anforderungen an die Komponenten von Systemen der Gebäudeautomation beschrieben. Im Teil 3 wird die Anforderung an die Gesamtfunktionalität sowie an die Planung und an die Projektierung von Systemen der Gebäudeautomation beschrieben. Der Teil 4 beinhaltet die Applikationen für die kommunikativen Automatisationsanwendungen und spezielle Geräte, wie z. B.:

- Optimierung der Automatisierung
- Heizung
- Gebläsekonvektoren und Induktionsgeräte
- Einzelraumregelung für Konstantvolumen und variable Luftvolumen-Anlagen sowie für Kühldecken
- Raumautomation.

Der Teil 5 spezifiziert das Kommunikationsprotokoll für die interoperativen Systeme der Gebäudeautomation. Das Protokoll beschreibt eine umfassende Anzahl an Regeln um codierte Daten mit alphanumerischen, analogen und binären Informationen zwischen den Einheiten zu übertragen. Im Teil 6 werden die technischen Anforderungen an die Testumgebung und Testmethoden beschrieben um die Produkte auf ihre Übereinstimmung mit dem Protokoll zu überprüfen. Der Teil 7 wurde aus der DIN EN 15232 abgeleitet und nimmt Bezug auf die Richtlinie 2002/91/EG vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.

Aufgrund der erforderlichen Spezialkenntnisse und der besonderen Rolle der Gebäudeautomation innerhalb der Technischen Gebäudeausrüstung müssen bereits beim Entwurf besondere Gesichtspunkte beachtet werden. Hierzu zählen die Aspekte:

- Automations- und Bedienkonzepte
- Energieeinsparung
- Systemintegration in einer allgemein verständlichen Sprache.

Durch einen konsequenten Einsatz der Busstandards können auch sehr hohe Informationsdichten erreicht werden und ein Zugriff auf sämtliche Gewerke möglich sein. Hieraus ergeben sich zusätzliche Leistungsmerkmale, die auch eine erhöhte Optimierung der Betriebsführung und des Bedienkomforts ermöglichen. Der Teil 1 der GA-Weltnorm EN ISO 16484 befindet sich derzeit im Prozess der ersten Abstimmung bei CEN und ISO. Als Nationale Norm wurde sie im März 2011 ausgegeben.

Die Gebäude- und Raumautomation gehört letztlich auch zu den effektivsten Möglichkeiten zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich und dieses sogar bei einer positiven Rendite. Die größten Potenziale zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen stecken im Gebäudesektor, d. h. in Wohngebäuden sowie in gewerblichen und öffentlichen Immobilien.

Nicht nur eine optimale Wärmedämmung und der Einsatz von innovativer Bauphysik, sondern auch energiesparende Automationssysteme, innovative Heizungs-, Raumluft-, Klima- und Kälteanlagen sowie Beleuchtungstechnik bilden hier die wichtigsten Bereiche. Hinzu kommen primär in großen Gebäuden, wie Büro- und Verwaltungsgebäude, aber auch in Krankenhäusern und Schulen etc. Gebäudemanagementsysteme, die die Energieverwendung für den Nutzer transparent machen. Da diese Investitionen in der Regel erheblich mehr Energie einsparen, als für die Finanzierung und Betrieb aufzubringen ist, sind sie für den Entscheider (Bauherrn, Investor, Betreiber, etc.) besonders wirtschaftlich. Komplexe Neubauten ohne eine leistungsfähige Gebäudeautomation (GA) sind nicht mehr zeitgemäß.

### 3.2.4.2 Energieeffiziente Gebäudeautomation

Die neue Europeanorm EN 15232 »Energieeffiziente Gebäude, Auswirkungen der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements« klassifiziert die Gebäudeautomationskomponenten hinsichtlich ihres Einflusses auf den Energieverbrauch von Gebäuden. Mit der Verordnung 2002/91/EG vom 16. 12. 2002, zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD), soll das Ziel erreicht werden, die Energieeffizienz von Immobilien zu verbessern.

Zu den wichtigsten von der Richtlinie vorgeschriebenen Maßnahmen gehören die Erstellung von Energiezertifikaten für Gebäude (Energieausweis), die regelmäßige Inspektion von Wärmeerzeugern und RLT-Klima-Kälteanlagen, die Ernennung unabhängiger Experten für diese Aufgaben sowie die Entwicklung von Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Energieeffizienz und die Festlegung von Mindestanforderungen an Gebäude. Es bleibt jedoch den Mitgliedstaaten überlassen, wie sie diese Vorgaben umsetzen. Als Hilfestellung hat die EU das für europäische Normen verantwortliche Europäische Normungskomitee CEN damit beauftragt, Normen und Methoden zur Berechnung der Energieeffizienz von Gebäuden und zur Einschätzung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt auszuarbeiten. Im Vordergrund standen als Einzelthemen zunächst die RLT-Klima-Kältetechnik, Heizungs- und Beleuchtungstechnik sowie das thermische Verhalten von Bauteilen.

### 3.2.4.3 Vier Effizienzklassen der Gebäudeautomationssysteme

Auf Initiative der Gebäudetechnik-Industrie veranlasste das CEN auch die Erarbeitung einer Richtlinie für die Gebäudeautomation aus der die EN 15232 »Energieeffiziente Gebäude, Auswirkungen der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements« entwickelt wurde. Die EN 15232 spezifiziert Methoden zur Beurteilung des Einflusses der Funktionen der Gebäudeautomation und des technischen Gebäudemanagements auf den Energieverbrauch von Gebäuden. Die Einteilung der Gebäudeautomationssysteme erfolgt nach der neuen Norm in vier unterschiedlichen Energieeffizienzklassen:

- Klasse D entspricht Systemen, die nicht energieeffizient sind; Gebäude mit derartigen Systemen sind zu modernisieren, neue Gebäude dürfen nicht damit ausgerüstet werden
- Klasse C entspricht dem aktuellen durchschnittlich anzutreffenden Stand
- Klasse B bezeichnet weiterentwickelte Systeme
- Klasse A entspricht hoch effizienten Systemen.

Zudem enthält die DIN EN 15232:2007-11 Verfahren zur Berechnung der Energieeffizienz unter Einbezug von Nutzerprofilen für unterschiedlich komplexe Gebäudetypen: Büros, Hotels, Klassenräume, Hörsäle, Restaurants, Großhandelszentren und Krankenhäuser. Aus der Kombination dieser Elemente, der Aufgabe und den Auswirkungen der DIN EN 15232 ergeben sich klare Vorgaben für das Erlangen der zugeordneten Effizienzklasse.

Die DIN EN 15232 greift indirekt auch in die Vorgaben der EnEV ein. Die Gebäudeautomationssysteme werden durch die Unterteilung in vier unterschiedliche Effizienzklassen unter Einbeziehung der jeweiligen Nutzerprofile unterstützt. Derzeit versuchen viele neue Ansätze, Normen, Richtlinien und Zertifizierungssysteme den Markt zu erobern.

Heute geben Softwaretools die Möglichkeit die großen, in der Gebäudeautomation anfallenden Datenmengen systematisch zu analysieren. Analog zu den Analysen der Thermografie, lassen sich mit den Softwaretools die Extremwerte und Korrelationen entdecken. Die Assimilation dieser Werte kann versteckte Einsparpotenziale von 20 bis 30% erkennen.

### **Zertifizierte Komponenten**

Damit die EBPD ihre Wirksamkeit voll entfalten kann, ist eine einheitliche, europaweit gültige Zertifizierung der einzelnen Komponenten, aus denen die Systeme aufgebaut sind, entscheidend. Der Europäische Verband der Hersteller von Gebäudeautomation eu.bac (European Building Automation and Controls Association) hat die Federführung bei der Zertifizierung von Produkten übernommen. So wurden als erste Geräte im September 2007 einige Einzelraumregler zertifiziert. Im Anschluss daran erfolgt die schrittweise Freigabe von unterschiedlichen Anwendungen, z. B. Radiatoren, Kühldecken, etc. In Vorbereitung sind auch die Zertifizierungen von Feldgeräten wie Sensoren (Temperaturfühler) und Aktoren (Ventile und Antriebe).

#### **3.2.4.4 Gebäudeautomation und Feldbustechnologie**

Die GA stellt in der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) ein besonders anspruchsvolles Sondergebiet dar, das ohne differenzierte Kenntnisse zahlreicher TGA-Fachbereiche und der DV-Technologie nicht erfolgreich bewältigt werden kann. Wegen der erforderlichen Spezialkenntnisse und der besonderen Rolle der GA innerhalb der TGA hat der Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) im April 2005 eine umfassende Arbeitshilfe für GA herausgegeben. Die AMEV-Empfehlung »GA 2005« erläutert wesentliche Aspekte moderner GA-Systeme wie Automations- und Bedienungskonzepte, Energieeinsparung und Systemintegration in allgemein verständlicher Sprache. Sie gibt hilfreiche Hinweise für einen wirtschaftlichen Einsatz von GA-Systemen. Auf der Grundlage langjähriger Erfahrungen wurden praktische Hinweise für die Planung, Ausführung, Abnahme und den Betrieb der Gebäudeautomation zusammengetragen. Zudem be-

nennt diese Empfehlung auch zahlreiche Beispiele für ausgeführte Projekte in öffentlichen Gebäuden mit herstellerübergreifender Systemintegration.

In der Gebäudeautomatisierung konkurrieren mehrere Feldbussysteme miteinander. Damit aber ein komplexes Netzwerk wie die Gebäudeleittechnik reibungslos funktioniert, müssen sämtliche Bus-Teilnehmer mit der gleichen Sprache kommunizieren. Zudem wird hierzu auch ein einheitliches Datenprotokoll erforderlich. Je nach Einsatzfall und Kosten werden hierzu Kommunikationsbusse, wie Industrial Ethernet, Profibus, LON, EIB, etc. als Verbindungsglieder eingesetzt. Auf der Feldebene hat sich, neben dem Interbus, der Profibus durchgesetzt. In der Gebäudeautomation dominiert der international standardisierte Installationsbus EIB bzw. der LON-Bus.

### **KNX-Standard**

Der KNX ist der einzige weltweit anerkannte internationale Standard für die Haus- und Gebäudesystemtechnik. Er erfüllt die Anforderungen der beiden europäischen Standards Cenelec EN50090 und CEN EN 13321-1 und der internationalen Norm ISO/IEC 14543-3.

In den frühen neunziger Jahren entstanden mit Batibus, EIB und EHS die Vorgänger von KNX. Im Jahr 1997 schlossen sich die drei Organisationen zusammen, um gemeinsam den Markt für intelligente Haustechnik zu entwickeln. Im Frühling 2002 wurde die KNX-Spezifikation von der neu ins Leben gerufenen KNX Association vorgestellt. Sie basiert auf der EIB-Spezifikation und wurde durch neue Konfigurationsmechanismen und Übertragungsmedien erweitert, die ursprünglich von Batibus und EHS entwickelt wurden.

Die KNX-Spezifikationen werden zunehmend auch im Bereich Heizung, Klima und Lüftung (HLK) eingesetzt. Deshalb schlug die KNX Association der CEN vor, KNX ebenfalls als europäischen Standard in der Gebäudeautomation anzuerkennen. CEN akzeptierte den Vorschlag und die KNX-Spezifikationen wurden von CEN als EN 13321-1 veröffentlicht. Im November 2006 wurde das KNX-Protokoll inkl. aller Übertragungsmedien (TP, PL, RF, IP) als ISO/IEC 14543-3-x zur Veröffentlichung als internationaler Standard freigegeben. Damit ist KNX der weltweit einzige offene Standard für die Haus- und Gebäudesystemtechnik.

### **Ethernet**

Das Ethernet wird bisher primär im Bereich der Bürokommunikation für lokale Netzwerke und Internet verwendet. Zunehmend gewinnt diese Technik aber auch in der industriellen Automatisierungstechnologie an Bedeutung.

### **Profibus**

Der Profibus zählt zu den Universalbussen, die umfangreiche Kommunikationaufgaben im Bereich der MSR-Anlagen übernehmen können. Der Profibus-DP ist aufgrund seiner Geschwindigkeit und niedrigen Anschlusskosten besonders geeignet für die Kommunikation auf der Steuerungsebene.

### **EIB – European Installation Bus**

Die höheren Anforderungen an Flexibilität und Komfort der Elektroinstallation, verbunden mit einer Minimierung des Energiebedarfs, haben zur Entwicklung der Gebäudesystemtechnologie geführt. Der darin verwendeten Bustechnologie liegt ein gemeinsames europäisches

Konzept zugrunde, der European Installation Bus (EIB). Hierbei haben sich zahlreiche Hersteller in der European Installation Bus Association (EIBA) zusammengeschlossen. Die Mitgliedsfirmen der EIBA stellen sicher, dass buskompatible Produkte zur Verfügung stehen. Hierdurch können auch Geräte verschiedener Hersteller in ein und derselben EIB-Anlage betrieben werden.

## **LON-Bustechnologie**

Unter den verschiedenen Bus-Systemen zählt der LON (Lokal Operierendes Netzwerk) zum meist verbreiteten Feldbussystem in der Gebäudeleittechnik.

Im Wesentlichen gelten für den LON die gleichen Aussagen wie für den EIB. Bis auf die größere Anzahl zur Verfügung stehender Medien, insbesondere schnellerer, mit denen Backbonestrukturen einfach aufgebaut werden können, unterscheiden sich die grundlegenden Eigenschaften der Systeme EIB und LON nur unwesentlich. Größere Unterschiede sind allerdings bei der Programmierung ersichtlich. Hier bieten sich für die verschiedensten Anforderungen sehr unterschiedliche Programmierertools an. Zudem können beim LON auch weiterführende Funktionalitäten über die sogenannten Plug-ins realisiert werden. Auch die Inbetriebnahme ist vergleichbar aufwendig und ebenso das Risiko des Ausfalls des Gesamt- oder Einzelsystems, abhängig von der Erfahrung des Programmierers.

Die LON-Bustechnologie ermöglicht ganzheitliche Lösungen für eine Vielzahl von Gebäudefunktionen. So sind neben der Beleuchtung die innen und außen liegenden Jalousien und Markisen der Fassadenfenster sowie der Verdunkelungsbehang in der Tageslichtdecke des großen Saals integriert. Das multifunktionale, Gewerk übergreifende Zusammenspiel reduziert die erforderlichen Steuerungssysteme und somit auch die Investitions- und Folgekosten. Wie auch bei anderen Bustechnologien, so können mit der LON-Bustechnologie für Heizungs-, RLT- und Klimaanlage, die Überwachungs- und Meldeanlagen, Beleuchtungs- und Sonnenschutzsteuerungen sowie das Lastmanagement zusammengefasst werden. Das Ziel der Gebäudeautomation ist es, sämtliche technischen Prozesse Gewerke übergreifend vom einzelnen Raum bis zur zentralen Energieversorgung und Energieverteilung optimal miteinander zu verknüpfen und darzustellen.

## **Strukturierte Verkabelung**

Die Gebäudeautomation ist bereits heute in die allgemeine Kommunikationstechnologie von Gebäuden eingebunden. Jedes moderne Gebäude enthält unter der Bezeichnung Local Area Network (LAN) eine strukturierte Verkabelung, die jeden Raum für die Verbindung von Daten und Sprache erschließt. Über aktive Komponenten wie Router und Switches werden sämtliche Kommunikationsverbindungen intern und extern ermöglicht.

Der Zukunftstrend geht dahin, dass sich die gebäudetechnische Kommunikation immer stärker in die vorhandenen Kommunikationsdienste integrieren lässt und sich somit ein weiteres Kostenoptimierungspotenzial entwickelt. Die Protokolle wie KNX/EIB oder LON werden dennoch nicht ihre Bedeutung verlieren, weil sie weiterhin eine steigende Anzahl von Aktoren und Sensoren mit standardisierter Software anbieten, die mit wenig Verkabelungsaufwand in die Baumstruktur eingebunden werden. Entscheidend ist jedoch stets der einfache und kostengünstige Übergang von BACnet, KNX/EIB oder LON in Netzwerke wie Ethernet und Internet, bei dem die genaue Objekt- und Dienstdefinition beibehalten wird.

### Frühzeitige Systemintegration

Konzeptionell beginnt der Prozess der in der Planungsphase, in der die Weichen für die Kompatibilität und Interoperabilität gestellt werden. Bereits hier gibt es den Bedarf nach Standardfunktionen und Standardobjekten, um die Kommunikation zwischen allen beteiligten Planungs- und Ausführungspartnern in Zukunft effizienter und kostenoptimierter zu gestalten. Der eigentliche Systemintegrator ist der auszuführende Unternehmer, der durch die Verwendung von Standards sowie geeigneten Kommunikationsprotokollen und Schnittstellen die Systemeinheit ermöglicht. In diesem Tätigkeitsfeld entsteht ein neues Berufsbild für die Gebäudetechnik, das einerseits die Kenntnisse über die gebäudetechnischen Prozesse der unterschiedlichsten Gewerke und die eingesetzte Installationstechnik sowie andererseits ein umfangreiches Wissen über die Informations- und Kommunikationstechnologie erforderlich macht.

### Koordinationen und Funktionen

Eine Herausforderung ist die ökonomisch sinnvolle Koordination architektonischer Funktionalitäten mit den klassischen Technikgewerken für die Energiebereitstellung und Energieverteilung. Hierzu gehören z. B.

- Fenster mit Motorantrieben, die in die Gebäudeautomation einbezogen sind, in Verbindung mit einer Sperre der Energiezufuhr, z. B. »Schließen der Heizventile«
- dezentrale Fassaden-RLT-Geräte, Fassadenkonzepte mit transparenter, gesteuerter Wärmedämmung und Solarwärmespeicherung
- Photovoltaikfassaden mit Netzkopplung
- thermoaktive Decken (Betonkernaktivierung für Heizen und/oder Kühlen)
- Innenzonenbeleuchtung und Sonnenschutz mit nach dem Sonnenstand gesteuerten Prismen und Spiegeln
- Konstantlichtregulierung und Präsenzmelder
- programmgesteuerter Ablauf von sicherheitsrelevanten Betriebsweisen durch Kopplung von Gefahrenmeldesystem (Brandschutzmeldesysteme, etc.) und Gebäudeautomation.

Ein wesentlicher Bestandteil der Normierung ist die systemneutrale Datenübertragung für die Gebäudeautomation. Hierzu gehört auch die mögliche Verknüpfung zwischen den verschiedenen Gewerken, die den Komfort und die Energieeffizienz erhöhen können.

#### 3.2.4.5 Normierte Standardbussysteme

Der Begriff »BUS« steht für Binary Unit System und umschreibt einen im Bereich der Datenverarbeitung verwendeten Begriff für eine Datenverbindung, an der mehr als zwei Teilnehmer angeschlossen werden können. Den Durchbruch in der Gebäudeautomation in Europa haben primär drei Protokolle erreicht.

- BACnet (Building Automation and Control Network)
- KNX/EIB (Konnex, vormals European Installation Bus)
- LON (Local Operating Network).



Alle drei Busstandards werden insofern als »offene Systeme« bezeichnet, weil sie unter genau definierten Rahmenbedingungen die Verknüpfung von Produkten erlauben. Hierbei lassen sich Tendenzen des bevorzugten Einsatzes erkennen. Während der KNX/EIB seinen Einsatz primär in der Elektroinstallation sowie zur Beleuchtungs-, Jalousiesteuerungen und zur Raumautomation hat, wird der LON zur Feldbusanwendung für die Gewerke der TGA (Heizungs-, Raumluft-, Klima- und Kältetechnik) sowie zur komplexen Raumautomation eingesetzt. Beim BACnet handelt es sich um einen Kommunikationsstandard, der primär in der Managementebene von Gebäudeautomationssystemen angesiedelt wird. Der BACnet-Standard wird zudem vorrangig für frei programmierbare Steuerungen und Regelungen benutzt.

Die Begriffe Ethernet, TCP/IP, etc. suggerieren, dass es praktisch keine Schnittstellenprobleme zwischen den Systemen mehr gibt und sämtliche komplexe Funktionen der technischen Gebäudeausstattung automatisch kommunizieren und zusammenarbeiten. Unterstützt wird dieses durch die zunehmende Bedeutung der offenen Protokolle aus dem Bereich der Gebäudeautomation wie BAC-net, LON, EIB, Profibus, etc.

Im Bereich der Gebäudeautomation bestehen nicht nur die Anforderungen nach der Bedienung, sondern zunehmend nach einer Komplexität der Systeme untereinander. Hierbei haben zunehmend auch die Anforderungen nach dem Energiemanagement und des Energieverbrauchs zur Folge, dass die Teilgewerke der Technischen Gebäudeausstattung miteinander kommunizieren müssen und unabhängig voneinander arbeiten dürfen. So muss z.B. die Klimaanlage die aktuelle Personalbelegungsdichte aus der Zutrittskontrolle, die Energiekostensituation aus dem Energiemanagementsystem und die Verfügbarkeit der Medien wie Kalt- und Warmwasser erkennen, um letztlich auch die erforderlichen bzw. gewünschten Raumkonditionen effizient sicherstellen zu können.

Diese Schnittstellen erweitern sich dynamisch, da zunehmend auch die Gebäudestruktur (multifunktionale Fassaden, Tageslichtlenkssysteme, Bauteilaktivierungen, VIP, TWD, etc.) die Funktionen übernehmen, die in der Vergangenheit den klassischen Gewerken der Heizung, RLT und KlimaKälte zugeordnet waren. So erfolgen z.B. die thermische Aktivierung des Baukörpers zur Kühlung und Heizung sowie die intelligente Fassade mit kontrollierter Lüftungsfunktion. Hierdurch werden auf den unterschiedlichsten Ebenen der Gebäudeautomation auch verschiedenartige Kommunikationsaufgaben erforderlich, die von einem einzelnen System nicht abgedeckt werden können.

Zum Teil wird hierbei auch der Einsatz systemspezifischer Lösungen erforderlich. So sind z. B. auf der Feldebene die Sensoren für Temperatur, Stellmotoren für Regelventile, Luftventile und Klappen oder Raumbediengeräte sowie Einzelraumregelungen, die erforderliche Intelligenz der Steuerung und die dazu erforderliche Kommunikation einfach. In diesem Bereich kommen primär der EIB und die Weiterentwicklung der KNX zu Anwendung, weil hier eher die elektrische Installationstechnologie im Vordergrund steht. Das LON-System wird dementsprechend in dem Bereich mit höheren Anforderungen, wie z. B. in der Heizung, RLT und KlimaKälte-Technologie im Zusammenwirken mit der multifunktionalen Fassade, Tageslichtsteuerung und künstlichen Raumbeleuchtung, eingesetzt.

Zunehmend intelligente Systeme und somit auch komplexere Kommunikationsaufgaben ergeben sich im Bereich der Automatisierungsebene, in der zum Teil mittels frei programmierbarer Funktionen sämtliche Gewerke miteinander kommunizieren müssen. So müssen z. B. den RLT- und Klimakälte-Systemen relevante Daten der Heizungsanlage und Kältema-



schine bzw. der solaren Kälteerzeugung zur Verfügung stehen, um im Zusammenspiel mit den Randbedingungen der Gebäudehülle und der Fassade zu einem optimalen Ergebnis für die Nutzer bei einem minimalen Energieverbrauch zu gelangen.

In diesem Bereich, wie auch in der Managementebene mit den Überwachungsfunktionen und Ereignismeldungen, wird die hohe Funktionalität des BACnet-Protokolls bevorzugt eingesetzt. Zusätzliche Schnittstellen zu den Facility-Management-Systemen und zum Energiemanagement sowie Energiecontrolling runden die Funktionen der modernen Gebäudeleittechnik ab.

*Objektbeispiel:* Zentralbibliothek Ulm, Architekten: Gottfried Böhm, Köln

Die neue Zentralbibliothek hat eine Grundfläche von 29 x 29 m, kragt in den beiden Obergeschossen aus und geht oberhalb des 2. OGs in eine steile Pyramide über, die bis zur Spitze eine Höhe von 35 m über Terrain erreicht. Der Neubau wurde in Skelettbauweise mit einem Rastermaß von 6,60 m errichtet, und verfügt über eine Nutzfläche von über 4600 m<sup>2</sup>.



**Abb. 3-6:** Zentralbibliothek Ulm (Quelle: Duckek, Ulm)

### Energiekonzept und Gebäudetechnik:

Der Gebäudekörper und das Klimakonzept wurden mit allen beteiligten Fachplanern (TGA-Conplaning GmbH, Ulm) und der Unterstützung durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart so konzipiert, dass ganzjährig ein behagliches Raumklima bei einem minimalen energetischen Einsatz sichergestellt werden kann.

Das Herz der energetisch optimierten Betriebsweise bildet die Gebäudeleittechnik. Der nutzbare Klimapuffer innerhalb der Doppelfassade vom 3. OG bis 6. OG wird über die großflächigen Lüftungsklappen aktiviert. Die Steuerung der Zu- und Abluftklappen kann einerseits an den Touchpanels in den zugeordneten Geschossen manuell von Hand oder andererseits zentral von der Gebäudeleittechnikstation durchgeführt werden. Im Automatikbetrieb erfolgt die Steuerung in Abhängigkeit von der Außentemperatur, der Fassadenzwischenraumtemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit sowie vom Regen- und Windeinfluss. Damit in der Übergangszeit und im Winter der solare Wärmeeintrag energetisch genutzt wird, wurde eine Schnittstelle zu den Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen (MSR) hergestellt. Hierbei wurde die Hierarchie für die Steuerung durchgeführt: Fassadenklappen »AUF« und »ZU« in Abhängigkeit von der Temperatur innerhalb der Zwischenfassade für die Parameter »Heizen/Kühlen« und »Nachtauskühlung«. Die übergeordneten Sicherheitsfunktionen, wie z. B. Regen- und Windeinfluss, haben generell die erste Priorität.

### 3.2.4.6 Referenzprojekte

**Tab. 3-3:** Referenzprojekte mit Gebäudeleittechnik (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
| Kunsthaut Graz/A-,<br>Cook und C. Fournier,<br>London            | Gebäudeleittechnik (GLT) mit<br>LON-Netzwerk, 26 DDC-Auto-<br>matisationsstationen   | Lichttechnik, Frequenzumformer<br>für Pumpenantriebe   |
| VIKA-Bürogebäude in<br>Aachen,<br>Arch. Hahn Helten, Aa-<br>chen | Balanced Office Building<br>(BOB-Konzept)<br>Gebäudeleittechnik (GLT)  | Bauteilaktivierung (BTA);<br>28 Erdsonden, 45 m tief   |
| Volkswagen Bibliothek<br>Berlin; Arch. Walter A.<br>Noebel       | Gebäudeleittechnik (GLT)<br>Die Steuerung des Sonnenschutzes<br>erfolgt fassadenweise und witterungsabhängig. In den individuell<br>genutzten Bereichen, wie Büro-<br>und Schulungsräume, kann der<br>Sonnenschutz vom Nutzer manuell<br>übersteuert werden. | Raumlufttechnik mit Wärmerück-<br>gewinnung, Regenerative und<br>passive Kühlung, thermisch akti-<br>vierte Bauteilsysteme (TAB),<br>Wärmepumpe, Wärme- und Kälte-<br>speicherung.<br>Der über eine Fläche von 8100 m <sup>2</sup><br>konzipierte Bodenplattenabsorber<br>nutzt das Erdreich unter dem Ge-<br>bäude als saisonalen thermischen<br>Speicher und dient mittels Wärme-<br>pumpe zur Heizung/Kühlung der<br>TAB. |

### 3.2.5 Wärmespeichersysteme

Die Speicherung von Wärme, Kälte und elektrischem Strom wird in den kommenden Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Speicher werden hierbei nicht nur zur Versorgungssicherheit des alten Energiessystems beitragen, sondern zunehmend den erneuerbaren Energien sowie den rationellen Energieanwendungen zum Durchbruch verhelfen. Entscheidend für die Effizienz einer Solarthermieranlage ist die richtige Auswahl und Dimensionierung des Speichers, weil das Energieangebot der Sonne zeitlich nicht mit den Anforderungen des Wärmebedarfs und der Warmwasserbereitung zusammenfällt. Wenn nur das Warmwasser solar erwärmt wird, kommt in der Regel ein bivalenter Solarspeicher (zwei getrennte Heizregister im Speicher) bzw. ein Schichtenspeicher zum Einsatz. Bei der solaren Heizungsunterstützung, die für sehr gut wärmedämmte Gebäude Anwendung findet, wird die Wärme in einem Pufferspeicher bevorratet.

Die bivalenten Druckspeicher sind an zwei Kreisläufe, den Solarkreislauf und den für die Nachheizung, angeschlossen. Ein Wärmeübertrager gibt die vom Kollektor kommende Wärme der Solarflüssigkeit an das Wasser im Speicher ab. Der zweite Wärmeübertrager erwärmt das Wasser durch den Wärmeerzeuger auf die Solltemperatur.

Die Schichtenspeicher nutzen das physikalische Prinzip, dass warmes Wasser nach oben strebt, kaltes nach unten sinkt. Insofern wird die Effizienz im Vergleich zu den konventionellen Speichern deutlich gesteigert. Das warme Wasser sammelt sich daher in der warmen Zone und kann dort dem Speicher entnommen werden, das heiße Wasser befindet sich dementsprechend in der höchsten Zone.

Die Wärmespeicherung wird zurzeit noch von den sensiblen Wasserspeichern angeführt, die ausgereift sind und relativ kostendeckend in das Anlagensystem zu integrieren sind. Die solare Wärme kann über Wochen und Monate gespeichert werden. Nachteilig wirkt sich allerdings der benötigte Platzbedarf aus. Im Wärmebereich stellt u. a. der »Solarspeicher« eine zentrale Systemkomponente dar. Die neuen Entwicklungen zeigen deutlich, dass hier Systementwicklungen gefragt sind, mit denen die sommerliche Wärme für den Winter vorgehalten werden kann (Wärmepumpensystemvarianten; Solarthermiehybridsysteme, etc.). Die Nutzung der Solarenergie für thermische Anwendungen liegt weiterhin im Trend. Neben der konventionellen Solarthermienutzung für die Warmwasserbereitung werden im Bereich der Energiesparhäuser auch solarunterstützte Heizungssysteme eingesetzt. Eine entscheidende Problematik besteht allerdings darin, dass der Heizwärmebedarf phasenverschoben zu den Solarenergieeinträgen angefordert wird. Aus diesem Grund besteht ein besonderes Interesse an innovativen Technologien zur langfristigen Wärmespeicherung. Hierzu bieten sich gegenüber den konventionellen Speichersystemen Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher an, die eine höhere Speicherkapazität gewährleisten.

#### 3.2.5.1 Latentwärmespeicher

In der Gebäudetechnik werden Latentwärmespeicher u. a. zur Speicherung der Solarenergie und Abwärme (Wärmepumpen) verwendet. Der Vorteil der Latentwärmespeicher gegenüber den konventionellen Warmwasserspeichern besteht in dem um ca. zwei Drittel geringeren Platzbedarf bei gleicher Energiemenge sowie in der Energiespeicherung über einen längeren Zeitraum. Die spätere Wärmeabgabe erfolgt zudem auf dem ursprünglichen Temperatur-

niveau. Während Wasser bei Raumtemperatur eine Wärmekapazität von  $4,2 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  hat, speichert ein wachsartiger Stoff wie z. B. Paraffin, der bei dieser Temperatur seinen Aggregatzustand von fest zu flüssig wechselt, ca.  $200 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ . Paraffin wird primär aus den Rückständen der Erdölraffination hergestellt und besitzt nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Die unterschiedlichen Paraffinarten haben verschiedene Erstarrungstemperaturen.

Um die Primärenergiekosten zu reduzieren und gleichzeitig die Ressourcen zu schonen sowie die Schadstoffemissionen zu senken, wird die an sonnigen Tagen umgewandelte Strahlungsenergie in Speichern mit möglichst hohen Temperaturen und über einen möglichst langen Zeitraum gepuffert.

Aus technischer Sicht handelt es sich bei der Latentwärme um die Bindungsenergie der Moleküle eines Stoffes, die auch als innere Energie definiert wird. Diese innere Energie wird als Wärme beim Wechsel eines Stoffes in einen anderen Aggregatzustand, z. B. von flüssig in fest, nutzbar gemacht. Im Umkehrschluss muss zur Aufspaltung der Bindung der Moleküle Energie zugeführt werden, um den Wechsel des Aggregatzustandes zu ermöglichen. Die Änderung des Aggregatzustandes erfolgt bei konstanter Temperatur. Wenn daher ein fester Stoff durch Wärmezufuhr in den flüssigen Zustand überführt wird, wird in dieser Phase der Zustandsänderung latente Wärme gespeichert und kann danach dem Stoff wieder entzogen werden. Latentwärme (Schmelzwärme) kann in einem kleinen Temperaturbereich große Energiemengen speichern.

Bei den kommerziellen Latentwärmespeichern werden spezielle Salze oder Paraffine (Phase Change Materials – PCM) als Speichermedium genutzt. Die PCM-Stoffe ändern auf jeweils verschiedenen technisch nutzbaren Temperaturniveaus ihren Aggregatzustand und können spezifisch große Energiemengen aufnehmen (Aufladen) und beim Erstarren wieder abgeben (Entladen). In der Regel werden die Phasenübergänge von flüssig zu fest und flüssig zu kristallin genutzt.

Gegenüber den konventionellen Warmwasserpufferspeichern benötigen diese Latentwärmезellen bei gleicher Speicherkapazität nur ca. ein Drittel des Volumens. Die Latentwärmезellen werden zur Verlängerung von Brennerlaufzeiten im Teillastbereich oder zur Reduzierung von Bereitstellungsverlusten sowie zur energetischen Nutzung der Solarenergie verwendet. Zudem kommen paraffinummantelte Kupferröhren auch in Systemen wie Gas-, Öl- und Festbrennstoffeuerungen in Biogasanlagen, Blockheizkraftwerken und Wärmepumpen sowie bei der industriellen Abwärmenutzung vor.

Die Firma Powertank (Sonneberg/Thüringen) bietet Latentwärmезellen auf der Basis von Paraffin an. Die einzelnen Wärmезellen (Tubes) werden zu Wärmespeichern verschaltet und sind modular aufgebaut. Sie werden im Fachhandel derzeit in den unterschiedlichsten Ausführungsarten bis hin zur Frischwasserzelle zur Brauchwarmwassererwärmung im Durchlaufprinzip angeboten.

**Tab. 3-4:** Speicherarten und erreichbare Energiedichten (Quelle: IB-THEISS, München)

| Energie-speicher-system | Energie-dichte kWh/m <sup>3</sup> | Speichermedium               | Arbeits-temperatur °C | Produkthersteller<br>Anlagensystembeispiele   |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|---|
| sensibel                | ca. 60                            | Wasser                       | < 100                 | konventionelle Warmwasserspeicher   |
|                         |                                   | Thermoöl                     |                       |   |
|                         |                                   | PCM (Phase Change Materials) |                       |   |
| latent                  | bis 120                           | Salzhydrate                  | ca. 30 bis 80         | Latentwärmespeicher LWS 750, mobile Latentwärmespeicher, Alfred Schneider GmbH                                      |
|                         |                                   | Paraffine                    | ca. 10 bis 60         | Langzeitspeicherzellen, Powertank GmbH  |
|                         |                                   | Metallhydrid                 | ca. 280 bis 500       | Einsatz in der Brennstoffzellen-technologie   |
| thermo-chemisch         | bis zu 500                        | Silikagel                    | ca. 40 bis 100        | Ufe-Solar in Zusammenarbeit mit Fraunhofer ISE Freiburg   |
| chemisch                |                                   | NH <sub>3</sub>              |                       | Sorptionsspeicher   |
|                         |                                   | NaOH                         |                       | Forschungsprogramm  |
|                         |                                   | Zeolith                      | ca. 100 bis 300       | Forschungsprogramm Thermo-chemische Zeolithwärmespeicher zum Lastausgleich im Fernwärme-netz einer Münchener Schule |

Die Investitionskosten der Latentwärmespeicher liegen gegenüber den konventionellen Warmwasserspeichern derzeit bis zu vier Mal höher. Die Latentwärmespeicher in Modulbauweise mit einem nutzbaren Inhalt von 750 Litern bestehen aus einem wärmegeprägten Edelstahlbehälter mit einem Rohrleitungssystem und einem Wärmeübertrager. Der Behälter enthält als PCM technisch reines Natriumacetat (Sodiumacetat). Das Sodiumacetat ist in der Lebensmittelindustrie auch als Natriumsalz der Essigsäure, als Lebensmittelzusatzstoff E262 bekannt. Der Wechsel zwischen fest und flüssig erfolgt bei 59 °C. Das Latentwärmespeichermodul »LWS 750« hat nach Herstellerangaben eine Speicherkapazität von 122 kWh im Temperaturbereich von 40 bis 100 °C. Dies entspricht einer ca. drei bis fünf-fachen Energiemenge gegenüber einem konventionellen Wasserspeicher gleichen Inhalts. Andererseits muss für das Latentwärmespeichermodul mit einer ca. dreifach höheren Investitionssumme gerechnet werden. Der Systemhersteller liefert auch mobile Container-Latentwärmespeicher, die einzeln oder in Modulen zusammen geschaltet die industrielle Abwärme mit mehr als 60 °C zwischenspeichern.

### 3.2.5.2 Thermochemische Speicher

Die thermochemischen Speicher bilden eine weitere Gruppe der Wärmespeicher. Die bilden die Möglichkeit, höhere Temperaturniveaus und höhere Energiedichten zu erreichen als die konventionellen Speichersysteme. Noch höhere Energiedichten als bei Latentwärmespeichern

lassen sich mit thermochemischen Wärmespeichern erreichen. Diese speichern die Wärme durch endotherme Reaktionen und geben sie durch exotherme Reaktionen wieder ab. Die thermochemischen Wärmespeicher können gegenüber den konventionellen Warmwasserspeichern die vier- bis fünffache spezifische Wärmemenge aufnehmen. Die Sorptionsspeicher nutzen die Energie, die beim Phasenübergang von Materialien vom gasförmigen in den flüssigen Zustand frei wird, und werden üblicherweise in Verbindung mit Sorptionskältemaschinen verwendet.

Die Sorptionsspeicher nutzen hierbei in der Regel Wasser, um es an ein Wärmespeichermedium anzulagern bzw. mit diesem eine Verbindung einzugehen. Bei den Adsorptionsspeichern wird Wasser an eine Oberfläche angelagert. Hierbei entsteht nur eine geringe Bindung. Verwendete Materialien sind hier Feststoffe wie Zeolith (Siedestein) oder Silikagel. Zur Leistungssteigerung dieser Speicher werden in der Entwicklung neue organische Schäume eingesetzt.

### 3.2.5.3 Adsorptionswärmespeicher

Das Wirkprinzip beruht auf der Adsorption von Wasser an der Oberfläche eines Sorptionsmittels wie Silikagel oder Zeolith. Diese Technologie kommt derzeit z. B. für den Lastausgleich in Fernwärmenetzen zur Anwendung. Demgegenüber nutzen die Absorptionsspeicher als Sorben Lithiumbromid oder andere Salzlösungen. Das Prinzip beruht darauf, dass Wasser in das Kristall eines flüssigen Wärmespeichermediums eindringt, mit diesem eine Verbindung eingeht und es verändert.

Für Gebäude in Niedrigenergiebauweise entwickelten der Kollektorhersteller UFE SOLAR und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gemeinsam einen Sorptionsspeicher, der eine ganzjährige Beheizung mit solarer Wärme erlaubt. Der Sorptionsspeicher ist als geschlossenes System konzipiert. Das Speichersystem besteht aus den vorgefertigten Speichermodulen, die in den Solar- und Heizungskreis integriert werden. In jedem Modul stecken sämtliche Komponenten des Systems: das Sorptionsmaterial mit innenliegenden Wärmeübertragern, ein Vorratsbereich für das Kondensat und der Wärmeübertrager für die Verdampfung und Kondensation. Das modulare Konzept erlaubt eine hohe Systemvariabilität bei Verwendung standardisierter Komponenten.

In den Sommermonaten wird der Speicher über die Solarthermieanlage geladen und in den Wintermonaten die Wärmeversorgung über den Sorptionsspeicher realisiert. Zur Spitzenlastdeckung (Engpässe) wird eine Zusatzheizung hinzugeschaltet.

Um den Heizbedarf eines Niedrigenergie-Einfamilienhauses von ca. 4000 kWh/a solarthermisch zu decken, werden eine Kollektorfläche von ca. 30 bis 35 m<sup>2</sup> und ein Sorptionsspeicher mit einer Fläche von ca. 10 bis 12 m<sup>2</sup> erforderlich. Mit einem Speichervolumen von 6 bis 8 m<sup>3</sup> kann ein Deckungsanteil von ca. 90 % erreicht werden. Die Wärmeabgabe erfolgt über ein Niedertemperatursystem, damit die erreichbare Energiedichte des Speichers umso höher ist je geringer die Heiztemperatur liegt.



### 3.2.5.4 Innovation der thermochemischen Speicherung mit einem Absorptionsverfahren

An der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe (EMPA), eine Forschungsinstitution im ETH-Bereich in Dübendorf (CH), werden derzeit mit Unterstützung des Bundesamts für Energie (BFE) modular aufgebaute Testeinrichtungen für innovative Technologien der Wärmespeicherung mittels Absorptionsverfahren durchgeführt.

Die von Sonnenkollektoren stammende Wärme wird dazu genutzt, verdünnte Natronlauge (NaOH) zu erwärmen und durch die Verdampfung von Wasser eine Konzentration zu bewirken. Der entstehende Dampf wird abgeleitet und mit Kälte, z. B. aus einer Erdsonde kondensiert. Das Wasser und die konzentrierte Lauge werden separat gelagert. Die Energie ist jetzt in der konzentrierten Natronlauge nicht als eigentliche Wärme gespeichert, sondern als Potenzial, um zu einem beliebigen Zeitpunkt wieder Wärme zu erzeugen. Dieses erfolgt generell mit einer Prozessumkehr. Im thermodynamischen Sinne handelt es sich hierbei um eine Wärmepumpe mit chemisch gespeicherter Antriebsenergie. Die Technologie funktioniert in einem kontinuierlichen Betrieb, bei dem je nach Bedarf kleine Mengen Natronlauge und Wasser in den Wärmeübertrager gepumpt werden. Zudem wird die Kapazität des Systems je nach Gebäude- bzw. Nutzeranforderung modular aufgebaut.

Der thermochemische Speicher weist höhere spezifische Wärmekapazitäten auf als ein Wasserspeicher und speichert prinzipiell verlustfrei. Geringere Verluste treten hier lediglich bei der Umwandlung der Wärme auf. Ein Speicherprozess mit Natronlauge weist eine drei bis sechs Mal höhere Speicherdichte auf als Wasser. Die Natronlauge ist eine farb- und geruchslose Flüssigkeit, ist relativ kostengünstig sowie handelsüblich erhältlich und bietet eine optimale Absorption. Natronlauge weist zudem eine sehr spezielle, nicht lineare Erstarrungskurve auf, d. h. sie verfestigt sich bei bestimmten Konzentrationen und Temperaturen. Die Flüssigkeit kann leicht Wasser aufnehmen und erreicht eine hohe Speicherdichte. Die Natronlauge weist bei der chemischen Absorption einen optimalen Lade- und Entladetemperaturbereich auf. Aus diesem Grund können für die Ladung auch die preisgünstigeren Flachkollektoren eingesetzt werden.

Das Ziel der EMPA ist es aufgrund der hohen Effizienz der Absorptionsfähigkeit von Natronlauge über 2010 hinaus eine Pilotanlage zum monovalenten Einsatz in Niedrigenergiehäusern zu errichten.

## 3.2.6 Wärme- und Kälteschutz

Eine Energieeinsparung durch Minimierung der Energieverluste herbeizuführen wird auch in der Wärme-, Kaltwasser- und Kältetechnik wichtiger. In jedem Energieverteilungssystem wird z. B. durch ein Fluid vom Ort der Wärmeübergabe aus zu den Endverbrauchern transportiert. Da die Verteilungssysteme im thermodynamischen Sinne nicht adiabatisch sind, wird ein Teil der übertragenden Energie an die Umgebung abgegeben. Andererseits wird auch elektrische Energie erforderlich, um das Fluid innerhalb des Verteilungssystems zu verteilen. In der Regel handelt es sich hierbei um den elektrischen Strom für den Ventilator- und Umwälzpumpenmotorantrieb. Insofern ergibt sich ein zusätzlicher Wärme- und Elektro-

energiebedarf. Die durch das Verteilungssystem abgegebene Wärmeenergie und die für die Verteilung erforderliche Elektroenergie können als Wärme zurückgewonnen werden, sofern sich das Verteilungssystem innerhalb der beheizten Gebäudehülle befindet.

Die Richtlinie VDI 2055 Blatt 1:2008-09 legt Verfahren zur Berechnung von Wärme- und Diffusionsströmen in Dämmungen und zur Dimensionierung der Dämmschichtstärken nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien fest. Im Vergleich zu der Vorgängerversion aus dem Jahr 1994 wurden nachfolgend aufgeführte Richtlinienenerweiterungen eingebunden:

- Präzisierung der Berechnung der Betriebswärmeleitfähigkeit von Dämmungen, insbesondere unter Berücksichtigung von Feuchtigkeit und Konvektion
- Angabe von Anhaltswerten und Temperaturfunktionen für die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Lieferformen von Dämmstoffen
- Einführung von Berechnungsverfahren für den gekoppelten Feuchte- und Energietransport in Kälte-dämmungen.

### 3.2.6.1 Wärmeverteilungs-dämmung

In der EnEV 2007 werden Mindestdicken der Wärmedämmung von Rohrleitungen vorgeschrieben. In der seit 1. Januar 2009 geltenden EnEV 2009 wurden die bisherigen Regelungen für die Dämmpflicht von Rohrleitungen übernommen. Erweitert wurde der Geltungsbereich auf Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen sowie Armaturen von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen (Tabelle 1, Zeile 8). Außerdem soll die Regelung für Stichleitungen so geändert werden, dass die Anforderung generell wirtschaftlich vertretbar ist.

Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der EnEV 2009 schreiben in § 14, Anlage 5, Tabelle 1 vor, welche Dämmdicken bei welchen Rohrrinnendurchmessern einzuhalten sind. Danach ergeben sich folgende Anwendungsbereiche:

- Bereich mit der Anforderung »Mindestdämmdicken ohne Einschränkung«, sogenannte 100%-Dämmung (Tabelle Zeile 1 bis 4)
- Bereich mit der Anforderung »halbe Mindestdämmdicke«, sogenannte 50 %-Dämmung (Tabelle Zeile 5 und 6)
- Bereich Dämmung im Fußbodenaufbau (Tabelle Zeile 7)
- Bereich Rohrleitungs-dämmung ohne Anforderung.

### 3.2.6.2 Kältetechnische Verteilungs-dämmung

Zur Reduzierung des Energieverbrauchs kältetechnischer Anlagen spielt im Gesamtkonzept neben dem Einsatz effizienter Technologien auch die korrekte Dämmung der Anlagenteile eine wesentliche Rolle. Während die kältetechnische Dämmung bisher primär zur Verhinderung der Tauwasserbildung diente, muss das Ziel einer energetisch optimierten Ausführung die Minimierung der Energieverluste über die gesamte Nutzungsdauer der gesamten Anlage sein.

Bei der Kälte-dämmung besteht die Gefahr einer Durchfeuchtung des Dämmstoffes. Wird diese Gefahr nicht unterbunden, bilden sich Wasser und/oder Eis an den Stellen des Dämmsystems, deren Temperatur unter der Taupunkttemperatur liegt. Als Folge der Durchfeuchtung steigt die Wärmeleitfähigkeit und es erhöhen sich die Energieverluste.



Nur Kälte­dämmstoffe mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit und einem hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand sind langfristig vor unzulässiger Durchfeuchtung geschützt und garantieren über die gesamte Funktionsdauer auch den Anlagenschutz und reduzieren die Energieverluste. Generell sollten hier nur Dämmstoffe verwendet werden, deren Werte auch garantiert werden. Für kältetechnische Dämmungen eignen sich die Dämmstoffe, wie

- Klasse A: Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu \geq 10.000$  und Dämmschichtdicke von  $s = 13 \text{ mm}$ ; entspricht einer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht von  $s_d = 10.000 \cdot 0,013 = 130 \text{ m}$
- Klasse B: Die Klasse B erreicht mit einem Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu \geq 5000$  und der gleichen Dämmschichtdicke von  $s = 13 \text{ mm}$  lediglich eine wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht von  $s_d = 5000 \cdot 0,013 = 65 \text{ m}$ .

### 3.3 Brennwerttechnologie

Da die natürlichen Energierohstoffe zeitlich begrenzt sind, werden auch die bereits eingeführten neuen Technologien zur effektiven Nutzung der Energien ständig optimiert. Auf der Suche nach neuen Lösungen für einen ökologischen Umgang mit den nicht erneuerbaren Primärenergien wird daher u. a. auch ständig die Anwendung der Brennwerttechnologie verfeinert.

Aufgrund des weiter zunehmenden Umweltbewusstseins und der stetig steigenden Brennstoffkosten sowie andererseits umfangreichen Förderprogramme hält der Trend zur Investition einer Brennwerttechnik weiterhin an. Mit dieser Technologie lassen sich nicht nur Einsparpotenziale beim Energieverbrauch erzielen, sondern auch Schadstoffreduktionen realisieren.

Die Ermittlung der mit der Brennwerttechnologie erzielbaren Energieeinsparung erfolgt bereits durch einen Verweis in der EnEV 2002 auf die DIN V 4701-10. Diese enthält ein recht detailliertes Verfahren zur Ermittlung der Aufwandszahl für den Wärmeerzeuger. Die in der EnEV angeführte Verrechenbarkeit von anlageseitigen und bauseitigen Maßnahmen zur Minderung des Energiebedarfs führt bei der Installation eines Brennwertwärmeerzeugers zu sinkenden Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. Somit wird sich die Investitionssituation zugunsten der Brennwerttechnologie verschieben. Zum Vergleich verursacht eine Sanierung (Modernisierung) der Wärmeerzeugung die geringsten Kosten und bringt die größten Einspareffekte. Im Durchschnitt verursachen bei einer umfassenden Gebäudesanierung die Investitionen für eine moderne Wärmeerzeugung nur 11 % der Gesamtkosten und ergeben demgegenüber eine Energieeinsparung bis zu 40 %. Andererseits erreicht der Austausch mit neuen Fenstern bei 19 % Kostenanteil gerade mal einen Energieeinspareffekt von 10 %. Demgegenüber betragen die Investitionskosten für eine verbesserte Wärmedämmung in der Regel bis zu 70 % bei einer erzielbaren Einsparung von 30 %.

Durch die Anwendung der Brennwerttechnik wird die über den Schornstein abgeführte sensible Restwärme erheblich reduziert, wobei zusätzlich durch die Wasserdampfkondensation auch die latente Wärme weitestgehend genutzt wird. Bei dieser Technologie wird die im Heizgas enthaltene Wärme (Verdampfungswärme) durch die Kondensation des bei der

Verbrennung entstehenden Wasserdampfes frei und dem Wärmeerzeugerwasser als Zusatzenergie zugeführt.

Neben den ökonomischen Gesichtspunkten stellen auch verstärkt ökologische Gründe hohe Anforderungen an die Zukunft. Seit Jahren werden auch im Bereich der Gebäudetechnik größere Anstrengungen unternommen, um die Schadstoff-Emissionen beträchtlich zu reduzieren. Bei den hier anfallenden Emissionen handelt es sich überwiegend um Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Durch den Einsatz von energieeffizienten Wärmeerzeugern wie Brennwertwärmeerzeuger lässt sich der Primärenergiebedarf eines Gebäudes nennenswert reduzieren. Zur guten Ausnutzung des Brennwerteffektes ist eine niedrige Heizkreistemperatur sinnvoll. Diese sollte unbedingt in Abhängigkeit von der Heizlast gesteuert sein (z. B. witterungsgeführter Betrieb). Weiterhin sind Zweirohrheizkreise sinnvoll, da durch den getrennten Vor- und Rücklauf eine geringe Rücklauftemperatur gewährleistet wird. Die maximalen Heizkreistemperaturen sollten bei einem Gaskessel nicht über  $75/55^\circ\text{C}$  und bei einem Ölkessel nicht über  $55/45^\circ\text{C}$  liegen (maximale Vorlauf-/Rücklauftemperatur bei der größten Heizlast). Niedrigere Heizkreistemperaturen verbessern die Kondensatausnutzung weiter, bei einer richtig eingestellten Anlage aber meist nur noch geringfügig.

Mithilfe der Brennwerttechnik ist es gelungen, den Energieverbrauch um durchschnittlich ca. 15 % gegenüber modernen Niedertemperatur-Wärmeerzeugern zu reduzieren und dementsprechend auch die  $\text{NO}_x$ -Emission deutlich zu senken, d. h. es wird eine maximale Brennstoffausnutzung erreicht bei gleichzeitiger minimaler Schadstoffemission. Hinsichtlich der finanziellen Förderprogramme der einzelnen Länder und Gemeinden werden die anfangs etwas höheren Investitionskosten durch eine kurze Amortisationszeit abgedeckt. Die Rauchgase enthalten je nach Brennstoff mehr oder weniger Kohlendioxid sowie Wasser in Form von Dampf. Bei der Verbrennung von Erdgas entwickeln sich z. B. 1,5 Liter Wasser in Dampfform pro  $\text{m}^3$ -Erdgas. Dagegen beträgt beim Brennstoff Heizöl der Anteil nur 0,9 Liter- $\text{H}_2\text{O}$  pro Liter Heizöl.

### 3.3.1 Gas-Brennwerttechnologie

#### 3.3.1.1 Einflussgrößen der Brennwertnutzung

##### Brennwert und Heizwert

Der Brennwert ( $H_o$ ) setzt sich aus den Anteilen des fühlbaren und latenten Wärmeinhalts zusammen. Die Abgase der Wärmeerzeuger enthalten jedoch neben der fühlbaren Wärme auch noch die latente Wärmeenergie. Diese »versteckte«, nicht fühlbare Wärmemenge, die bei der Verbrennung entsteht, ist im Wasserdampf gebunden. Bei konventionellen Wärmeerzeugern entweicht die im Wasserdampf enthaltene Wärme gemeinsam mit den Abgasen ungenutzt durch den Schornstein. Der Brennwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, wenn es auch zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs.

Bei fossilen Brennstoffen wie Erdgas, Heizöl oder Kohle wird bezüglich der Wärmewerte zwischen dem Brennwert ( $H_o$ ) bzw. ( $H_s$ ) und dem Heizwert ( $H_u$ ) bzw. ( $H_i$ ) in  $\text{kWh/m}^3$  unterschieden. Der Brennwert bezieht sich auf die gesamte Energiemenge, die bei der Ver-

brennung frei wird. Er umfasst also auch die Energie, die im Wasserdampf gebunden ist, der im Verbrennungsprozess entsteht. Der Heizwert dagegen berücksichtigt diese Verdampfungswärme nicht; er ist aus diesem Grund stets niedriger als der Brennwert. Die Brennwertgeräte können durch Kondensation des Wasserdampfes die Verdampfungswärme sowie die fühlbare Abgaswärme weitgehend nutzen. Deshalb haben sie einen höheren Wirkungsgrad und arbeiten deutlich energiesparender als Wärmeerzeuger ohne Brennwertnutzung.

Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs. Der untere Heizwert ( $H_i$ ) kennzeichnet hierbei die Wärmemenge bei Verbrennung eines Brennstoffs ohne Ausnutzung der Verdampfungswärme. Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs.

Innerhalb der Brennwertgeräte wird der Wärmeübertrager konstruktiv großflächig ausgeführt und gegebenenfalls ein zweiter Wärmeübertrager nachgeschaltet. Hieraus folgt, dass den Abgasen zunächst die fühlbare Wärme entzogen wird und im Anschluss noch eine zweite Abkühlungsphase stattfindet. Bei diesem Prozess sinken die Abgastemperaturen bis unter die Taupunkttemperatur, wobei im Anschluss eine Kondensierung des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfes stattfindet. Die freiwerdende Wärmeenergie (Kondensationswärme, d. h. latente Wärme) wird als Gewinn an das Heizungswasser abgegeben. Der Einsatz der Brennwerttechnologie ermöglicht somit einerseits die Nutzung der latenten Wärmeenergie sowie zum anderen eine gegenüber konventionellen Wärmeerzeugern noch effektivere Nutzung der fühlbaren Wärme.

Da es aus technischen Gründen bei Niedertemperaturwärmeerzeugern nicht möglich ist, den Rauchgasen die gesamte fühlbare Wärme zu entziehen, liegt auch der Nutzungsgrad stets  $< 100\%$ . Zum Zweck eines direkten Vergleiches von Brennwertgeräten mit konventionellen Wärmeerzeugern wird daher die beim Brennwertbetrieb gewonnene Nutzwärme, d. h. die fühlbare Wärme einschließlich der Kondensationswärme, auf den unteren Heizwert ( $H_i$ ) bezogen und somit Nutzungsgrade von  $> 100\%$  erreicht.

Zur Betrachtung der energetischen Bilanz eines modernen Gas-Wärmeerzeugers eignet sich der Nutzungsgrad besser als der Wirkungsgrad. Während eine Beurteilung über den Wirkungsgrad nur eine Aussage über einen Betriebszustand ergibt, lässt der Nutzungsgrad (Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 eine Beurteilung über fast sämtliche Betriebszustände, z. B. während einer Heizperiode zu. Der Heizwert ist als Basiswert für die Nutzungsgrade definiert. Aus technischen und konstruktiven Gründen (Abgas-, Bereitschafts- und Strahlungsverluste) ist es nicht möglich, dass  $100\%$  des Heizwertes an das Heizungswasser übertragen werden. Aus diesem Grund wird der Nutzungsgrad der konventionellen Wärmeerzeuger stets  $< 100\%$  sein. Der Brennwert liegt z. B. bei Erdgas mit  $11\%$  über dem Heizwert. Für eine vergleichbare Aussage zu den konventionellen Wärmeerzeugern wird daher auch bei den Brennwertgeräten der Nutzungsgrad auf der Basis des Heizwertes bezogen. Bei den Brennwertgeräten werden je nach Primärenergieeinsatz und Betriebsweise aufgrund der Verwendung von latenter und fühlbarer Wärmeenthalpie größtmögliche Nutzungsgrade bis zu  $108\%$  erreicht. Das bedeutet, dass der Nutzungsgrad durchschnittlich  $16\%$  über dem der modernen Niedertemperaturwärmeerzeuger mit  $\eta_N$  von ca.  $92\%$  liegt.

**Tab. 3-5:** Energieinhalte der Brennstoffe (Quelle: IB-THEISS, München)

|   | Brennwert ( $H_s$ )<br>(kWh/m <sup>3</sup> ) | Heizwert ( $H_i$ )<br>(kWh/m <sup>3</sup> ) | $H_s/H_i$ | $H_s - H_i$ | Kondensatmenge<br>(theoretisch)<br>(kg/m <sup>3</sup> )** |
|---|--|---|-----------|-------------|---|
| Stadtgas  | 5,58   | 4,87  | 1,13      | 0,61        | 0,89  |
| Erdgas LL   | 9,78   | 8,83  | 1,11      | 0,95        | 1,53  |
| Erdgas E  | 11,46  | 10,35                                       | 1,11      | 1,11        | 1,63  |
| Propan  | 28,02  | 25,80                                       | 1,09      | 2,22        | 3,37  |
| Heizöl (EL)*  | 10,68  | 10,08                                       | 1,06      | 0,60        | 0,88  |
| Hinweise: * Heizöl EL; die Angaben sind auf Liter bezogen<br>** auf die Brennstoffmenge bezogen |  |   |           |             |   |

Aufgrund des großen Wasserstoffanteils im Erdgas (Methan CH<sub>4</sub>) ist die Wasserdampfmenge in den Rauchgasen relativ hoch und daher der Brennwert um rund 11 % höher als der Heizwert.

Der Unterschied zwischen dem Brennwert und dem Heizwert bei Verwendung von Erdgas als Primärenergie ist besonders hoch (Erdgas 11 % zu Heizöl 6 %).

Bei Flüssiggas ist der Brennwert noch um 8 bis 9 % höher als der Heizwert. Bei Heizöl dagegen nur noch um 6 %. Der geringere Schwefelgehalt im Erdgas bietet zudem weitere Vorteile:

- die Kondensatwasserentsorgung wird wesentlich problemloser
- geringere Korrosionsgefahr für die Abgasleitungen.

**Tab. 3-6:** Brennstoffbeiwerte nach der 1. BImSchV (Quelle: IB-THEISS, München)

|                | Erdgas | Stadtgas | Kokereigas | Flüssiggas sowie Flüssiggas-<br>Luft-Gemische | Heizöl EL |
|----------------|--------|----------|------------|---|-----------|
| A <sub>1</sub> | 0,37   | 0,35     | 0,29       | 0,42  | 0,5       |
| A <sub>2</sub> | 0,66   | 0,63     | 0,60       | 0,63  | 0,68      |
| B              | 0,009  | 0,011    | 0,011      | 0,008   | 0,007     |

### Abgasverluste und Taupunkt

Die Abgasverluste ( $q_A$ ) von Wärmeerzeugern werden in der Regel als Funktion von der Abgastemperatur und dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Abgase dargestellt. Der Nutzungsgrad eines Gasbrennwertgerätes steigt mit fallender Abgastemperatur an. Der leichte Anstieg des Nutzungsgrades vor Beginn der Kondensation bei 56 °C ist darauf zurückzuführen, dass den Rauchgasen mehr fühlbare Wärme entzogen wird. Der eigentliche Nutzen der Verdampfungswärme kommt bei Erdgas erst bei Unterschreitung der Kondensationstemperatur unterhalb von 56 °C zum tragen.

Bei der Verbrennung von Erdgas entsteht neben Abgas auch Wasserdampf. Die im Wasserdampf enthaltene Wärme kann zusätzlich genutzt werden, wenn dieser durch Abkühlung verflüssigt wird. Der Brennwert gibt an, wie viel Wärmeenergie bei der Verbrennung ein-

schließlich der im Wasserdampf enthaltenen Verdampfungswärme insgesamt frei wird. Der Energiegehalt des Wasserdampfs bleibt beim Heizwert dagegen unberücksichtigt.

Beispiel: Der Brennwert ist um den Beitrag der Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wassers größer als der Heizwert. Durch das Abkühlen der Abgase kann die Verdampfungswärme nutzbar gemacht werden (Abgaswärmeübertrager).

### Luftüberschuss und Luftverhältniszahl

Der Luftüberschuss, ausgedrückt durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Abgase, ist für die Energieausnutzung eines Brennwert-Wärmeerzeugers noch wichtiger als die niedrigen Heizwassertemperaturen. Durch einen zu hohen Luftüberschuss werden die Abgase verdünnt, wodurch die relative Luftfeuchte in den Abgasen sinkt und die Kondensation erst bei niedrigeren Abgastemperaturen eintritt. Bei unzureichend hohem Luftüberschuss bildet sich selbst bei sehr kalten Rücklauftemperaturen kein Kondensat mehr. Ein zu hoher Luftüberschuss kann zu einer Wirkungsgradreduzierung von 5 bis 10% führen.

Die Brennwertgeräte erreichen ihre Optimierung mit niedrigen Luftzahlen, d. h. es werden primär Gebläsevormischbrenner eingesetzt, die in der Regel mit einer Luftzahl von 1,2 und 10%  $\text{CO}_2$  betrieben werden. Hieraus ergibt sich eine Taupunkttemperatur von  $54^\circ\text{C}$ . Aufgrund einer optimalen Abstimmung des Brenners mit der Wärmeübertragerheizfläche kann die Abgastemperatur nur um ca.  $3^\circ\text{C}$  über der Rücklauftemperatur liegen. D. h. durch das Zusammenwirken eines großen Wärmeübertragers mit einer vollständig gekühlten Verbrennungskammer und einer hohen Taupunkttemperatur können über 80% des vorhandenen Wasserdampfes kondensiert werden. Hieraus erklärt sich auch der hohe Nutzungsgrad.

Die Luftverhältniszahl stellt den Wert des Luftüberschusses bei der Verbrennung dar. Je kleiner die Luftzahl ist, umso größer ist die Effektivität der Brennwertnutzung. Bei einem geringeren Wert steigt die Taupunkttemperatur. Die Folge ist, dass die Kondensation der Abgase schon bei höheren Rücklauftemperaturen einsetzt. Bei Gasbrennern besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Luftzahl und dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt.

Zur Ermittlung des Brennwertes ist die spezifische Kondensationswärme bezogen auf  $t_0 = 25^\circ\text{C}$  (Bezugstemperatur) einzusetzen, also nicht der Mittelwert zwischen der Taupunkttemperatur und der Grenzwerttemperatur der Gasphase. In der Praxis entspricht die Kondensatorwärme bezogen auf die Masse, d. h. auf das Normvolumen bei einer Vollkondensation des Wasserdampfes der Differenz zwischen dem oberen Brennwert ( $H_o$ ) und dem unteren Heizwert ( $H_u$ ). Kleinere Abweichungen entstehen durch den Einfluss der Luftzahl ( $\lambda$ ). Bezogen auf den unteren Heizwert ( $H_u$ ) kann ein Gewinn bei

- Heizöl mit  $\Rightarrow$  6 bis 7 %
- Erdgas mit  $\Rightarrow$  10 bis 11 %

erreicht werden. Aus o. a. Erläuterung ist ersichtlich, dass bedingt durch den höheren Wasserstoffanteil das relative Nutzungspotenzial bei der Primärenergie mit Erdgas fast doppelt so hoch ist wie bei Heizöl. Dieses ist ebenfalls aus dem Verlauf der Taupunkttemperaturlinie in Abhängigkeit vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt in Vol.-% ersichtlich. Bei festen Brennstoffen liegt der Taupunkt bei  $t_s < 40^\circ\text{C}$ .

Die bei einer Vollkondensation des Wasserdampfes gewinnbare, d. h. auf die Masse bzw. auf das Normvolumen bezogene Kondensationswärme entspricht pauschal der Differenz zwi-

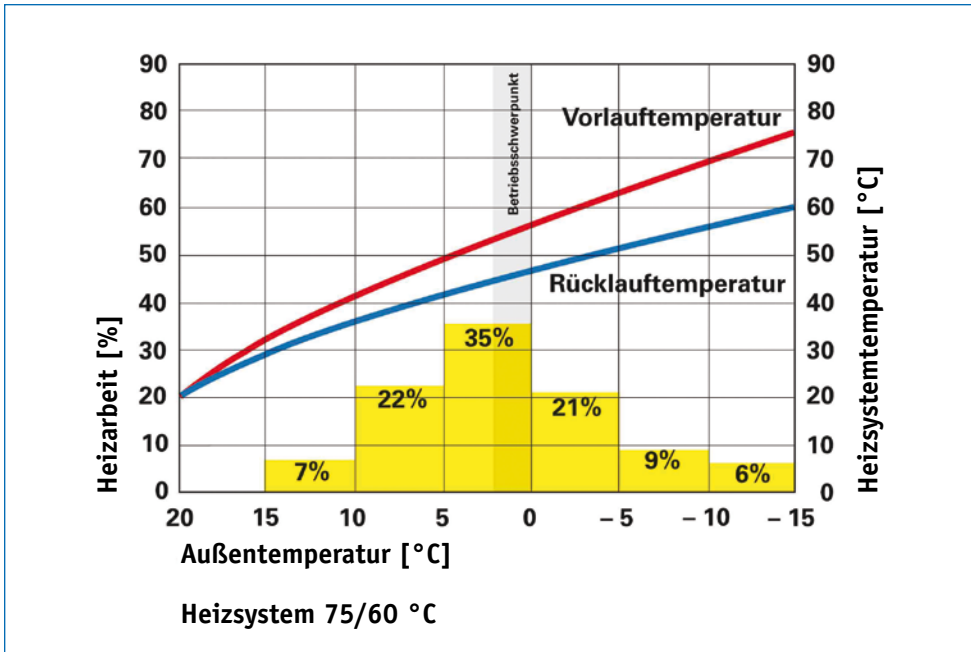
schen dem Brennwert ( $H_o$ ) und dem Heizwert ( $H_u$ ) und wird als Kondensationsgrad definiert. Bei einer genaueren Bestimmung muss noch der Einfluss der Luftverhältniszahl ( $\lambda$ ) berücksichtigt werden.

$$Q_{\text{Kond.}} = \frac{H_o}{H_u} \cdot \lambda = \frac{H_o}{H_u} \cdot 1,15$$

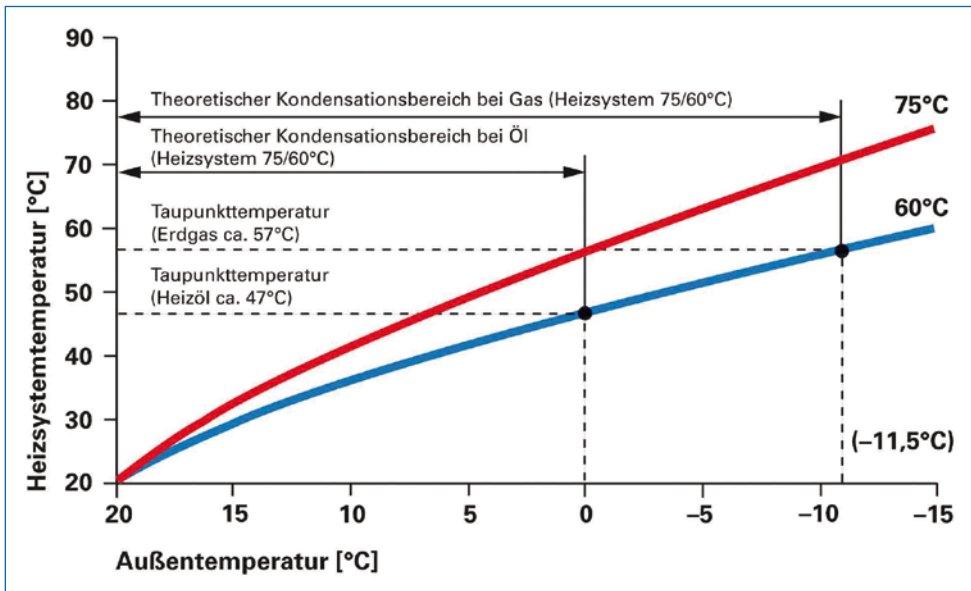
### Taupunktunterschreitung und Wasserdampftaupunkt

Da die Taupunkttemperatur bei Erdgas höher liegt als bei Heizöl, setzt die Brennwertnutzung beim Einsatz der Primärenergie Heizöl erst bei tieferen Rücklauftemperaturen ein. Hieraus folgt, dass die anteilige Jahresheizarbeit mit Kondensationsnutzung bei Heizöl deutlich geringer ist und primär der Einsatz von Erdgas bei der Brennwerttechnologie sinnvoll ist. Mit der Brennwerttechnik wird die in dem Abgas enthaltene Kondensationswärme des Wasserdampfes genutzt. Der Wasserdampf setzt sich aus dem Anteil der aus der Verbrennung der Brennstoffteile, d. h. des Wasserstoffes ( $H_2$ ) und der Kohlenwasserstoffe  $C_mH_n$ , sowie aus der Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers zusammen. Zur Auskondensierung muss das Abgas unter den Taupunkt  $t_s$  (Sättigungstemperatur) abgekühlt werden. Der Wasserdampftaupunkt hängt hierbei vom Teildruck des Wassers (Partialdruck  $p_n$ ) sowie von dem Raumanteil ( $rH_2O$ ), d. h. vom Verhältnis des Wasserdampfvolumens zum Rauchgasvolumen ab. Mit zunehmender Luftverhältniszahl ( $\lambda$ ) sinkt der Teildruck und der Raumanteil des Wasserdampfes, weil mit steigendem Luftüberschuss das Volumen größer wird. Der Zusammenhang zwischen der Sättigungstemperatur  $t_s$  und dem Teildruck des Wasserdampfes  $p_n$  ist aus der Wasserdampftabelle zu entnehmen.

Der Wasserdampftaupunkt kann rechnerisch erfasst werden. Dagegen lässt sich der Säuretaupunkt ( $SO_3$  und  $H_2SO_4$ ) nur schwer ermitteln. Der Taupunkt in Gasgemischen, d. h. auch in den Abgasen, wird durch die Temperatur bestimmt, bei der kondensierende Anteile, vor allem der Wasserdampf, aber auch Säuren vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergehen. Der Wasserdampftaupunkt liegt bei schwefelfreien Abgasen zwischen 45 und 60 °C, je nach Brennstoff und Überschuss an Verbrennungsluft. An rauchgasberührten Wärmeerzeugerheizflächen, deren Oberflächentemperatur gleich oder kleiner als die Taupunkttemperatur ist, schlagen sich saure Kondensate nieder, die den Wärmeerzeugerwerkstoff angreifen und damit die Lebenserwartung des Wärmeerzeugers drastisch verkürzen. Da die rauchgasseitige Oberflächentemperatur im Wärmeerzeuger nur geringfügig höher ist als die Heizwassertemperatur, schützen nur entsprechend hohe Heizwassertemperaturen den Wärmeerzeuger vor Korrosion. Eine Ausnahme bilden Wärmeerzeuger mit korrosionsgeschützten Heizflächen. Die Taupunktkorrosion wird daher auch als »Niedertemperaturkorrosion« bezeichnet.



**Abb. 3-7:** Anteile der Heizarbeit in Abhängigkeit von der Außentemperatur  
(Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)



**Abb. 3-8:** Brennwerteffizienz: Vorlauf-/Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur  
(Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

## Rücklauftemperatur und Nutzungsgrad

Einen entscheidenden Einfluss für die Ausnutzung der Kondensationswärme stellt die Wärmeerzeuger-Rücklauftemperatur dar. Die Rücklauftemperatur ist entscheidend für die Rauchgasabkühlung sowie die damit verbundene Menge der Wasserdampf-Kondensierung. Je niedriger die Rücklauftemperatur, umso mehr Wärme kann aus den Abgasen auf das Heizwasser übertragen werden. In Folge heißt dies, dass eine Erhöhung des Brennwertnutzungsgrades in Abhängigkeit einer größeren Wasserdampfkondensierung erfolgt.

Bei guten Wärmeübertragern liegt die Abgastemperatur ca. 10 bis 15 °C über der Rücklauftemperatur. Innerhalb der Heizphase verändert sich die Rücklauftemperatur, weil die Wärmeerzeugertemperatur der Brennwertgeräte, analog der Niedertemperaturwärmeerzeuger, mit gleitender, Außentemperaturabhängig geregelt werden. Im überwiegenden Teil der Heizphase sollte jedoch eine niedrige Rücklauftemperatur gefahren werden, damit möglichst viel Wasserdampf aus den Rauchgasen kondensiert und somit auch viel Verdampfungswärme zur Nutzung freigesetzt wird.

Bei kleinvolumigen Brennwertwandthermen werden zur Sicherung des Mindestvolumenstromes in der Praxis in den Wasserkreislauf Überstromventile integriert. Die damit verbundene Rücklauftemperaturanhebung wirkt sich jedoch auf die Brennwertnutzung nicht gravierend aus. Hiermit sind in der Summe kaum Unterschiede in der energetischen Effizienz zwischen kleinvolumigen und großvolumigen Wärmeerzeugern zu verzeichnen. Der Vorteil des bei einem hohen Wasserinhalt nicht erforderlichen Mindestvolumenstromes wird durch den Nachteil der höheren thermischen Trägheit ausgeglichen. Ideale Voraussetzungen bietet sich eine Systemauslegung für Flächenheizung mit 40/30 °C an. Hier kann ein ganzjähriger Kondensationsbetrieb mit höchstmöglichem Nutzungsgrad erreicht werden.

## Kondenswasser und Neutralisation

Die modernen Niedertemperaturwärmeerzeuger werden mit gleitenden abgesenkter Wärmeerzeuger-Wassertemperatur betrieben, die jeweils dem Wärmebedarf des Gebäudes angepasst wird. Die hohen Nutzungsgrade moderner Niedertemperatur-Wärmeerzeuger von über 90 % werden dadurch erreicht, dass die Oberflächenverluste nur 2 bis 3 % betragen. Entscheidend für die geringen Verluste ist das gleitend abgesenkte Temperaturniveau des Wärmeerzeugers, zusätzlich wirkt sich die hochwirksame Verbundwärmedämmung moderner Wärmeerzeuger positiv aus.

Eine Kondensation des im Heizgas enthaltenen Wasserdampfes ist bei Niedertemperatur-Wärmeerzeuger unerwünscht, weil der Wärmeerzeuger und Schornstein feucht würden. Aus diesem Grund ist bei Niedertemperaturwärmeerzeugern eine Mindestabgastemperatur einzuhalten, die oberhalb des Taupunktes liegt (Beginn der Wasserdampfkondensation bei der Verbrennung von Heizöl bei 47 °C). Um die Wasserdampfkondensation an den heizgasgeführten Wärmeerzeugerwandungen zuverlässig zu verhindern, wird an ausgesuchten Stellen der Heizflächen der Wärmeübergang gezielt gebremst und so die Temperatur zuverlässig oberhalb des Taupunktes gehalten. Wie bei der bekannten Wärmeschutzverglasung geschieht dies auch bei den Heizflächen durch eine wärmeisolierende Zwischenschicht.



**Tab. 3-7:** Randbedingungen für Brennwertwärmeerzeuger mit integriertem und nachgeschaltetem Kondensatwärmeübertrager (Quelle: IB-THEISS, München)

|  | Wärmeübertrager im<br>Wärmeerzeuger    | nachgeschalteter<br>Wärmeübertrager | Neutralisation       |
|--|--|-------------------------------------|----------------------|
| Standard-Heizöl<br>( $\leq 2000$ ppm)    | problematisch,<br>da hohe Ablagerungen | zulässig,<br>mäßige Ablagerungen    | vorgeschrieben       |
| schwefelarmes Heizöl<br>( $\leq 50$ ppm) | zulässig,<br>geringe Ablagerungen      | zulässig,<br>keine Ablagerungen     | nicht vorgeschrieben |

Bei der Brennwerttechnologie wird das Heizgas soweit abgekühlt, bis der durch die Verbrennung entstandene Wasserdampf kondensiert. Die freiwerdende Verdampfungswärme wird (je nach Verfahren) entweder dem Heizwasser oder der Verbrennungsluft zugeführt und so nutzbar gemacht. Der Einsatz der Brennwerttechnologie ermöglicht damit eine bessere Ausnutzung der eingebrachten Energie.

**Tab. 3-8:** Neutralisationspflicht in Abhängigkeit von der Wärmeerzeugerleistung nach ATV-DVWK (Quelle: IB-THEISS, München)

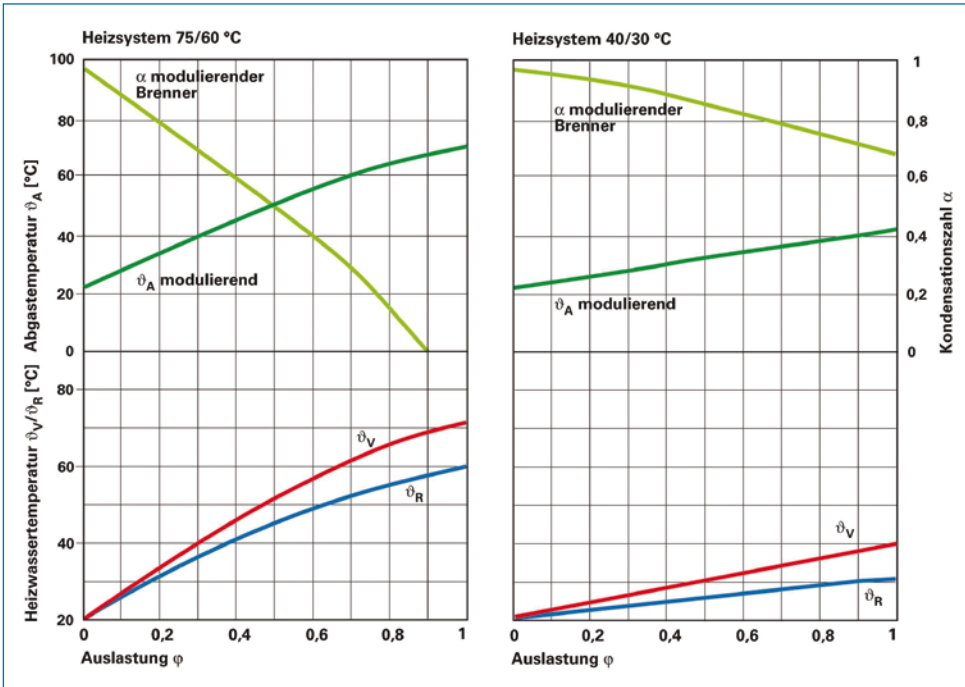
| Nennwärmeleistung  | Neutralisation für Feuerungsanlagen wird erforderlich bei |                            |  |
|--|---|----------------------------|--|
|  | Gas   | Heizöl nach<br>DIN 51603-1 | Heizöl nach<br>DIN 51603-1 schwefelarm |
| bis 25 kW  | nein <sup>1);2)</sup>                                     | ja                         | nein <sup>1);2)</sup>                  |
| 25 bis 200 kW  | nein <sup>1);2);3)</sup>                                  | ja                         | nein <sup>1);2);3)</sup>               |
| > 200 kW   | ja  | ja                         | ja                                     |
| Einschränkungen: Eine Neutralisation wird erforderlich<br><sup>1)</sup> bei der Ableitung des häuslichen Abwassers in Kleinkläranlagen<br><sup>2)</sup> bei Gebäuden, deren Entwässerungsleitungen nicht gegen saure Kondensate beständig sind<br>(z. B. verzinkte oder kupferhaltige Materialien)<br><sup>3)</sup> wenn das geforderte Vermischungsverhältnis nicht erreicht wird |   |                            |  |

In der Praxis zeigt sich, dass gasbeheizte Wärmeerzeuger, wenn sie nicht die Kondensationswärme ausnutzen, höhere Verluste als ölbeheizte Wärmeerzeuger aufweisen. Dies gilt unter Berücksichtigung des physikalisch exakten Brennwertes (oberer Heizwert) als Bezugsgröße. Ein weiteres Kriterium besteht darin, dass das Kondensat aus Öl-Brennwertwärmeerzeugern einen kleineren pH-Wert aufweist als das Kondenswasser aus Gas-Brennwertwärmeerzeugern, was auf den Schwefelanteil im Heizöl EL zurückzuführen ist. Infolgedessen stellen sich höhere Ansprüche an die Korrosionsbeständigkeit sowie die Notwendigkeit einer Neutralisation des Kondenswassers ein. Mit der Markteinführung von schwefelarmem Heizöl (maximaler Schwefelgehalt 50 mg/kg) wurde dieses Argument entkräftet. Aus diesem Grund ist nach dem ATV-Arbeitsblatt A 251 eine Neutralisation des Kondensates in den meisten Fällen erst ab einer Nennwärmeleistung von mehr als 200 kW erforderlich. Voraussetzung ist natürlich, dass auch schwefelarmes Heizöl verbrannt wird.

**Tab. 3-9:** Bedingungen zur Kondensateinleitung nach ATV-DVWK-A 251 (Quelle: IB-THEISS, München)

|                     | Feuerungsleistung (kW)                               | 25  | 50  | 100  | 150  | < 200 |
|---------------------|--|-----|-----|------|------|-------|
| Wohnhäuser          | jährliche max. Kondensatmenge bei<br>- Erdgas (m³/a) | 7   | 14  | 28   | 42   | 56    |
|                     | - schwefelarmem Heizöl EL (m³/a)                     | 4   | 8   | 16   | 24   | 32    |
|                     | Mindestanzahl der Wohnungen                          | 1   | 2   | 4    | 6    | 8     |
| gewerbliche Gebäude | jährliche max. Kondensatmenge bei<br>- Erdgas (m³/a) | 6   | 12  | 24   | 36   | 48    |
|                     | - schwefelarmem Heizöl EL (m³/a)                     | 3,4 | 6,8 | 13,6 | 22,4 | 27,2  |
|                     | Mindestanzahl der im Büro beschäftigten Personen     | 10  | 20  | 40   | 60   | 80    |

Das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid ist der Hauptsäurebildner, da das im Kondenswasser zu Kohlensäure reagiert. Die Entstehung von Stickoxiden, die im Kondenswasser Salpetersäure bilden können, lässt sich durch optimierte Verbrennungsbedingungen mit niedrigen Temperaturen minimieren. Das Vorhandensein von Schwefelsäure wird durch den im Brennstoff enthaltenen Schwefel bestimmt. Aufgrund der aggressiven Eigenschaft von Säuren, lassen sich im Kondenswasser je nach Säurestärke und entsprechend verarbeiteten Materialien gegebenenfalls auch Metallkonzentrationen feststellen.



**Abb. 3-9:** Auslastung und Kondensationszahl (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

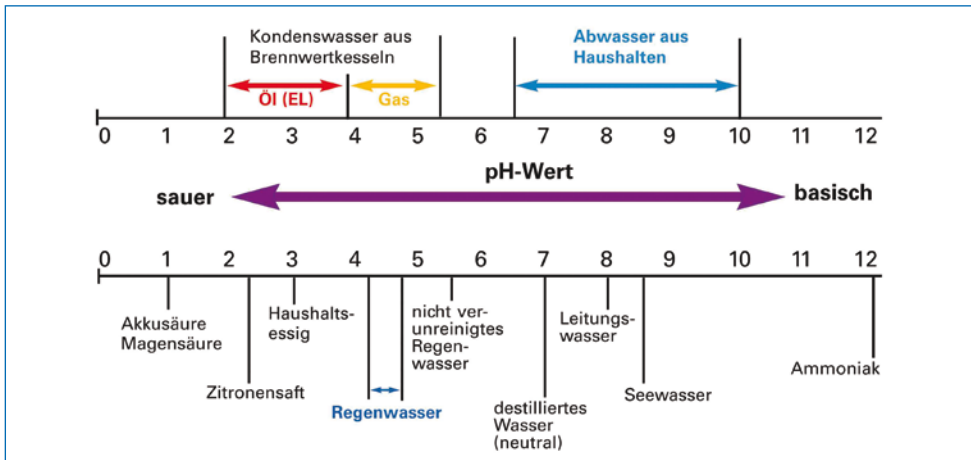


Abb. 3-10: pH-Wert verschiedener Stoffe (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

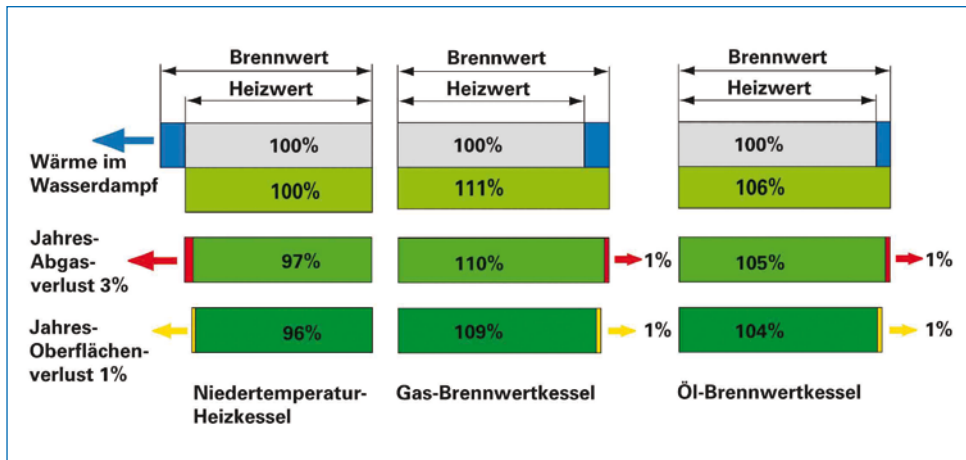
Die Beschaffenheit von Kondenswasser aus Brennwertwärmeerzeugern wird in erster Linie von der Zusammensetzung des Brennstoffs sowie der Art der Verbrennung beeinflusst. Beim Kondensationsvorgang lösen sich Abgasbestandteile, die das Kondenswasser für gewöhnlich sauer reagieren lassen. Maßstab hierfür ist der pH-Wert.

Die Wärmeerzeugerkonstruktion sowie die Auslegung der Heizungsanlage, insbesondere die Rücklauftemperatur haben einen erheblichen Einfluss auf die anfallende Kondensatmenge. In der Praxis ergibt sich daher im Jahresmittel eine Kondensatmenge von ca. 0,5 bis 0,8 Litern Kondensat pro Liter Heizöl. Die Menge des beim Brennwertbetrieb anfallenden Kondenswassers hängt aufgrund des unterschiedlichen Feuchte- und Wasserstoffgehaltes wesentlich von dem zum Einsatz kommenden Brennstoff und dem Brennstoffdurchsatz ab. Außerdem spielt hierbei die Menge und Feuchtigkeit der beim Verbrennungsprozess beteiligten Luft sowie die erzielbare Abgastemperatur eine Rolle. Für die maximal erreichbare Kondenswassermenge kann für Gasfeuerungen von 0,14 l/kWh und für Ölfeuerungen von 0,08 l/kWh ausgegangen werden. Beim Einsatz von Heizöl kann aufgrund der Kondensation theoretisch maximal 1 Liter Kondensat pro Liter Heizöl anfallen. Bei 1000 Litern im Jahr handelt es sich also um rund einen Kubikmeter bzw. um eine Tonne aggressiven Kondensates.

### 3.3.1.2 Optimale Brennwertnutzung

Gegenüber einem Niedertemperaturwärmeerzeuger resultiert der Wärmegewinn bei einem Brennwertwärmeerzeuger zum wesentlichen Anteil aus den geringeren Abgasverlusten. Je größer die tatsächliche Kondensatmenge ist, umso effektiver ist die Brennwertanlage. Je niedriger die Abgastemperatur ist, umso größer wird die Kondensatwassermenge, d. h. umso größer wird die Kondensatzahl ( $\alpha$ ). Die Einflusskriterien zur Verbesserung der Brennwertnutzung sind:

- hohe Verbrennungsgüte, d. h. ein hoher  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Abgas bewirkt einen hohen Wasserdampftaupunkt



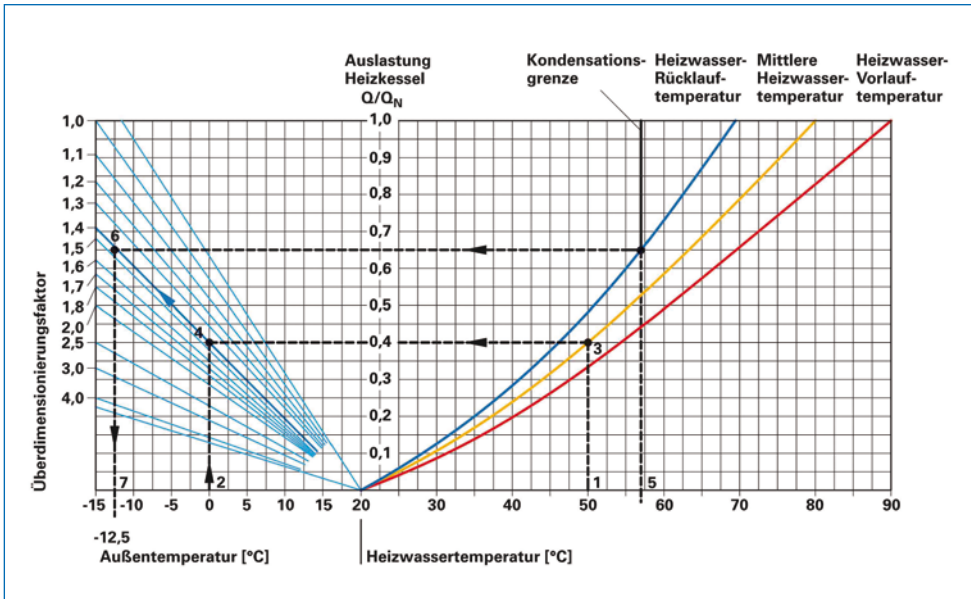
**Abb. 3-11:** Vergleich der Verluste bei Niedertemperatur- und Brennwerttechnik (Erdgas, Heizöl EL)  
(Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

- niedrige Temperaturen des Wärmeverteilungssystems
- hydraulische Anbindung der Heizkreiswärmeerzeuger. Hierbei ist der Einbau sämtlicher Einrichtungen (Überströmventil, Vierwegeventile, etc.), die eine Anhebung der Rücklauftemperatur bewirken, zu vermeiden.

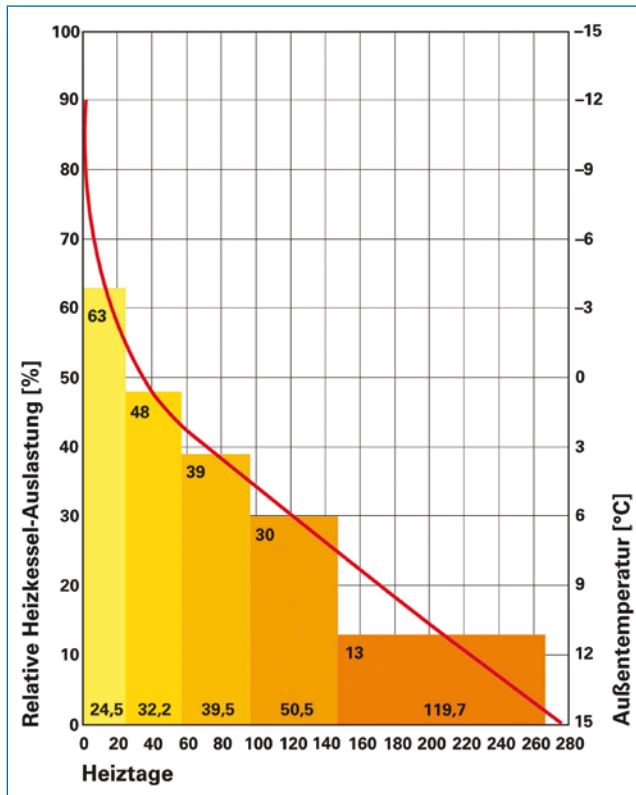
In den Abgasen einer Gas- oder Ölfeuerung ist aufgrund des im Brennstoff gebundenen Wasserstoffs immer Wasserdampf enthalten. Dieser Wasserdampf fängt bei einer bestimmten Temperatur an zu kondensieren (ähnlich der Luftfeuchtigkeit, die sich an einer kalten Fensterscheibe niederschlägt). Die Kondensationstemperatur beträgt bei Gas ca. 55 °C und bei Öl ca. 45 °C. Bei der Kondensation wird Kondensationswärme frei, die zur Gebäudeheizung genutzt werden kann.

Bei den konventionellen Wärmeerzeugern darf der Wasserdampf im normalen Betrieb nicht kondensieren. Deshalb verlassen die Abgase einen Niedertemperaturwärmeerzeuger mit 150 bis 200 °C. Bei Brennwertwärmeerzeugern dagegen ist der Wärmeübertrager so konstruiert, dass er für einen Kondensationsbetrieb geeignet ist. Damit können die Gewinne durch Kondensation und durch die weitere Abkühlung der Abgase (auf ca. 5 bis 20 °C über der Rücklauftemperatur) genutzt werden. Zur optimalen Ausnutzung des Brennwerteffektes ist eine niedrige Heizkreistemperatur sinnvoll. Diese sollte unbedingt in Abhängigkeit von der Heizlast gesteuert sein (z. B. witterungsgeführter Betrieb).

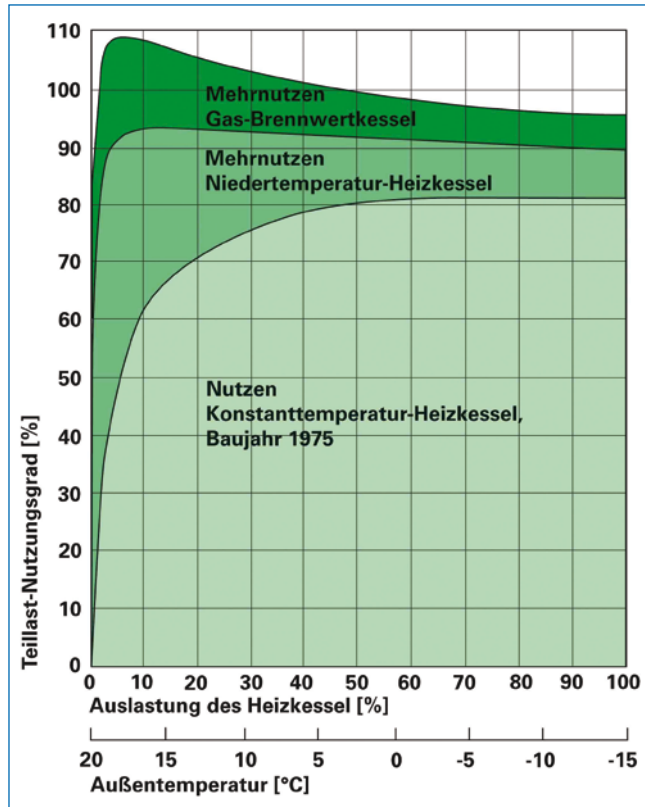
Die Brennwertwärmeerzeuger erreichen in Kombination mit einem modulierenden Brennerbetrieb und einer gleitend, witterungsgeführten Wärmeerzeugerregelung eine deutlich höhere Energieausnutzung, als dieses mit Niedertemperaturwärmeerzeuger in der konventionellen Bauweise möglich ist. Kondensierend arbeitende Wärmeerzeuger erreichen bei Außentemperaturen zwischen 10 °C und -5 °C, d. h. bei einer Anlagenauslastung zwischen 30 und 80 % die wirtschaftlichste Ausnutzung. Die Gasbrennwertwärmeerzeuger im Leistungsbereich von 16 bis 250 kW werden überwiegend modulierend betrieben, d. h. sie passen ihre Leistung in einem Bereich von 35 bis 100 % dem aktuell benötigten Wärmebedarf des Gebäudes an. Zudem ermöglichen die neuen Konstruktionsvarianten der Wärmeerzeuger



**Abb. 3-12:** Ermittlung der Heizflächenüberdimensionierung (System 90/70 °C)  
(Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)



**Abb. 3-13:** Bestimmung des Norm-Nutzungsgrades nach DIN 4702, Teil 8 (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)



**Abb. 3-14:** Teillastnutzungsgrade unterschiedlicher Wärmeerzeuger (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

ger über den gesamten Modulationsbereich einen sparsamen, geräusch- und emissionsarmen Betrieb. Zu diesem Zweck werden voll vormischende Gebläsebrenner eingesetzt, wobei durch den Einsatz einer speziellen Gas/Luft-Verbundregelung in den Abgasen ein konstanter  $\text{CO}_2$ -Gehalt gehalten wird. Als Folge wird über das komplette Leistungsspektrum eine optimale Brennwertnutzung gewährleistet.

Bei den Brennwertgeräten wird der Wärmeübertrager konstruktiv großflächig ausgeführt und optional ein zweiter Wärmeübertrager nachgeschaltet. Der Vorteil ergibt sich dadurch, dass den Abgasen zunächst die fühlbare Wärme entzogen wird und im Anschluss daran noch eine zweite Abkühlungsphase stattfindet. Bei diesem Prozess sinken die Abgastemperaturen bis unter der Taupunkttemperatur, wobei infolgedessen eine Kondensierung des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfes stattfindet. Die freiwerdende Wärmeenergie (latente Wärme) wird zur energetischen Nutzung an das Heizungswasser übergeben. Der Einsatz der Brennwerttechnologie ermöglicht somit einerseits die Nutzung der latenten Wärmeenergie andererseits eine gegenüber konventionellen Wärmeerzeugern noch effektvollere Nutzung der fühlbaren Wärme.

Die erreichbaren Jahresnutzungsgrade liegen bei den Gasbrennwertwärmeerzeugern je nach Heizsystemtemperaturen zwischen 95 und 105 %. Aufgrund der gleitenden Wärmeerzeugertemperatur steigen die Nutzungsgrade bei geringerer Auslastung tendenziell an. Bei den Brennwertwärmeerzeugern wird sogar ein stark ausgeprägtes Maximum erreicht.

In der Übergangszeit arbeitet der Wärmeerzeuger hauptsächlich im Kondensationsbetrieb. Außer der Heizmitteltemperatur ist für die Brennwertnutzung auch eine optimale Abstimmung des Brenners und Luftgebläses entscheidend. Ein hoher Luftüberschuss führt zwar tendenziell zu niedrigen  $\text{NO}_x$ - und  $\text{CO}_2$ -Werten, verdünnt aber die Abgase und führt damit zu einer geringeren relativen Feuchte mit der Folge, dass die Taupunkttemperatur ansteigt und die Kondensatmenge absinkt.

### 3.3.2 Öl-Brennwerttechnologie

Um einen Öl-Brennwertwärmeerzeuger ohne Neutralisationseinrichtung betreiben zu können, darf ausschließlich schwefelarmes Heizöl EL verwendet werden. Außerdem darf die Wärmeerzeuger-Nennwärmeleistung 200 kW nicht übersteigen. Für Wärmeerzeuger ab 25 kW besteht eine weitere Voraussetzung dahingehend, dass das Volumen der häuslichen Abwasser, die an gleicher Stelle eingeleitet werden, im Jahresmittel mindestens das 20-fache der Kondenswassermenge betragen muss. Festgelegt sind diese neuen Regelungen in dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 251 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK, früher Abwassertechnische Vereinigung). Letztendlich entscheiden die lokalen Betreiber über die Neutralisationspflicht des Abwassernetzes (üblicherweise die Untere Wasserbehörde), diese stützen sich jedoch in der Regel auf das Arbeitsblatt der ATV-DVWK und übernehmen dessen Inhalte in ihre Bestimmungen.

Das heißt für den Fachbetrieb bzw. für den Betreiber einer Brennwertanlage, dass in jedem Einzelfall beim jeweiligen Betreiber des Abwassernetzes (Kommunen, Landkreise usw.) nachgefragt werden muss, ob er den neuen Empfehlungen der ATV-DVWK folgt. Letztendlich entscheiden die lokalen Betreiber über die Neutralisationspflicht des Abwassernetzes (üblicherweise ist dieses die Untere Wasserbehörde), diese stützen sich jedoch in der Regel auf das Arbeitsblatt der ATV-DVWK und übernehmen dessen Inhalte in ihre Bestimmungen. Das heißt für den Fachbetrieb bzw. für den Betreiber einer Brennwertanlage, dass in jedem Einzelfall beim jeweiligen Betreiber des Abwassernetzes (Kommunen, Landkreise, etc.) nachgefragt werden muss, ob er den neuen Vorgaben der ATV-DVWK folgt.

#### 3.3.2.1 Öl-Brennwerttechnologie und Solarthermie

Das EEWärmeG, das zum 01. Januar 2009 in Kraft getreten ist, schreibt vor, dass in Neubauten ein Teil des Wärmebedarfs mit regenerativen Energieträgern gedeckt sein muss. Zur Erfüllung dieser Nutzungspflicht werden verschiedene Varianten konkretisiert, wobei es dem Bauherrn überlassen wird, welche Lösungsvariante bevorzugt wird. Die Anforderungen lassen sich auch durch eine von Öl-Brennwerttechnologie in Kombination mit einer Solarthermieanlage erfüllen.

Beim Einsatz von Solarenergie in neu erbauten Ein- und Zweifamilienhäusern schreibt das Gesetz eine Solarkollektorfläche von mindestens 4 % der beheizten Nutzfläche vor. Um den Anforderungen des Wärmegesetzes zu genügen, wäre in einem 150 m<sup>2</sup> großen Haus eine Solarthermieanlage mit einer Kollektorfläche von 6 m<sup>2</sup> ausreichend.

Das EEWärmeG fordert für Wohnhäuser ab drei Wohneinheiten eine Mindestkollektorfläche von 3 % der beheizten Nutzfläche. Dieses würde für ein 400 m<sup>2</sup> großes Sechsfamilienhaus

immerhin 12 m<sup>2</sup> ergeben. Das neue Wärmegesetz sieht in bestehenden Gebäuden keine Verpflichtung zur Nutzung der regenerativen Energien vor. Andererseits wurde den Landesregierungen die Möglichkeit eingeräumt, im Zuge eigener Regelungen künftig auch den Eigentümern von Bestandsgebäuden bei wesentlichen baulichen Veränderungen eine teilweise Nutzung regenerativer Energien vorzuschreiben. Darüber hinaus können die Länder in Eigenregie den Pflichtanteil für die Nutzung der Solarthermie in Neubauten höher ansetzen.

So ist z. B. in Baden-Württemberg eine landeseigene Regelung bereits vor der Verabschiedung des bundesweit geltenden EEWärmG in Kraft getreten. In Baden-Württemberg müssen in Neubauten 20 % ihres Wärmebedarfs aus regenerativen Energienquellen bereitgestellt werden. Zudem wurde für bestehende Gebäude, in denen nach dem 01. Januar 2010 die Heizungsanlage saniert wird, ein Mindestanteil von 10 % zur Verwendung an regenerativen Energien festgelegt. Beide Vorgaben lassen sich mit einer Kombination von Öl-Brennwerttechnologie und Solarthermie erfüllen, weil in diesem Bundesland auch die Verwendung von Bioheizöl auf die Quote angerechnet wird.

Als Innovation können auch Hightech-Brennstoffgeräte mit neuer Systemtechnologie zur Brennwertoptimierung und Solaranbindung eingesetzt werden. Der verwendete Wärmeübertrager mit einer sehr hohen Wärmeübertragungsfläche ermöglicht bereits bei Systemtemperaturen von 70/50 °C einen ganzjährigen Kondensationsbetrieb. In der Praxis werden bei einer Flüssiggas-Brennstoffnutzung Normnutzungsgrade von 107 % erreicht. Da dieses Gerätesystem keinen Mindestvolumenstrom benötigt, kann auch keine Rücklauf Temperaturanhebung erfolgen.

Die Heizungsregelung sorgt nicht nur für die Überprüfung und Anlagensteuerung der Heizungsanlage, sondern kann auch die Solarthermieanlage betreiben. Aufgrund dieser Lösung wird bei solarem Ertrag die Nachheizung mit dem Brennwertwärmeerzeuger zurückgehalten und kann eine erhöhte Nutzung der Solarthermieanlage von bis zu 10 % erreicht werden.

Beim Einsatz von Brennwertwärmeerzeugern und thermischen Solaranlagen sollten grundsätzlich stehende Speicher verwendet werden, die die Ausbildung einer thermischen Schichtung erlauben. Die sich ergebenden niedrigeren Rücklauftemperaturen erlauben eine Steigerung der Anlageneffizienz. Die Rückführung einer evtl. vorhandenen Zirkulationsleitung bereitet wegen der (bei Zeitsteuerung) schwankenden Temperatur Probleme. Eine optimale Steuerung der Speicherbeladung durch den Wärmeerzeuger kann nur mit zwei Thermostaten erreicht werden, die im Speicher oben und unten angeordnet werden.

**Tab. 3-10:** Entscheidungsmatrix zwischen Kombigerät mit integriertem Bereitschafts-Durchlauferhitzer oder Heizgerät mit separatem Speicherwassererwärmer (Quelle: IB-THEISS)

|                          | Randbedingungen   | Kombigerät mit Bereitschafts-Durchlauferhitzer | Heizgerät mit separatem Speicher-Warmwassererwärmer |
|--------------------------|---|--|---|
| Komfort-Warmwasserbedarf | Warmwasserbedarf für<br>- eine Wohnung<br>- ein Einfamilienhaus<br>- zentral für ein Mehrfamilienhaus<br>- dezentral für ein Mehrfamilienhaus | +<br>0<br>-<br>+                               | +<br>+<br>+<br>+                                    |



Fortsetzung Tab. 3-10

|   |   |   |     |
|---|---|---|-----|
| Nutzungsart unterschiedlich angeschlossener Zapfstellen                             | - eine Zapfstelle                                     | + | 0   |
|   | - mehrere Zapfstellen, keine gleichzeitige Nutzung    | + | 0/+ |
|   | - mehrere Zapfstellen, gleichzeitige Nutzung          | - | +   |
| Entfernung der Zapfstelle vom Gerät   | - bis 7,0 m (ohne Zirkulationsleitung)                | + | -   |
|   | - mit Zirkulationsleitung                             | - | +   |
| Modernisierung  | - Speicher-Warmwassererwärmer vorhanden               | - | +   |
|   | - Austausch eines vorhandenen Kombigerätes            | + | -/0 |
| Platzbedarf   | - geringer Platzbedarf (Montage in Nische)            | + | 0   |
|   | - ausreichender Platzbedarf (Montage im Aufstellraum) | + | +   |
| Bewertung: + = empfehlenswert; 0 = bedingt empfehlenswert; - = nicht empfehlenswert |   |   |     |

### 3.3.3 Objektbeispiel und Referenzprojekte

*Objektbeispiel:* Kreishaus Hameln mit Kaskade-Brennwertwärmeerzeuger

Architekten: Hascher Jehle, Berlin mit dsw Architekten und Ingenieure, Berlin.

Das Kreishaus Hameln wurde als Niedrigenergie-Bürogebäude konzipiert und besteht aus einem straßenseitigen Kopfbau und fünf länglichen viergeschossigen Riegelbauten, die sich zu einem dahinter liegenden Park öffnen. Der Kopfbau folgt mit seiner dynamisch geschwungenen Fassade im Eckbereich dem Straßenverlauf. Ein wichtiges Element des Energiekonzepts ist die Gebäudeausrichtung, die eine optimale Solarenergienutzung und einen hohen Anteil an Tageslicht während des gesamten Jahres ermöglicht.



**Abb. 3-15:** Kreishaus Hameln (Quelle: Svenja Bockhop, Berlin)

### Energiekonzept und Gebäudetechnik:

Im Sommer werden die Büroräume durch eine Bauteilaktivierung (BTA) gekühlt. Für die wasserdurchströmten Rohrregister in den Geschossdecken wird das Grundwasser eines bestehenden Brunnens genutzt. In speziellen Bereichen, die aufgrund der höheren inneren Lasten auch eine erhöhte Kühlleistung erfordern, wie z. B. die Datenverarbeitungsräume und der Sitzungssaal, sorgt eine konventionelle Kältemaschine für angenehme Raumtemperaturen. Gleichzeitig stellt sie im Fall einer eventuellen Störung im Bereich der Brunnenanlage die Betriebssicherheit der EDV-Anlagen sicher. In den Wintermonaten übernehmen die Rohrregister innerhalb der Betondecken die Grundlast der Heizung. Die Wärmebereitstellung erfolgt über zwei in Kaskade geschaltete Gas-Brennwertwärmeerzeuger.

**Tab. 3-11:** Referenzprojekte über Anlagen mit Gas-Brennwerttechnologie  
(Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten  |
|--|--|---|
| Eremitage in Bayreuth<br>Staatliches Hochbauamt<br>Bayreuth  | Kaskaden-Brennwerttechnologie;<br>zwei ecoCRAFT Gas-Brennwert-<br>wärmeerzeuger                        | Emissionswert unter 60 mg<br>NO <sub>x</sub> /kWh,<br>hydraulische Weiche |
| Kreishaus in Hameln,<br>Hascher Jehle, Berlin  | Kaskaden-Gas-Brennwerttechno-<br>logie   | Niedrigenergie-Büro-<br>gebäude, gekühlte Bauteil-<br>aktivierung         |
| Umbau Martini-Kirche in Biele-<br>feld zum Gourmet-Restaurant,<br>H. M. Bruns brunsarchitekten,<br>Bielefeld | Zwei ecoCRAFT Gas-Brennwert-<br>Wärmeerzeuger in Kaskade,<br>modulare Betriebsweise 16,7 bis<br>300 kW | RLT-Anlagen mit Wärme-<br>rückgewinnung                                   |

## 3.3.4 Förderungen und normative Rahmenbedingungen

### Kombiförderung

Das Bundesumweltministerium hat die Kombiförderung für den Austausch alter Öl- und Gasheizgeräte gegen Brennwerttechnologie in Verbindung mit Solarthermieanlagen verlängert und ausgebaut. In Verbindung mit einer solaren Heizungsunterstützung beträgt der Zuschuss weiterhin 750 €. Darüber hinaus wird jetzt auch die solare Warmwasserbereitung in Kombination mit dem Austausch des Heizgeräts mit 375 € gefördert. Diese Regelung soll bereits für Anträge gelten, die seit dem 1. Mai 2008 beim BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) eingegangen sind. Zusätzlich gewährt der Staat beim Einbau von Solarkollektoren 60 €/m<sup>2</sup>-Kollektorfläche, mindestens jedoch 410 €/pro Anlage. Die Solarförderung bei einer Modernisierung mit Brennwerttechnologie und solarer Heizungsunterstützung beträgt derzeit 105 € pro Quadratmeter installierte Kollektorfläche.

### Förderungen im Marktanreizprogramm

Seit 1. Januar 2008 gibt es neue Fördermöglichkeiten für den Einsatz regenerativer Energien und rationale Energieumwandlungstechnologien. Die BAFA-Richtlinie enthält neue Förderungen, wie z. B. ein Kombinations- und Effizienzbonus. Durch ein neues Bonussystem

können deutlich höhere Förderbeträge bezogen werden. Wenn ein Nutzer z. B. Solarkollektoren in Verbindung mit Biomassewärmeerzeuger, Wärmepumpe, Gas- oder Öl-Brennwertwärmeerzeuger installieren lässt, erhält er einen zusätzlichen Kombinationsbonus. Für bestehende Gebäude, deren Transmissionswärmeverlust bestimmte Werte nicht überschreitet, kann zusätzlich ein Effizienzbonus geltend gemacht werden. Besonders innovative Anlagen, z. B. große Solarkollektoranlagen oder Biomassewärmeerzeuger mit hochwirksamen Staubfiltern, profitieren von der Innovationsförderung.

### **Basisförderungen**

Die Basisförderungen umfassen nachfolgend aufgeführte Bereiche. Sämtliche Nutzer, die energiesparende Pumpen einsetzen, können nachfolgend aufgeführte Zuschüsse nutzen:

- hocheffiziente Umwälzpumpen mit einem Energielabel A: 200 €/Pumpe. Die hydraulische Optimierung des Heizungssystems muss mit einem Nachweis über den hydraulischen Abgleich belegt werden. Dieser Zuschuss steht nicht für Systeme mit Wärmepumpen zur Verfügung.
- hocheffiziente Solarpumpen: 50 €/Pumpe.

### **Kombinationsbonus**

Wenn der Einbau einer Solarthermieranlage mit einem förderfähigen Gas- oder Öl-Brennwertwärmeerzeuger, einer Wärmepumpe oder einem Biomassewärmeerzeuger für feste Brennstoffe (Holz) kombiniert wird, wird ein Kombinationsbonus von zusätzlich 750 € pro Anlage gewährt. Im Falle eines Gas- oder Öl-Brennwertwärmeerzeugers war dieser Zuschuss bis 30. Juni 2008 befristet und der Austausch muss gegen einen Gas- oder Öl-Wärmeerzeuger ohne Brennwerttechnik erfolgen.

Die Zuschüsse des Marktanreizprogramms können mit anderen Förderungen, wie z. B. dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) kombiniert werden. Im Gegensatz zu den anderen Förderbausteinen sind aber der Kombinations- und Effizienzbonus nicht miteinander kumulierbar.

### **Innovationsförderung**

Mit der Innovationsförderung soll ein Anreiz für neuartige Technologien gesetzt werden. Hierzu zählen nachfolgend aufgeführte Technologien. Bei der Verfeuerung fester Biomasse können für die Komponenten zur Brennwertnutzung sowie Partikelabscheidung aus dem Abgas 500 € beantragt werden. Förderfähig sind elektrostatische, filternde Abscheider oder Abgaswäscher, allerdings nicht Fliehkraftabscheider wie Zyklone oder Multizyklone.

## **3.3.5 Wirtschaftlichkeit**

Die Brennwertwärmeerzeuger erzielen in Kombination mit einem modulierenden Brennerbetrieb sowie einer gleitend witterungsgeführten Wärmeerzeuger-Regelung eine deutlich höhere Energieausnutzung als dieses mit Niedertemperaturwärmeerzeuger in der konventio-

nellen Bauweise möglich ist. Insbesondere bei Außentemperaturen zwischen  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , d. h. also bei einer Anlagenauslastung zwischen 30 und 80 % sind kondensierend arbeitende Wärmeerzeuger wirtschaftlicher.

In Bezug auf die Jahresheizarbeitslinie und die Summenhäufigkeitsverteilung der Heiztage bei mittleren Tagesaußentemperaturen ergibt sich selbst bei Systemtemperaturen von  $75/60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein Betriebsanteil der Kondensationswärmenutzung von 98 %. Unabhängig von der bestehenden Heizungsanlage bzw. den vorhandenen Systemtemperaturen kann daher im direkten Vergleich zwischen einem Brennwertwärmeerzeuger und einem Niedertemperaturwärmeerzeuger ein realistischer Effizienzfaktor 10 bis 15 % zugunsten der kondensierenden Betriebsweise erreicht werden. Neben dem hohen Normnutzungsgrad des Brennwertgerätes sorgen bei einem Wärmeerzeugeraustausch in der Regel die häufig vorhandenen Rahmenbedingungen (weit verzweigtes Rohrleitungsnetz, große Durchmesser, Wasserinhalte, etc.) für einen zufriedenstellenden Amortisationszeitraum. Dies liegt auch darin begründet, dass die laufenden Energiekosten im Leistungsbereich zwischen 40 und 500 kW in der Regel häufig um ca. 25 bis 40 % sinken.

## 3.4 Kraft-Wärme-Kopplung

### 3.4.1 Grundlagen

Mit der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden Verfahren definiert, bei denen eine Energieanlage aus den zugeführten Energien gleichzeitig mehrere Zielenergien, z. B. elektrischen Strom und Wärme, erzeugt. Aufgrund der gekoppelten Erzeugung, Wandlung oder Umformung dieser Zielenergien unterschiedlicher Wertigkeit können die Primärenergien eingespart und Schadstoffemissionen reduziert sowie Anlagenkosten gemindert werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die erzeugten Zielenergien auch tatsächlich genutzt werden. Schlüsse auf die Effizienz der gekoppelten Erzeugung oder Umwandlung lassen sich nur ziehen, wenn die Erzeuger- und Abnehmersituationen gleichzeitig beachtet werden. Wenn in einer Anlage gleichzeitig Strom (Kraft) und Wärme erzeugt werden, handelt es sich umgangssprachlich um eine Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Erfolgt diese Kombinationsanwendung in einer kompakten Anlage und nicht in einem Heizkraftwerk, dann handelt es sich hierbei um ein Blockheizkraftwerk (BHKW).

Die Kraft-Wärme-Maschinen (z. B. Motoren oder Turbinen) erzeugen im thermodynamischen Prozess aus einem flüssigen oder gasförmigen Brennstoff mechanische Energie und wandeln diese in einem Generator in Strom um. Die dabei entstehende Abwärme, die in konventionellen Kraftwerken ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird, kann zur Gebäudeheizung sowie zur Prozesswärme oder zur Kälterzeugung genutzt werden. Die Kraft-Wärme-Kopplung zeichnet sich im Vergleich zur getrennten Strom- und Wärmeerzeugung durch einen deutlich höheren Wirkungsgrad und daher auch als effizientere Energienutzung aus. Die Prozesse der Kraft-Wärme-Kopplung zeichnen sich zudem als die derzeit ökologisch sinnvollste Nutzung der fossilen Brennstoffe und der regenerativen Energien aus, entlastet die Umwelt und schont die Ressourcen.

Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung wird ebenso in der Technologie der Brennstoffzellen umgesetzt, wobei hier die bei der Elektrolyse entstehende Wärme über einen Kühlkreislauf (Wärmeübertrager) ausgekoppelt und zur Heizung, Warmwasserbereitung oder (bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen) zur Dampferzeugung genutzt wird. Bei einer Brennstoffzelle wird Strom direkt auf elektrochemischem Weg aus dem Energieträger Wasserstoff gewonnen. Bei diesem Prozess entsteht bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff Wärme, die ausgekoppelt wird und zu Heizzwecken genutzt werden kann. Ebenso wie bei einem Blockheizkraftwerk wird durch die Wärmeentnahme die Stromausbeute nicht beeinflusst, allerdings ist ebenfalls das Temperaturniveau der Abwärme festgelegt (auf ca. 70 °C bei der PEM-Zelle). Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird aber auch Wärme erzeugt, die bei der Stromerzeugung thermodynamisch unvermeidbar anfällt und z. B. über einen Kühlturm in die Umgebung abgegeben wird oder zu Heizzwecken genutzt wird.

Damit diese Abwärme auch tatsächlich genutzt werden kann, ist es wichtig, dass sie auf einem zu Heizzwecken sinnvollen Temperaturniveau ausgekoppelt wird. In dezentralen Blockheizkraftwerken wird Strom produziert und gleichzeitig die Wärme des Kühlwassers und der Abgase für Nah- und Fernwärmenetze genutzt. Hierdurch werden wesentlich höhere Wirkungsgrade erreicht. In diesem Fall muss allerdings eine geringere Stromausbeute in Kauf genommen werden. Relativ kleine und deshalb dezentral, d. h. in unmittelbarer Nähe des Versorgungsobjektes, einsetzbare Energieanlagen zur Erzeugung elektrischen Stroms und Wärme werden als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet. Zur Erzeugung des elektrischen Stromes dienen Generatoren (Synchron-/Asynchron-Generator), die von Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen angetrieben werden. Die Wärmeerzeugung resultiert aus der Nutzung der Abwärme der Antriebsmaschinen.

Bei Blockheizkraftwerken auf Brennstoffzellenbasis wird die Wärme in der Regel bei einer Temperatur von 70 bis 90 °C abgegeben und kann damit für viele Heizanwendungen direkt genutzt werden. Bei einem konventionellen Kraftwerk hingegen wird die Abwärme meist bei 20 bis 40 °C mit dem Kühlturm an die Umgebung abgegeben. Diese Wärme lässt sich durch eine veränderte Prozessführung dennoch zu Heizzwecken bei üblichen Temperaturen zwischen 80 und 130 °C nutzen. Allgemein wird ein guter Wirkungsgrad dadurch erreicht, dass die Wärmeverluste der Verteilleitungen so gering wie möglich gehalten werden. Dies trifft insbesondere bei Wohnsiedlungen zu, die mit einem kleinen Blockheizkraftwerk beheizt werden. In dem Zusammenhang sind eine kurze Leitungsführung und gute Wärmedämmung der Leitungen sowie niedrige, möglichst bedarfsangepasste Temperaturen empfehlenswert. Ideal ist der Einsatz von Blockheizkraftwerken, wenn sie in ein vorhandenes Wärmenetz einspeisen können, das auch im Sommer einen Wärmebedarf zur Verfügung stellen muss (Krankenhäuser, Industriebetriebe, etc.).

In den konventionellen Kraftwerken, hierzu zählen auch Nuklearkraftwerke, wird nur elektrischer Strom erzeugt. Der Wirkungsgrad beträgt hier ca. 35 % der eingesetzten Energie. Der restliche Wirkungsgradanteil steckt in der Abwärme, die ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Durch die Abwärmenutzung, die beim Stromerzeugungsprozess in konventionellen Kraftwerken ungenutzt in die Atmosphäre gelangt, lässt sich der Energienutzungsgrad des Gesamtprozesses entscheidend erhöhen, z. B. bei der Kraft-Wärme-Kopplung von 30 bis 45 % auf 80 bis 90 %. Parallel hierzu werden natürlich auch die CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen bis zu 30 % reduziert.

In der Elektrizitätswirtschaft haben zwischenzeitlich die Systeme zur Stromerzeugung aus regenerativen Energien und dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen bereits eine große Bedeutung erlangt. Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme arbeiten nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Hierbei treiben Diesel- oder Gasmotoren Generatoren an und erzeugen Strom. Gleichzeitig wird die Abwärme der Motoren über Wärmeübertrager nutzbar gemacht. Weil in diesem Prozess Strom und Wärme produziert werden, ist hier auch ein hoher Anlagenwirkungsgrad zu verzeichnen.

Um die Biomasse dezentral für die Strom- und Wärmeerzeugung einsetzen zu können, ist es erforderlich, dass der Festbrennstoff Biomasse in einen gasförmigen Brennstoff umgewandelt wird, der dann auch in kleineren Anlagen, z. B. in Gasmotoren, verstromt werden kann.

Prinzipiell sind hier drei Variationen, flüssige oder gasförmige Brennstoffe aus Festbrennstoffen zu erzeugen, realisierbar: Die Vergärung, die Pyrolyse und die thermische Vergasung.

Der derzeit am weitesten verbreitete Prozess bietet sich in der anaeroben Vergärung oder der Fermentation in Biogasanlagen an. Das bei der Vergärung entstehende Biogas kann in der Regel mit hohem Wirkungsgrad direkt im Gasmotor verstromt werden. Ein Kernproblem der Biogaserzeugung besteht allerdings darin, dass mit den herkömmlichen Prozessen ligninhaltige Biomasse gar nicht und cellulosehaltige nur teilweise in Biogas umgewandelt werden können. Aus diesem Grund können Holz und holzartige Reststoffe in Biogasanlagen nicht umgesetzt werden. Es kommen daher primär Nutzpflanzen wie Mais oder Getreide zum Einsatz.

Mit der thermischen Vergasung können dagegen auch holzartige und andere kohlenstoffhaltige Brennstoffe in ein brennbares Gas umgewandelt werden. Holzartige Biomasse wird derzeit nahezu ausschließlich zur Wärmeerzeugung oder in großen Biomasse-Dampfkraftwerken mit Leistungen bis 20 MW<sub>el</sub> verwendet. Um die hohen Potenziale holzartiger Biomasse auch dezentral in kleineren Einheiten nutzen zu können, werden zunehmend auch Klein-Biomasseanlagen mit thermischer Vergasung eingesetzt.

Bei der Planung einer KWK-Anlage muss der Bedarf an elektrischen Strom, Wärme und Kälte möglichst exakt vorausbestimmt werden. Die Aufteilung über Tage und Stunden hilft bei richtiger Dimensionierung von KWK-Anlagen. Der Wärmelastgang kann mit der Wahl des Kälteverfahrens beeinflusst werden. Bei elektrisch betriebenen Kältemaschinen wird der sommerliche Wärmebedarf so gering, dass die KWK nur uneffizient oder nicht mehr betrieben werden kann. In der Regel bestimmt der sommerliche Elektroenergiebedarf für Klimaanlagen die Leistungsspitze und damit den Leistungspreis in der Elektroenergieabrechnung. Eine sorgfältig geplante wärmegeführte Kältetechnik senkt dagegen den Stromleistungsbedarf und somit auch die Investitionskosten einer dezentralen KWK-Anlage. Voraussetzung für ausreichende Laufzeiten und einen wirtschaftlichen Betrieb der dezentralen Energieversorgungsanlagen ist eine permanente Wärmeabnahme während der Frühjahr- und Herbstmonate sowie insbesondere über die Sommermonate.

Da bereits verschiedene Typen der KWK-Anlagen auf dem Markt erhältlich sind, ist vor der Auswahl ein detaillierter Vergleich der unterschiedlichsten Vor- und Nachteile der KWK-Systeme empfehlenswert. Um sowohl ein energetisch wie auch wirtschaftlich optimales Er-

gebnis zu erreichen, muss bereits während der Vorplanung eine Analyse der Betriebsbedingungen durchgeführt werden, wobei nachfolgend aufgeführte Parameter betrachtet werden:

- Aufstellungsbedingungen
- thermischer und elektrischer Bedarf
- zu erwartende Regelcharakteristik
- Jahresnutzungsstunden.

Aufgrund der Ergebnisse kann aus den auf dem Markt verfügbaren KWK-Systemen, wie Motor-BHKW, Gasturbinen, Stirling-Maschinen, Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen, die optimalste Systemvariante ausgewählt werden.

### 3.4.1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

#### **DIN V 18599-9:** »End- und Primärenergiebedarf von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen«

Die DIN V 18599-9 enthält ein Verfahren zur Berechnung des Endwärmeeaufwands für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), die als elektrischen Strom- und Wärmeerzeuger innerhalb der Gebäude verwendet werden.

Bei den BHKW oder Klein-KWK-Anlagen werden die Verluste sowie der Hilfsenergieaufwand des Prozessbereichs »Wärmeerzeugung« ermittelt und für die weitere Berechnung nach DIN V 18599-1 zur Verfügung gestellt. Hierbei können die in der DIN V 18599-9 abgebildeten KWK-Systeme die Aufwendungen für die Wärmeerzeugung nach DIN V 18599-5 bis DIN V 18599-8 ersetzen oder als zusätzlicher Wärmeerzeuger beeinflussen. Das Besondere des Berechnungsverfahrens nach DIN V 18599-9 besteht darin, dass bei der gleichzeitigen, voneinander abhängigen Erzeugung von elektrischem Strom und elektrischer Wärme, derjenige Endenergieaufwand ermittelt werden muss, der der Wärmeerzeugung zuzurechnen ist. Demgegenüber wird der durch die KWK-Anlage erzeugte elektrische Strom unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren für elektrischen Strom und den verwendeten Energieträger vom gesamten Endenergieaufwand abgezogen. Für die Berechnung werden die Erzeugernutzwärmeabgabe nach DIN V 18599-5 und die Leistungsdaten der verwendeten Geräte und Komponenten benötigt. Diese Daten können entsprechend der DIN V 18599-9 oder den zitierten Normen gemessen oder berechnet werden. Das Ergebnis der Berechnung nach DIN V 18599-9 stellt sich als anrechenbarer Endenergieaufwand dar, der zur Bestimmung des Primärenergieaufwandes nach DIN V 18599-1 erforderlich ist.

#### **VDI 4608 Blatt 2:** »Energiesysteme; Kraft-Wärme-Kopplung; Allokation und Bewertung«

Das Blatt 2 der VDI 4608 »Energiesysteme; Kraft-Wärme-Kopplung; Allokation und Bewertung« ermöglicht eine Beurteilung der Effizienz der gekoppelten Stromerzeugung oder Umwandlung mit unterschiedlichen Zielenergien. Es schließt an die Definitionen und Beispiele der Richtlinie VDI 4608 Blatt 1 an, legt unterschiedliche Methoden zur Allokation dar und empfiehlt eine wissenschaftlich begründete Vorgehensweise. Aufgrund der gekoppelten Erzeugung, Wandlung oder Umformung der Zielenergien unterschiedlicher Wertigkeit können die Primärenergien eingespart und Schadstoffemissionen reduziert sowie Anlagenkosten gemindert werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die erzeugten Zielenergien auch tatsächlich genutzt werden. Analysen zur Effizienz der gekoppelten Erzeugung oder Umwandlung lassen sich nur dann erstellen, wenn die Erzeuger- und Abnehmersituationen gleichzeitig



beachtet werden. Aus diesem Grund behandelt die VDI 4608 Blatt 2 sowohl die zeitpunkt- als auch zeitraumbezogenen Allokationen von Brennstoffen, Kosten und Schadstoffemissionen.

**VDI 6012 Blatt 1:** »Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude; Grundlagen – Projektplanung und -durchführung«

Die VDI 6012 Blatt 1 beschreibt dezentrale Energiesysteme im Gebäude sowie deren Einbindung in das Gesamtsystem der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). In der TGA wurde bisher ausschließlich die Elektrizitätsanwendung betrachtet. Ausnahme bildete die dezentrale Stromerzeugung mit der Kraft-Wärme-Kopplung. Die VDI 6012 gibt nun Hinweise zur Einbindung dezentraler Energieerzeugungssysteme in das Gebäude, wobei hier die Aspekte der Planung, Errichtung und des Betriebs behandelt werden. Zudem werden in der VDI 6012 Blatt 1 Hinweise zur Einbindung von Energiespeichern in die Gebäudetechnik abgehandelt. Das Arbeitsblatt beschränkt sich auf den Hintergrund des Anwendungsbereiches der Gebäudetechnik, auf Systeme mit kleinerer Leistung. Vorteilhaft und Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Kraft-Wärme-Kopplung sind möglichst

- gleichmäßiger Wärmebedarf
- gleichzeitiger Bedarf an Strom und Wärme
- hohe jährliche Vollbenutzungsstunden (5000 bis 6000 h)
- günstige Brennstoffpreise im Verhältnis zum Strompreis.

Die Kraft-Wärme-Kopplung besteht aus der Erzeugung von Strom bei gleichzeitiger Nutzung der hierbei entstehenden Wärme. Bei der üblichen Stromerzeugung in Kraftwerken mit Nutzungsgraden von ca. 35 bis 45 % wird die Wärme in der Regel an die Umwelt abgegeben. Dagegen kann bei den KWK-Anlagen der Energiegehalt des Brennstoffes (primärenergetische Analyse) zu mehr als 90 % genutzt werden. Aufschluss über die Energiebenutzungscharakteristik und somit auch über die sinnvolle Auslegung der Anlage geben die Jahresdauerlinien für Strom und Wärme, die sich aus den Größen der geordneten Stundenmitteln des Leistungsbedarfs ergeben. Die KWK-Anlagen werden in den meisten Anwendungsfällen wärmegeführt betrieben.

### 3.4.1.2 KWK-Systemvarianten

Bei den Kraftwerken mit Wärmeauskopplung wird die Heizwärme durch Kondensation von Wasserdampf gewonnen. Der Wasserdampf ist in einem Dampfkraftwerk das Medium, das die Turbinen antreibt, wobei die Turbinen mit dem Generator zur Stromerzeugung gekoppelt sind. In den Turbinen wird der Wasserdampf stufenweise entspannt (der Druck nimmt ab). Der Dampf zur Erzeugung der Heizwärme wird üblicherweise vor der letzten Turbine entnommen und in einem Wärmeübertrager kondensiert. Je nach dem, bei welchem Druck der Dampf kondensiert, kann Wärme bei verschiedenen Temperaturen erzeugt werden. Die Heizwärme wird dann mit einer Fernwärmeleitung zu den Verbrauchern transportiert. Durch die Entnahme von Dampf vor der Niederdruckturbine sinkt die Stromausbeute des Kraftwerks. Als konventionelle Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung stehen die Dampfturbine, der Verbrennungsmotor (Gas- oder Dieselmotoren) sowie Gasturbinen und/oder auch als GuD-Kraftwerke (Gas- und Dampfkraftwerke) zur Verfügung.



Neueste Technologien wie die Brennstoffzelle oder der Stirlingmotor erweitern die bestehenden Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Stirlingmotor können ebenfalls einen erheblichen Beitrag zum Umweltschutz leisten. Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb ist allerdings eine fachgerechte Planung und eine Anpassung der Anlage an den Energiebedarf des Gebäudes. Die Brennstoffzellen als Sonderfall der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden mit hoher Intensität entwickelt und befinden sich derzeit in Praxistests. Die beteiligten Hersteller erwarten eine Serienfertigung erst in einigen Jahren.

Die Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden primär nach den vier Anwendungsbereichen unterteilt:

- Wärmeauskopplung aus Kraftwerken
- Blockheizkraftwerke (BHKW)
- Kleinst-KWK-Anlagen (Strom und Wärme für EFH und MFH)
- Kleinst-Brennstoffzellen-KWK (Strom und Wärme für EFH und MFH) bzw. Brennstoffzellen-KWK (Strom und Wärme für Kleingewerbe bis Industriebetriebe).

In letzter Zeit liegt bei den Motoren-BHKW der Trend zum Einsatz der regenerativen Kraftstoffe wie Biodiesel und Pflanzenöl, unterstützt von der Stromvergütung nach der EnEV.

Die Vorzüge dieser Technologie sollten jedoch nicht verschleiern, dass die Umsetzung dieser Brennstoffe in Otto- und Dieselmotoren technische Zusatzaufwendungen erfordern, die auch unter Berücksichtigung der höheren Vergütungssätze nach dem EEG einen wirtschaftlichen Betrieb gerade bei Anlagen im kleineren Leistungsbereich nur selten erlauben.

### 3.4.1.3 Technik und Betriebsweise

Kleine Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung werden in der Regel »wärmegeführt« betrieben, d. h. sie laufen, wenn im versorgten Wohnhaus oder der Wohnsiedlung oder Kleingewerbebetrieb gerade Wärmeenergie angefordert wird. »Stromgeführte KWK-Systeme« bedeutet, dass sich der Betrieb am Strombedarf der versorgten Abnehmer orientiert. »Netzgeführt« bedeutet wiederum, dass nicht die Situation vor Ort, sondern die Situation im Netz vorrangig ist, d. h. das Kleinkraftwerk wird gestartet, wenn irgendwo im Stromnetz ein Bedarf angefordert wird.

Unter »Virtueller Kraftwerkbetrieb« wird die Vernetzung vieler kleiner Anlagen verstanden, die der dezentralen Stromerzeugung dienen. Diese werden über ein von außen über ein zentrales Leitsystem steuerbares dezentrales Energiemanagement (DEM) betrieben. Als geeignete Stromerzeuger werden u. a. Brennstoffzellen, aber auch andere Maschinen zur Kraft-Wärme-Kopplung, wie Mikrogasturbinen, Gasmotoren, Gasturbinen eingesetzt. Virtuelle Kraftwerke lassen sich, als Ergänzung und Entlastung der zentralen Stromerzeugung in Großkraftwerken, zur Abdeckung von Bedarfsspitzen nutzen. In den Zeiten, in denen die Netzlast steil ansteigt, können die dezentralen Anlagen über das Leitsystem auf Volllast geschaltet werden und ihre nicht genutzte Leistung zur Verfügung stellen. Auf diese Weise können die Energieversorger den Bezug von teurem Spitzenstrom optimieren.

#### 3.4.1.4 Wirkungsgradverbesserung

Der Gesamtwirkungsgrad bei der Kraft-Wärme-Kopplung (erzeugter Strom und nutzbare Wärmeenergie bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie) liegt bei ca. 80 bis 95 % und ist damit deutlich höher als der Wirkungsgrad eines konventionellen Kraftwerks. Dessen Wirkungsgrad liegt, je nach Brennstoff und eingesetzter Technik, »nur« bei 20 bis 58 % (der Strom-Mix in Deutschland liegt bei ungefähr 33 %). Die Bewertung des Wirkungsgrades einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage gegenüber dem Wirkungsgrad der reinen Stromerzeugung gestaltet sich aus dem Grund schwierig, weil in diesem Prozess die zwei Energiearten »Heizwärme« und »Strom« thermodynamisch deutlich unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Um abzuschätzen, welche tatsächliche Wirkungsgradverbesserung bzw. Energieeinsparung sich mit Kraft-Wärme-Kopplung erreichen lässt, muss diese mit einer konventionellen Technik verglichen werden, welche die gleiche Menge an Heizwärme und Strom getrennt liefert.

Damit ist der Vergleich mit einem Kraftwerk plus Wärmeerzeuger durchzuführen. Je nachdem, welcher technische Standard und welcher Brennstoff für die konventionelle Technik beim Vergleich zugrunde gelegt wird, ergibt sich eine Wirkungsgradverbesserung von 5 bis 30 %. Die Verbesserungen fallen geringer aus, wenn eine verbesserte Technik für die getrennte Erzeugung von Strom und Heizwärme herangezogen wird. Das Ergebnis ist daher von der Wahl der Technik der Vergleichsanlagen abhängig.

Allgemein ist es zur Erzielung eines guten Wirkungsgrades sinnvoll, die Wärmeverluste der Verteilleitungen möglichst gering zu halten. Dies trifft insbesondere bei Wohnsiedlungen zu, die mit einem kleinen Blockheizkraftwerk beheizt werden. In dem Zusammenhang sind eine kurze Leitungsführung und gute Wärmedämmung der Leitungen sowie niedrige, möglichst bedarfsangepasste Temperaturen empfehlenswert. Als ideale Lösung erweist sich der Einsatz eines Blockheizkraftwerks, wenn die Einspeisung in bestehendes Heiznetz möglich ist, bei dem auch über die Sommermonate einen Wärmebedarf angefordert wird (Krankenhäuser, Industriebetriebe, etc.)

#### 3.4.1.5 Innovative KWK-Technologien

Als innovative Technologie für KWK-Anlagen bietet sich die Gasturbine an, die primär im industriellen Bereich eingesetzt, aber auch bereits für den Einsatz der Gebäudeheizung konzipiert wird. Besonders innovativ ist der Entwicklungsstand der modular aufgebauten Brennstoffzellen. Derzeit befinden sich fünf effiziente Brennstoffzellentypen in der Entwicklung, die sich primär in Bezug auf das Temperaturniveau der anfallenden Wärme erheblich unterscheiden. Der Entwicklungsstand des Stirlingmotors weist aufgrund seiner Unabhängigkeit von der Art der Wärmezufuhr insbesondere im Bereich der Nutzung regenerativer Energiequellen und der industriellen Abwärme große technologische Potenziale auf.

### 3.4.2 Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung

#### 3.4.2.1 Grundlagen

Aus energiewirtschaftlichen und umweltpolitischen Aspekten werden BHKW vermehrt eingesetzt. Diese Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie erzeugt gleichzeitig elektrische Energie

und Wärme und erreicht somit auch einen hohen Gesamtwirkungsgrad. Der Leistungsbereich der BHKW liegt üblicherweise zwischen 50 und 2.000 kW<sub>el</sub>, wobei in letzter Zeit verstärkt auch Anlagensysteme unter 50 kW, als Kleinst-KWK-Aggregate Verwendung finden.

Was die Kleinst-KWK-Aggregate von den konventionellen Wärmeerzeugern unterscheidet, kommt den Betreibern zugute:

- die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom
- niedriger Brennstoffverbrauch
- zusätzliche staatliche Vergünstigungen.

Die Wirtschaftlichkeit eines Kleinst-KWK-Aggregats wird neben den Kapitalkosten stets durch die konkurrierenden Kosten für den Brennstoffbezug und den Erlös für Strom und Wärme bestimmt. Hierbei sind zusätzlich noch die gesetzlichen Vorgaben und Förderungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Gerade bei den innovativen Anlagensystemen sind die finanziellen Aufwendungen für die Beschaffung und Installation der Aggregate sowie für Wartung und Instandhaltung als wesentliche Kostenpositionen kennzeichnend. Die ökologischen Vorteile gegenüber der reinen Heizwärme- oder Stromerzeugung sind eindeutig, denn der thermische Wirkungsgrad zwischen 50 und 60 %, d. h. je nach Anlagentyp und -größe, addiert sich zu dem elektrischen Wirkungsgrad mit 30 bis 35 %.

Der Trend geht dahin, dass seitens der Verbraucher ein Einsatz der Kleinst-KWK-Aggregate (vereinzelt auch als Mini- bzw. Mikro-KWK-Aggregate bezeichnet) an Bedeutung gewinnt. Als Entscheidungskriterium zur Installation dieser dezentralen und umweltfreundlichen Strom- und Wärmeerzeugung trägt u. a. das KWK-Gesetz bei. Der Einsatz der Kleinst-KWK-Aggregate erweist sich für die Anwendungsfälle als vorteilhaft, in denen die elektrische und thermische Nutzenergie möglichst zeitgleich und mindestens über 4500 Betriebsstunden im Jahr zur Versorgung beiträgt. Der Vorteil der auf Kraft-Wärme-Kopplung basierenden Energieerzeugung spiegelt sich auch in der EnEV wider. Das Kleinst-KWK-Modul »Dachs« wird z. B. mit einem niedrigen Primärenergiefaktor von 0,7 und bei einem Betrieb mit einem regenerativen Brennstoff, wie z. B. Biodiesel, sogar mit einem Faktor »Null« bewertet. Der maximal zulässige Primärenergiebedarf wird daher in der Regel allein durch den Einsatz eines Kleinst-KWK-Aggregats eingehalten, sodass hier keine zusätzlichen Maßnahmen zur Gebäudewärmedämmung erforderlich wären. Der häufigste Planungsfehler liegt darin begründet, dass die KWK-Anlagen überdimensioniert werden. Dies ist mit erheblichen Nachteilen verbunden: Die Anlagen haben zu geringe Laufzeiten, sind unwirtschaftlich und es erhöht sich der Verschleiß.

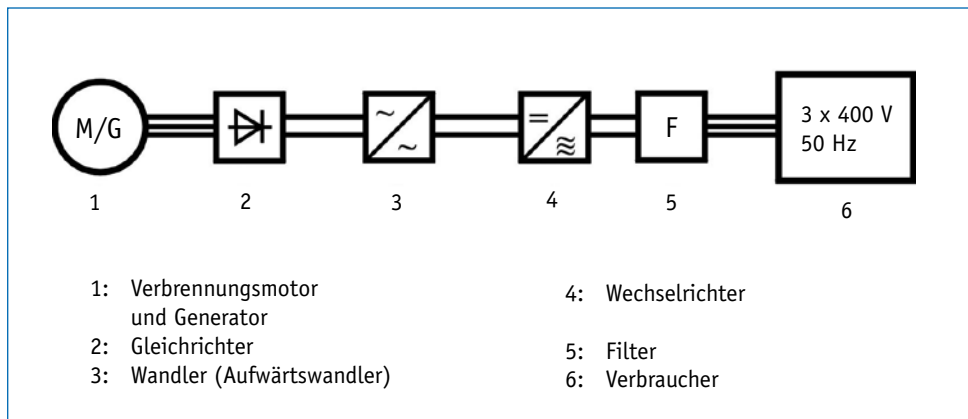
Daraus folgt, dass die Anlage einfach zu teuer wird. Ähnliche negative Auswirkungen zeigen sich auch, wenn der Pufferspeicher zu klein dimensioniert wird oder gänzlich fehlt. Die Kleinst-KWK-Aggregate werden überwiegend stromseitig im netzparallelen Betrieb geführt, wobei zur Rückspeisung des Stromüberschusses ins öffentliche Netz ein zusätzlicher Stromzähler installiert werden muss.

Alternativ werden auch Kleinst-KWK-Varianten mit der Integration eines zusätzlichen externen Wärmeübertragers angeboten. Mit dieser Ausführung kann der Gesamtwirkungsgrad auf über 100 % bezogen auf den unteren Heizwert ( $H_U$ ) gesteigert werden, wobei in Abhängigkeit von der Wassertemperatur ein mit Brennwertwärmeerzeugern vergleichbarer Kondensationsgrad von ca. 55 % erreicht werden kann. Die hierfür speziell für diese Kleinst-

KWK-Aggregate gefertigten keramischen Abgaskondensationswärmeübertrager sind sowohl für den Erdgas- als auch für den Ölbetrieb erhältlich. Was beim Einsatz eines Kleinst-KWK-Aggregats nicht beachtet wird, ist die Tatsache, dass bei dem anhaltend sinkenden Wärmebedarf für Neubauten und energetische Elektronik trotzdem ein steigender Strombedarf zu verzeichnen ist. Entsprechend einer aktuellen VDE-Studie wird der Wärmebedarf von Wohngebäuden bis 2020 um ca. 50 % abnehmen und der Strombedarf um 10 % zunehmen.

Zudem werden sich die Strompreise im gleichen Zeitraum um ein knappes Drittel erhöhen. Die statistischen Erfassungen aus der Praxis zeigen, dass die jährlichen Energiekosten für einen durchschnittlichen Vierpersonenhaushalt, der seinen Strom von den Versorgungsbetreibern (VNB) bezieht und die Wärme mittels eigenem konventionellen Wärmeerzeuger mit einer Leistung von 20 kW erzeugt, rund 2000 € betragen. Im Vergleich dazu hat ein Kleinst-KWK-Aggregat bei der gleichen Leistung eine jährliche Energiekostenbelastung von ca. 1000 €.

In der Regel arbeiten die Kleinst-KWK leistungsmulierend, d. h. das Modul kann jederzeit stromgeführt mittels Impulsauswertung dem erforderlichen Strombedarf oder wärmegeführt dem Wärmebedarf anpasst werden. Durch den Einsatz eines direktgekoppelten drehzahlvariablen Gleichstromgenerators, dessen Spannung durch einen Aufwärtswandler und Wechselrichter in 3 x 400 V / 50 Hz umgewandelt wird, kann der Motor annähernd mit einem konstanten mechanischen Wirkungsgrad arbeiten.



**Abb. 3-16:** Elektrisches Blockschaltbild einer Kleinst-KWK (Quelle: IB-THEISS, München)

Der Generator erzeugt eine Wechselspannung mit variabler Frequenz, die über eine Leistungselektronik zuerst gleich geregelt und dann auf eine netzkonforme 50 Hz Wechselspannung umgeformt wird. Die Einsatzbereiche in den Leistungsbereichen von elektrischer Leistung von 5 bis 10 kW und thermischer Leistung von 10 bis 20 kW sind für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Gewerbebetriebe, Restauration, etc. angedacht.

Die Kleinst-KWK-Anlage mit einer elektrischen Leistung von ca. 1 kW haben insbesondere im Modernisierungsmarkt gute Chancen. Bei einer richtigen Dimensionierung und hydraulischen Einbindung in das vorhandene Heizungssystem sind im Vergleich zur Brennstoffwerttechnologie Primärenergieeinsparungen zwischen 10 bis 25 % realistisch. An den Tagen

mit niedrigsten Außentemperaturen sollten zwischen 30 bis 40 % des Wärmebedarfs durch das Kleinst-KWK-Modul bereitgestellt werden. Zudem ist hier die Einbindung eines Pufferspeichers sinnvoll.

Durch die Integration eines zusätzlichen Kondensationswärmeübertragers erhöht sich die thermische Leistung, d. h. es ergibt sich ein kostenreduzierender Wärmebezug. Die bei der Stromerzeugung frei werdende Wärme am

- wassergekühlten Motor
- Generator
- Abgaswärmeübertrager

wird unmittelbar dem vorhandenen Heiz- und Warmwasserkreis zugeführt. In der Praxis reicht das aus, um die Grundlast des Gebäudewärmebedarfs zu decken. Zur Auslegung des Kleinst-KWK-Aggregats ist nicht der Gesamtwärmebedarf entscheidend, sondern der Verlauf der Wärmabnahme über das gesamte Jahr, d. h. die Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs. Das Kleinst-KWK-Aggregat wird daher zur Abdeckung der Grundlast verwendet, wobei zu beachten ist, dass die Charakteristik der Jahresdauerlinie in Abhängigkeit von der Modullaufzeit für ein Bürogebäude, Hallenbad oder Hotel einen völlig anderen Verlauf zeigt.

In der Praxis wird als Auslegungswert des Kleinst-KWK-Aggregats ca. 15 bis 30 % der maximalen Wärmelast veranschlagt. Diese Basis bezieht sich jedoch auf die maximale Wärmelast bei einer örtlich bezogenen mittleren Außenlufttemperatur. Der Wärmebedarf nach DIN 4701 zur Berechnung der Heizlast berücksichtigt dagegen den niedrigsten Zweitagesmittelwert und erhält somit wesentlich höhere Werte für die maximale Wärmelast. Für die Dimensionierung eines Kleinst-KWK-Aggregats erweisen sich die an wenigen im Jahr auftretenden Tiefsttemperaturen als unwesentlich, da die Spitzenlast in der Regel durch den Spitzenlast-Wärmeerzeuger abgedeckt wird. In der Regel lässt sich die Betriebszeit eines Kleinst-KWK-Aggregats durch die Einbindung eines Warmwasserspeichers erheblich erhöhen.

Als Antriebsaggregate stehen ausgereifte Otto-Kleinmotoren in der Variante als Magermotor mit elektrischem Motormanagement und Dieselmotoren zur Verfügung. In der Regel werden Otto-Kleinmotoren in 1-Zylinderbauweise mit einer Lebensdauer von 80.000 Betriebsstunden verwendet. Bei diesen Motoren sind die Wartungsintervalle mit bis zu 4000 h erstaunlich lang. Diese Motoren verwenden als Brennstoffe Erdgas, Diesel-, Erd- oder Rapsöl, Klär- oder Deponiegas sowie Bio-, Holz- oder Flüssiggas (Butan, Propan).

Zur Reduzierung der Abgasemissionen kommen bei den Kleinmotoren die gleichen thermischen Konzepte, d. h. Magermotoren mit Oxidationskatalysator bzw. »Lambda = 1«-Maschinen mit Dreiwegekatalysator zum Einsatz. Die Abgaswerte liegen hierbei nochmals deutlich um die Hälfte unter dem in der TA-Luft angeführten Grenzwert.

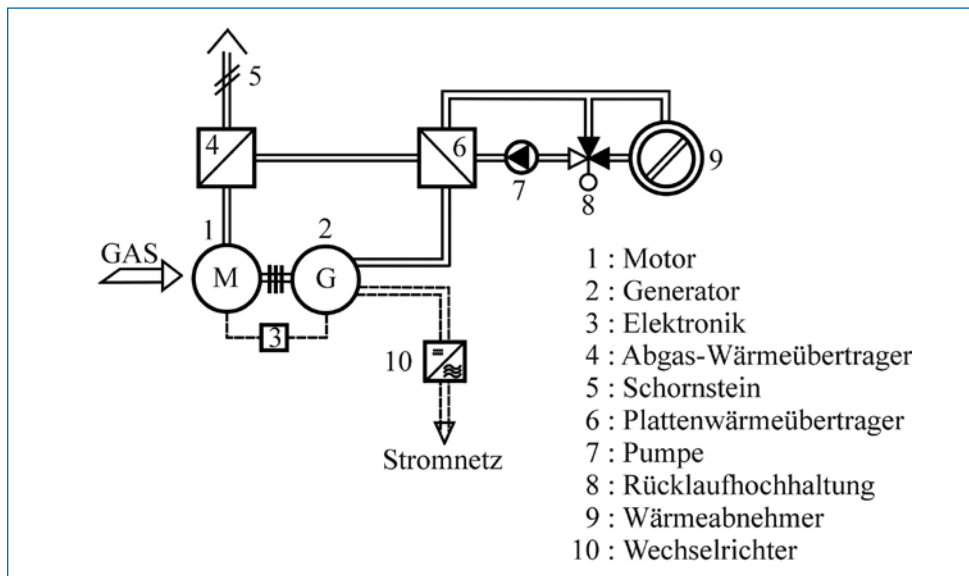
### 3.4.2.2 Verbrennungsmotorische Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kleinst-KWK-Aggregate mit Ottomotoren sind im klassischen Sinne Weiterentwicklungen der Blockheizkraftwerke (BHKW). Diese Module nehmen die im Motorkühlwasser, Motoröl, Generator und u. U. im Abgas enthaltene Wärme auf und geben diese mittels Wärmeübertrager an das Heizungs- und Warmwassersystem ab. Damit eventuelle Verschmutzungen

nicht in den Motor gelangen, wird der Kühlwasserkreislauf in der Regel vom Heizungskreis getrennt. Um die Wärmeübertragungsverluste zu reduzieren, besteht aber auch je nach Modulaufbau, die Möglichkeit den Motor direkt mit Heizungswasser zu kühlen. Einige Hersteller bieten zur Brennwertnutzung einen zusätzlichen Kondensationswärmeübertrager an, mit dem der Gesamtwirkungsgrad des Kleinst-KWK-Aggregats, in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur, um bis zu 10 % gesteigert werden kann. Bei einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 90 % wird ein Drittel der eingesetzten Energie in Strom umgesetzt und ca. zwei Drittel als Nutzwärme verwendet.

Der Verbrennungsmotor treibt den Generator zur elektrischen Stromerzeugung an, wobei die freigesetzte Wärme ebenfalls über den Wärmeübertrager ausgekoppelt wird. Die in Abhängigkeit von der Drehzahl variierende Wechselspannung des Generators wird zunächst gleichgerichtet und für die Netzeinspeisung in eine dreiphasige Wechselspannung umgewandelt. Die erzeugte Energie soll zu einem möglichst großen Anteil innerhalb des Gebäudes genutzt werden. Sobald die produzierte Leistung größer wird als die benötigte Energiemenge des Eigenbedarfs, wird der Überschuss gegen eine Vergütung in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist. Wenn die Verbraucher dagegen mehr elektrische Leistung benötigen, als das Klein-KWK-Aggregat erzeugt, dann wird der zusätzliche Strom über den Versorgungsbetreibers (VNB) bezogen. Wichtig ist ein individueller Zuschnitt der Anlage. In einem sehr gut isolierten Einfamilienhaus erreicht eine Kleinst-KWK-Anlage mit 12,5 kW<sub>th</sub> zu wenig Betriebsstunden. Dagegen wäre die gleiche Anlage in einem Altbau mit undichten Fenstern und hohen Fenster-U-Werten überfordert.

Andererseits sind den Studien der Energiewirtschaft zu entnehmen, dass sich der Wärmebedarf für Neubauten aufgrund der besseren Bauphysik im Laufe der nächsten zehn Jahre um bis zu 40 % reduzieren wird und demgegenüber der Strombedarf im Haushalt trotz Einsatz energiesparender Geräte und Beleuchtung tendenziell ansteigen wird.



**Abb. 3-17:** Funktionsaufbau einer Kleinst-KWK (Quelle: IB-THEISS, München)

In gut wärmegeprägten Wohngebäuden wird die Anzahl der Heizgradtage geringer, zudem sinkt die Heizgrenze auf 12 °C und tiefer. In der Regel sind die meisten Klein-KWK-Aggregate zum Einsatz in Einfamilienhäuser überdimensioniert. Aus diesem Grund eignen sich die Systeme eigentlich zur Grundlastdeckung in Mehrfamilienhäuser. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten sollten die Klein-KWK-Aggregate eine möglichst hohe jährliche Betriebsstundenzahl, d. h. in der Regel 4000 bis 5000 h/a gefahren werden um indirekt auch einen hohen Jahresnutzungsgrad zu erreichen. Für die Auslastung der Anlage ist der Wärmebedarf des Gebäudes entscheidend, weil zuviel produzierter Strom ins öffentliche Leitungsnetz eingespeist werden kann.

Als Standardlösung für die Verbrennung von Heizöl und anderen flüssigen Brennstoffen wird in der Regel ein Viertakt-Dieselmotor verwendet. Die Klein-KWK-Aggregate mit Dieselmotor erreichen zwar bei gleichem Gesamtwirkungsgrad einen den Gasmotor-Klein-KWK-Aggregaten gegenüber höheren elektrischen Wirkungsgrad, wirken sich aber aufgrund der höheren Schadstoffemissionen nachteilig aus. Um die für Magermotoren geltenden Grenzwerte einhalten zu können, müssten die Dieselmotoren mit zusätzlichem Katalysator ausgerüstet werden.

### Systemhersteller für Kleinst-KWK-Aggregate mit gasförmigen Brennstoffen

*SenerTec, Schweinfurt*

Der »Dachs« von SenerTec treibt mittels einem mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Einzylinder-Viertakt-Spezialmotor einen Generator an, der den im Gebäude benötigten Strom erzeugt. Für den Fall, dass dieses Kleinst-KWK mehr Strom erzeugt als verbraucht wird, wird der Strom ins öffentliche Netz eingespeist. Die Wärme aus dem Kühlwasser und aus der Abgasanlage wird über einen Wärmeübertrager der Heizung und Warmwasserbereitung zur Verfügung gestellt. Das Kleinst-BHKW benötigt somit im Vergleich zu einer getrennten Wärme- und Stromerzeugung ca. 30 % weniger Brennstoff und verringert die jährliche CO<sub>2</sub>-Emission um bis zu 10 Tonnen.



**Abb. 3-18:** Dachs HR 5.3  
(Quelle: SenerTec Kraft-  
Wärme-Energiesysteme  
GmbH, Schweinfurt)



Das Kleinst-KWK-Aggregat als Standardmodul hat je nach Brennstoffart einen Leistungsbereich von 10,4 bis 20 kW<sub>th</sub> und 5,3 bis 5,5 kW<sub>el</sub>. Im bivalenten Betrieb deckt das Standardgerät die Wärmegrundlast ab, d. h. für die Spitzenlast muss ein zusätzlicher Wärmeerzeuger zugeschaltet werden. Für die Anwendungsfälle innerhalb eines Ein- bis Dreifamilienhauses in konventioneller Bauart ist das Standard Kleinst-KWK-Aggregat zur kompletten Energieversorgung ausreichend. Im monovalenten Betrieb, d. h. ohne einen zusätzlichen Wärmeerzeuger, deckt dieses Standardmodul den gesamten Wärme- und Brauchwarmwasserbedarf. Die überschüssige Wärme wird hierbei in einem Pufferspeicher zwischengespeichert. Eine besondere Abgasanlage wird nicht benötigt. Das Kleinst-KWK-Aggregat kann in der Regel entweder allein oder zusammen mit anderen Gas- oder Öl-Wärmeerzeugern angeschlossen werden. Zur Versorgung mit höherem Leistungsbedarf können bis zu sechs Module zusammen geschaltet werden.

#### *Honda*

Der 4-Takt-Gasmotor hat eine elektrische Leistung von 1,0 kW und eine thermische Leistung von max. 2,8 kW. Je nach Bedarf kann ein Spitzenlast-Wärmeerzeuger separat eingebunden werden. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei H<sub>i</sub> ca. 22,5 % und der Gesamtwirkungsgrad bei H<sub>i</sub> ca. 85,5 %.

#### *Vaillant (Tochter PowerPlus Technologies, Gera)*

Ein besonderer Vorteil dieses Kleinst-KWK-Aggregats liegt in der leistungsmodulierenden Betriebsweise. Das bedeutet, dass die erzeugte Menge an Strom und Wärme je nach Anforderungsprofil stromgeführt zwischen 1,3 bis 4,7 kW<sub>el</sub> oder wärmegeführt von 4,0 bis 12 kW<sub>th</sub> variabel, d. h. modulierend (je nach Luftdichte und Gasqualität), geregelt werden kann. Das Gerät kann die Drehzahl des kleinen Erdgasmotors stufenlos anpassen und damit in jeder Nutzungssituation mit optimalem Wirkungsgrad laufen. Aus diesem Grund lässt sich das relativ kleine und kompakte Gerät äußerst wirtschaftlich in einem größeren Ein- oder Zweifamilienhaus oder in kleinere und mittlere Gewerbebetriebe einsetzen.

Vaillant hat das modulierende Ecopower-Klein-KWK-Aggregat zwischenzeitlich hinsichtlich der Startelektronik, des Gasmotors und dessen Aufhängung überarbeitet und als neueste Innovation auch eine Insellösung (ecoisland) eingeführt. Diese Innovation wurde als Notstrombetrieb oder zusammen mit einem separaten Wechselrichter und einem Batteriesatz zur Stromspeicherung, als reine Insellösung für Erdgas oder Flüssiggas konzipiert. Dieses kleine, kompakte, wandhängend ausgeführte Gerät mit dem gasbefeuelten Stirlingmotor enthält einen integrierten Zusatzwärmeerzeuger. Der Gesamtwirkungsgrad liegt konstant über 90 %.

Für den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern ist das Kleinst-KWK-Aggregat »Ecopower e3.0« entwickelt worden, das mit Erd- oder Flüssiggas (Propan) betrieben wird. Das neue Kleinst-KWK-Aggregat kann eine elektrische Leistung von 1,3 bis 3 kW ins Netz speisen und gleichzeitig 4 bis 8 kW Wärme erzeugen. Bei einer Modulhöhe von ca. 1,00 m beträgt die Aufstellfläche 74 x 137 cm. In zwei Metern Abstand vom Kleinst-KWK-Aggregat beträgt der Schalldruck 56 dB(A).



*Viessmann-Werke, Allendorf*

Viessmann entwickelt derzeit ein 1 kW-Stirlingsystem mit extrem flüchtigem Arbeitsgas Helium, das auf dem Motor der englischen Firma Microgen Energy aufbaut. Microgen Energy ist eine hundertprozentige Tochter der British Gas, des größten Gasversorgers Großbritanniens. Die thermische Leistung des Stirlingmotors wird ca. 6 kW betragen. Zur Abdeckung der Spitzenlast beinhaltet das Viessmann Kleinst-KWK-System einen integrierten Spitzenlastbrenner mit 18 kW Nennwärmeleistung.

*Lion®Powerblock von Otag, Olsberg*

Seit Dezember 2006 produziert Otag, Olsberg den mit Erdgas betriebenen Lion®Powerblock, der mit einer Freikolben-Expansionsmaschine ausgerüstet ist. Bei 350 °C wird Prozessdampf erzeugt, der über den Doppelkolben den integrierten Lineargenerator antreibt und damit zwischen 0,3 und 2 kW elektrischen Strom erzeugt. Über einen Plattenwärmeübertrager wird die Wärme an den Heizkreislauf abgeführt und so eine thermische Leistung von 3 bis 16 kW erzielen. Je nach Bedarf kann ein Spitzenlast-Wärmeerzeuger separat eingebunden werden. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei  $H_2$  ca. 10 bis 12 % und der Gesamtwirkungsgrad bei  $H_2$  ca. 94 bis 98 %. Die elektrische Leistung soll durch höhere Temperaturen im Dampfprozess noch auf 3 kW gesteigert werden.

### **Kleinst-KWK-Aggregate für flüssige Brennstoffe (Benzin, Diesel, Biodiesel, Pflanzenöl)**

Kleinst-KWK-Aggregate können mit verschiedenen fossilen und erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden (Bio-, Erd- und Flüssiggas oder Biodiesel, Heiz-, Pflanzen- und Rapsöl). Der überwiegende Anteil der bereits installierten Kleinst-KWK-Module wird jedoch mit Erdgas betrieben. In den Fällen, wenn z. B. örtlich kein Erdgasanschluss vorhanden ist, kann der Betrieb auch mit Biodiesel oder Heizöl erfolgen.

Für die autarke Strom- und Wärmeversorgung von abseits gelegenen Gebäuden ohne Netzanschluss (alpine Schutzhütten, etc.) werden vorzugsweise Kleinst-KWK-Aggregate im Inselbetrieb mit Pflanzen-, Rapsöl oder mit Flüssiggas eingesetzt, die mit einem oder mehreren bidirektionalen Wechselrichtern kombiniert werden.

*Pflanzenöl*

Für die energetische Nutzung in Dieselmotoren werden bevorzugt Pflanzenöle verwendet, da diese frei von Schwefel, biologisch vollständig abbaubar und mittlerweile auch konkurrenzfähig zu Benzin und Diesel sind.

Reines Pflanzenöl (Sonnenblumenöl, Sojaöl, Winterraps, etc.) gehört zu den ältesten aus Biomasse gewonnenen Treibstoffen. In der Regel wird das naturbelassene Pflanzenöl aus Winterraps gewonnen und mit Zusatzstoffen (Altöl aus der Nahrungsmittelindustrie) gestreckt. Das Pflanzenöl unterscheidet sich hierbei wesentlich von den anderen Treibstoffen, insbesondere hinsichtlich der Viskosität, Zündfähigkeit und Dichte.

In den Fällen, in denen reines Pflanzenöl nicht mittels Methanol oder Benzin verdünnt wird, kann ein Kolbenmotor aus dem Standardsortiment auch kein BHKW antreiben. Hier wird der Einsatz eines Spezialmotors (Elsbethmotor) unverzichtbar.

### *Rapsöl-Methylester (RME) bzw. Biodiesel*

Seit Jahren etabliert sich Rapsölmethylester (RME) mit der Handelsbezeichnung »Biodiesel«. Biodiesel entsteht durch Veresterung von Rapsöl. Bei der »Umesterung« werden zum Rapsöl ca. 10% Methylalkohol hinzu gegeben. Die Normung und Qualitätssicherung trugen dazu bei, die Einsatzmöglichkeiten schrittweise zu verbessern und die Probleme zu beseitigen. Die chemische Struktur von Biodiesel begünstigt eine vergleichsweise schadstoffarme Verbrennung und vermindert damit die Emission von Schadstoffpartikeln.

Bei der Pflanzenöllagerung sollte beachtet wird, dass es weder direkter Sonneneinstrahlung noch Frostgraden ausgesetzt werden darf. Reines Pflanzenöl wird ohne Dieselbeimischung bei ca. 0 °C fest und somit auch nicht mehr pumpfähig. Zudem sollte der Raum gasdicht ausgeführt sein, d.h. Lichteinfall, Sauerstoff- und Wasserzutritt muss vermieden werden, weil die Vorgänge der Fettoxidation bei Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) nicht vorhersehbar sind.

Die besonderen Vorteile liegen innerhalb der physikalischen/chemischen Besonderheiten. Bei einer hohen Energiedichte von Pflanzenöl droht aufgrund der geringen Abdampfrate weder bei Transport noch bei der Lagerung eine Explosionsgefahr. Die Wassergefährdungsklasse ist gleich Null.

### **Systemhersteller für Kleinst-KWK-Aggregate mit flüssigen Brennstoffen:**

#### *SenerTec, Schweinfurt*

Die neue Dachs-Variante der SenerTec GmbH offeriert sich als weltweit erstes rapsölbetriebenes Kleinst-KWK-Modul und wird in Serienfertigung hergestellt. Die Anlage setzt aufgrund des ökologischen Brennstoffs nur so viel Kohlendioxid frei, wie die Rapspflanze während ihres Wachstums aufgenommen hat. Beim »Dachs RS« handelt es sich um die neue rapsölbetriebene Dachs-Variante zur Vollversorgung mit Wärme, Strom und Warmwasser. Dachs-Betreiber, die aus Rapsöl Strom produzieren, erhalten nach dem EEG rund 19 Cent für jede Kilowattstunde, die sie ins öffentliche Netz einspeisen.

Hinweis: Ein Gebäude mit Mindestdämmstandard, das mit dem rapsölbetriebenen Mini-BHKW Dachs RS beheizt wird, erreicht im neuen Gebäudeenergieausweis die höchste Effizienzklasse A.

### **3.4.2.3 Stirlingmotorische Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung**

Der Schotte Robert Stirling konstruierte bereits 1816 das patentierte Prinzip des Heißluftmotors »Heat Economiser«, d. h. den heutigen »Stirlingmotor«. Der Stirlingmotor gilt aus dem Grund als ideale Technologie für den Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungsaggregaten, weil u. a. der Brennstoff im Gegensatz zu den konventionellen Motoren in einer externen Brennkammer verbrannt wird und der Motor auch nicht von einem spezifischen Brennstoff abhängig ist. In einem Stirlingmotor findet im Gegensatz zu den konventionellen Otto- und Dieselmotoren keine Verbrennung statt. Aufgrund der Wärmezufuhr von außen können auch alternative Brennstoffe eingesetzt werden.

Das Stirlingprinzip gilt mit seinen ökologischen Vorteilen als innovative technische Wärmekraftmaschine. Aufgrund der Verbrennung in einer externen Brennkammer können die Wärme und der elektrische Strom aus beliebigen Energiequellen, z. B. Erd- oder Biogas, aber

auch aus fester Biomasse (Holzpellets, etc.) gewonnen werden. Der Stirlingmotor ist zudem nicht von einer gleichbleibenden Brennstoffqualität abhängig. Die Schadstoffwerte und Geräuschentwicklung fallen gegenüber den anderen Verbrennungsmaschinen wesentlich günstiger aus. Der Motorinnenraum bleibt zudem frei von Verbrennungsrückständen und braucht daher kaum Wartung. Daraus folgen auch lange, unterbrechungsfreie Laufzeiten.

Der Betrieb einer Stirlingmaschine ergibt nur dann Sinn, wenn die Wärme auch genutzt werden kann. Stirlingaggregate erzeugen elektrische Energie und Wärme dezentral, d. h. dort, wo sie benötigt werden. So entstehen beim Stromtransport keine Übertragungsverluste. Aufgrund der dezentralen und hoch effizienten Parallelerzeugung von Strom und Wärme können die Stirling-KWK-Aggregate einen hohen Gesamtwirkungsgrad von über 90 % erreichen.

Die Stirling-KWK-Technologiesysteme, bestehend aus Stirlingmotor, Brenner, Gebläse, Wärmezelle und Gasarmatur, arbeiten besonders umweltschonend, da die bei der Stromerzeugung frei werdende Wärme nahezu vollständig als Raumwärme und zur Warmwasserbereitung genutzt werden kann.

Aus diesem Grund wäre es je nach Bautyp und Wärmebedarf sinnvoll, die Stirlingmaschine auf die Grundlast auszulegen und die Spitzenlast mit einem Zusatzbrenner abzufahren. Aufgrund dieser Einsatzvariante kommt das Aggregat auch bei gut gedämmten Gebäuden sowie im Sommer bei hohem Komfort der Warmwassernutzung auf die erforderliche Anzahl an Volllast-Betriebsstunden. Über die Regelung wird die Wärmeproduktion so verteilt, dass der Zusatzbrenner nur in Betrieb geht, wenn eine erhöhte Wärmeanforderung bei niedrigen Außenlufttemperaturen angefordert wird. Dieser Prozess kann durch eine entsprechend gesteuerte Speicherladung unterstützt werden. Im Winterbetrieb läuft der Stirlingmotor in der Regel mit der Maximalleistung.

Derzeit wirkt sich allerdings noch der geringe elektrische Wirkungsgrad (10 bis 15 %) nachteilig aus. Aufgrund des geringen Umwandlungsverlusts beträgt der Gesamtwirkungsgrad 95 bis 96 %.

Der Stirlingmotor enthält nur wenige bewegliche Teile, keine Ventile und arbeitet ohne Druckstöße. Da keine Verschmutzungen durch Brennstoffrückstände auftreten, ist der Stirlingmotor auch sehr wartungsarm und deshalb auch betreiberfreundlich.

### *Konstruktionsaufbau*

Die Leistungsabgabe des Stirlingmotors wird über die Arbeitsgasmenge geregelt, d. h., je nach Last wird das Arbeitsgas abgelassen bzw. eingespeist. Die doppelwirkenden Kolben haben im Fall des Stirlingmotors folgende Aufgabe:

- Der Expansionsraum, in dem die Arbeit geleistet wird, befindet sich auf der Kolbenoberseite. Der Kompressionsraum, in dem ein Teil der Arbeit bei der Verdichtung aufgezehrt wird, auf der Kolbenunterseite.
- Bei laufendem Motor wird nun das Arbeitsgas von der Unterseite des ersten Zylinders auf die Oberseite des zweiten Zylinders geschoben. Dazwischen durchströmt es den Regenerator, worin es vorgewärmt wird, und den Brenner, der zusätzlich Wärmeenergie zuführt.
- Das Arbeitsgas durchströmt nach der Expansion oberhalb der Kolben den Kühler und Regenerator und gibt hierbei die verbliebene Wärmeenergie ab. Die Arbeitsweise der

beiden Zylinder ist völlig gleich, allerdings phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung wird dadurch erreicht, dass die Kröpfungen der Kurbelwelle um  $90^\circ$  versetzt sind. Der konstruktive Aufbau des Stirlingmotors besteht aus zwei Zylindern in V-Einheit angeordnet. Oberhalb der Zylinder ist der Lufterwärmer mit Luftvorwärmung und Regenerator zwischengeschaltet. Im Bodenbereich befindet sich die Kurbelwelle mit Pleuelstange und Kreuzköpfen. Gekoppelt sind die beiden Kolben über ein Getriebe. An das Getriebe ist ein Generator angeflanscht, der die erzeugte mechanische Energie in Strom umwandelt.

- Ein in den Zylindern befindliches Arbeitsgas (Luft, Stickstoff oder Helium) wird abwechselnd aufgeheizt und abgekühlt, indem es ständig zwischen einem heißen und einem kalten Zylinder hin und her geschoben wird. Die Temperaturänderungen im Arbeitsgas erzeugen hierbei Druckschwankungen, die über die Kolben an der Welle als mechanische Arbeit abgeführt werden. Diese mechanische Arbeit kann mit einem Generator in Strom umgewandelt werden. Gleichzeitig entsteht im Kühlwasser des Stirlingmotors Wärme.

Bei einer anderen Konstruktionsvariante wird das Arbeitsmedium (Wasserstoff, Helium, Stickstoff) oder bei den sogenannten Heißluftmotoren die Luft, durch einen Kolben komprimiert und beim durchströmen eines Wärmeübertragers von den heißen Abgasen eines Brenners zusätzlich erhitzt, wodurch es zu einer weiteren Druck- und Temperaturerhöhung kommt, und anschließend in einem Arbeitszylinder entspannt. Hierbei wird mechanische Arbeit geleistet. Die in dem Arbeitsmedium verbliebene Wärmeenergie wird in einem Wärmeübertrager entzogen. Anschließend gelangt das wieder abgekühlte Gas in den Kompressionsraum zurück.

Für den Stirlingmotor sind die zwei doppelwirkenden Kolben charakteristisch, die in der Regel in V-förmig angeordneten Zylindern laufen. Zwischen den Zylindern ist der Regenerator angeordnet, der die Aufgabe hat, dem hinströmenden Gas möglichst viel Wärme zu entziehen und aufzuspeichern, um sie an das rückströmende Gas wieder abzugeben. Damit möglichst wenig Wärme ungenutzt von der warmen zur kalten Seite gelangt, sollte der Regenerator konstruktiv eine große Wärmekapazität haben, einen schnellen Wärmeaustausch bei geringen Strömungsverlusten ermöglichen und ein geringes Wärmeleitvermögen aufweisen.

Bei der Stirling-Kleinst-KWK sind außerdem zwischen den Zylindern der Kühler und der Erwärmer angeordnet. Der Kühler hat die Funktion, das Volumen des Arbeitsgases vor der Verdichtung zu verringern, während der Erwärmer beim Überströmen des verdichteten Arbeitsgases in Aktion tritt und somit die Druckerhöhung bewirkt. Die Arbeitsweise mit doppelwirkenden Kolben weist hierbei Parallelen zum Zweitaktmotor auf, dessen Funktionsprinzip jedoch nach dem Verfahren der inneren Verbrennung verläuft. In dem geschlossenen Arbeitsraum wird das Arbeitsgas zyklisch mit dem »Verdränger« von der Erwärmerseite zur Kühlerseite bewegt. Die von der Kühlerseite abgeführte Energie dient zur Erwärmung des Heizwassers. Während der Erwärmung expandiert das Arbeitsgas, das sich anschließend bei der Abkühlung wieder zusammenzieht. Es entsteht eine Druckdifferenz, die auf den Arbeitskolben wirkt, der damit auf und ab bewegt wird. Die Temperaturänderungen im Arbeitsgas erzeugen Druckschwankungen, die über die Kolben an der Welle als mechanische Arbeit abgeführt werden, die wiederum mithilfe eines Generators in Strom verwandelt wird.

### Freikolben-Stirlingmotor (engl. Free Piston Stirling Engine – FPSE)

Der Freikolben-Stirlingmotor ist eine neue Erfindung, die das bewährte Stirlingprinzip mit einem modernen Lineargenerator kombiniert. Das Ergebnis ist eine Maschine, die aus Wärme, aus einer externen Quelle wie einem Gasbrenner, Elektrizität erzeugt. Die Maschine unterscheidet sich durch einen wartungsfreien Betrieb. Freikolben-Stirlingmotoren weisen dadurch eine große Zuverlässigkeit auf, dass die beweglichen Teile, wie die Kolben des Stirlingmotors und der Anker des Lineargenerators, mittels radial sehr starrer Federn von den stationären Teilen getrennt werden. Bewegliche und stationäre Teile berühren einander nicht, was Verschleiß vermeidet.

### Systemhersteller für Kleinst-KWK-Aggregate mit Freikolben-Stirlingmotor

#### *Microgen*

Der Freikolben-Stirlingmotor hat eine elektrische Leistung von 1,1 kW und eine thermische Leistung von max. 5,5 kW. Ein Spitzenlast-Wärmeerzeuger mit 4 bis 20 kW ist im Gerät integriert. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei  $H_i$  ca. 18 % und der Gesamtwirkungsgrad bei  $H_i$  ca. 92 %.

#### *Bosch-Thermotechnik (BBT)*

Der Freikolben-Stirlingmotor hat eine elektrische Leistung von 0,5 bis 1,0 kW und eine thermische Leistung von max. 8 kW. Je nach Bedarf kann ein Spitzenlastwärmeerzeuger optional eingebunden werden. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei  $H_i$  zwischen 12 und 15 % und der Gesamtwirkungsgrad bei  $H_i$  über 100 %.

#### *Enatec-Technologie*

Für die erfolgreiche Kombination des Freikolben-Stirlingmotors mit regulärer Brennwerttechnologie hat Enatec eine Anzahl ergänzender Komponenten und Systeme entwickelt.

Der Anschluss des Stirlinggenerators an das öffentliche Netz erfolgt über eine Gridbox. Diese Gridbox sorgt für die Synchronisation und den Anschluss an das Netz sowie für die gesetzlich vorgeschriebene Sicherung des Systems. Enatec verfügt ferner über einen speziell auf den Stirlingbetrieb abgestimmten Gasbrenner. Externe Verbrennung ist einer der Aspekte, durch die die Stirlingtechnologie sich von Diesel- und Ottomotoren, bei denen die Verbrennung im Motor selbst erfolgt, unterscheidet. Der große Vorteil externer Verbrennung ist die außerordentlich gute Überwachung des Verbrennungsprozesses, wodurch die Schadstoffemission auf ein Mindestmaß beschränkt wird. Zudem verfügt Enatec über die Kenntnisse für die erfolgreiche Integration des Stirlinggenerators und des Wärmeerzeugers.

Die Kleinst-KWK-Aggregate werden einen Stirlingbrenner enthalten, der zwischen 4 und 9 kW modulierbar ist. Die Wärme des Stirlingbrenners wird teilweise an den Stirlinggenerator und teilweise an das Wasser des Zentralheizungssystems abgegeben. Auch wird in den meisten Fällen ein Spitzenlastbrenner installiert sein, der zugeschaltet wird, wenn der Wärmebedarf größer ist als die Leistung des Stirlingbrenners. Die Leistung dieses Brenners wird vom Wärmeerzeugerhersteller bestimmt und wird voraussichtlich zwischen 6 und 24 kW liegen.

### *Stirling Systems AG/Awtec AG, Schaffhausen (CH)*

Die Stirling Energy Module (SEM) sind als innovative Systemlösung zur rationellen Umwandlung von Brennstoffen (Heizöl, Erdgas) in Strom- und Wärme in Mehrfamilienhäusern geeignet.

Das Funktionsprinzip basiert auf einen Freikolben-Stirlingmotor (Heißgaskolbenmotor), bei dem das erwärmte Medium (in der Regel Helium) zwei Kolben phasenversetzt bewegt. Die zyklische Erwärmung bzw. Abkühlung wird in mechanische Arbeit und diese in der Folge in Strom umgewandelt. Der Prototyp besteht aus den vier Hauptkomponenten des Stirlingmotors, Heizöl (oder Erdgas-)Brenner, der Steuerung und den Peripheriegeräten. Der Prototyp wird derzeit von der Stirling Systems AG, Schaffhausen, weiterentwickelt, wobei als Zielvorgabe der Einsatz des Gerätes zur dezentralen Energieversorgung als einfache Integration in Einfamilienhäusern angestrebt wird.

Der 1-Zylinder Freikolben-Stirling hat eine elektrische Leistung von 1,1 kW und eine thermische Leistung von max. 4,3 kW. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei ca. 21,5 % und der Gesamtwirkungsgrad bei ca. 91 %.

### *Sunpower-Stirling*

Bei der Sunpower-Stirling Konstruktion handelt es sich um eine Freikolben-Stirlingmaschine vom  $\beta$ -Typ, die als ein langlebiges und wartungsarmes Produkt zur Stromerzeugung und zur Erzeugung von Kälte und Druck dient. Die Maschine nutzt eine kontaktlose Gaslagerung der Kolben, wobei der linear bewegte Kolben durch das Arbeitsgas bewegt wird. Der Arbeitskolben der Maschine ist direkt mit einer Dauermagnetanordnung verbunden, deren Spulenanordnung im Zylinder im Lineargenerator ebenfalls berührungslos bewegt wird.

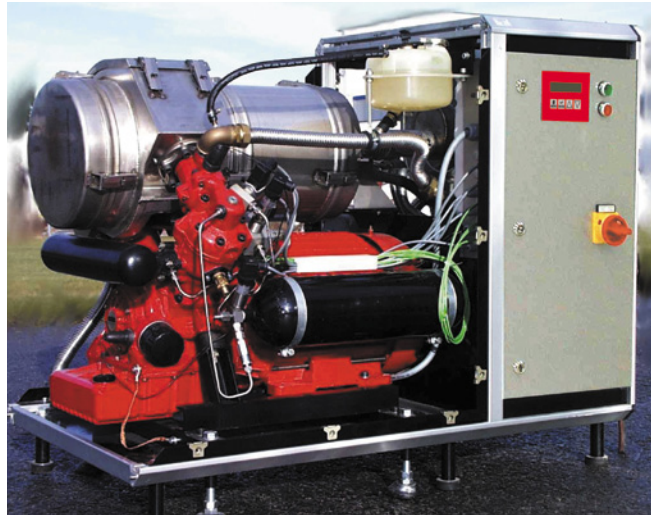
## **Stirling-Systemhersteller für KWK-Aggregate mit gasförmigen Brennstoffen**

### *SenerTec, Schweinfurt*

Der Produkthersteller SenerTec führt im Herbst 2011 aufgrund der Kooperation von 27-04-2011 mit der E.ON Ruhrgas AG den neuen »Dachs Stirling SE« ein. Diese Kleinst-KWK-Anlage mit einer Leistung von  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $6,1 \text{ kW}_{\text{th}}$  wurde insbesondere für die Versorgung neuer und sanierter Ein- und Zweifamilienhäuser konzipiert. Mit dem »Dachs Stirling SE« wird der Wärmebedarf gedeckt und bis zu 70 % des erforderlichen Strombedarfs erzeugt. Innerhalb der Kleinst-KWK-Anlage wurde zur Absicherung der Spitzenlasten ein zusätzlicher 18kW-Brenner sowie ein Pufferspeicher integriert.

### *Solo Stirling GmbH, Sindelfingen*

Der erdgasbefeuerte Solo Stirling V161 mit Leistungen von  $9 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $24 \text{ kW}_{\text{th}}$  wurde bereits 2004 in einer Kleinserie (ca. 150 Maschinen mit einem Hubraum von  $160 \text{ cm}^3$ ) produziert und installiert. Das Klein-KWK-Modul »Solo V 161 Modul«, arbeitet mit dem Arbeitsgas Helium (max. 150 bar) und wird im Leistungsbereich 8 bis  $22 \text{ kW}_{\text{th}}$  und 2,0 bis  $7,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  hergestellt.



**Abb. 3-19:** Solo V161 Modul  
(Quelle: Solo Stirling GmbH,  
Sindelfingen)

### *WhisperTech Stirling*

Die vier Zylinder des Stirlingmotors übertragen ihre Kraft auf eine kreisrunde Scheibe (WobbleYoke). Zudem wird ein speziell von WhisperTech entwickeltes WobbleYoke-Getriebe eingesetzt, das die Linearbewegung der vier Kolben in eine Rotationsbewegung übersetzt. D. h. aufgrund einer Phasenverschiebung von je 90 Grad zwischen den einzelnen Zylindern, wird die axiale Zylinderkraft in eine radiale Bewegung und mittels Generator in Elektrizität umgewandelt.

Als Brennstoff wird Erdgas verwendet, als Arbeitsmittel dient Stickstoff.

Das derzeitige Wechselstrom-Kleinst-KWK-Aggregat für Netzparallelbetrieb hat eine elektrische Leistung von 1,2 kW und eine thermische Leistung von max. 8 kW. Die neuesten Whisper-Gen verfügen über einen integrierten Zusatzbrenner, sodass die thermische Leistung von 7 auf 12 kW erweitert wird. Das Gerät ist insbesondere für Einfamilienhäuser geeignet und lässt sich als Ersatz eines kompletten Wärmeerzeugers in z. B. bequem innerhalb einer Küchenzeile integrieren. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt bei  $H_2$  ca. 10 % und der Gesamtwirkungsgrad bei  $H_2$  ca. 90 %.

Für die Praxis soll das Whisper-Gen allerdings nur 80 % des Wärmebedarfs decken. Damit es nicht zum häufigen Takten des Whisper-Gen kommt, sollte zusätzlich hydraulisch ein Pufferspeicher mit mindestens 600 Litern Inhalt integriert werden. Mit dem 1,2 kW-Gerät gelingt es in Einfamilienhäusern, 70 bis 80 % des Stromverbrauchs selbst zu erzeugen.

### *Enatec-Technologie*

Für die erfolgreiche Kombination des Freikolben-Stirlingmotors mit regulärer Brennwerttechnologie hat Enatec eine Anzahl ergänzender Komponenten und Systeme entwickelt.

Der Anschluss des Stirlinggenerators an das öffentliche Netz erfolgt über eine Gridbox. Diese Gridbox sorgt für die Synchronisation und den Anschluss an das Netz sowie für die gesetzlich vorgeschriebene Sicherung des Systems. Enatec verfügt ferner über einen speziell auf den Stirlingbetrieb abgestimmten Gasbrenner. Externe Verbrennung ist einer der Aspekte, durch die die Stirlingtechnologie sich von Diesel- und Ottomotoren, bei denen die



Verbrennung im Motor selbst erfolgt, unterscheidet. Der große Vorteil externer Verbrennung ist die außerordentlich gute Überwachung des Verbrennungsprozesses, wodurch die Schadstoffemission auf ein Mindestmaß beschränkt wird. Zudem verfügt Enatec über die Kenntnisse für die erfolgreiche Integration des Stirlinggenerators und des Wärmeerzeugers.

Die Kleinst-KWK-Aggregate werden einen Stirlingbrenner enthalten, der zwischen 4 und 9 kW modulierbar ist. Die Wärme des Stirlingbrenners wird teilweise an den Stirlinggenerator und teilweise an das Wasser des Zentralheizungssystems abgegeben. Auch wird in den meisten Fällen ein Spitzenlastbrenner installiert sein, der zugeschaltet wird, wenn der Wärmebedarf größer ist als die Leistung des Stirlingbrenners. Die Leistung dieses Brenners wird vom Wärmeerzeugerhersteller bestimmt und wird voraussichtlich zwischen 6 und 24 kW liegen.

### **Stirling-Systemhersteller für KWK-Aggregate mit flüssigen Brennstoffen (Benzin, Diesel, Pflanzenöl)**

*Enerlyt GmbH, Potsdam*

Die mit Rapsöl betriebene Stirlingmaschine ist für den Einsatz in Kleinst-KWK-Aggregaten in Einfamilienwohnhäusern konzipiert. Der  $\alpha$ -Stirlingmotor 2ZM arbeitet mit zwei Ericsson-Zyklen (doppelwirksame Kolben), die mit 180° Phasenverschiebung laufen. Aufgrund der Besonderheit der zwei Stirling-Zyklen wird bei der Maschine eine hohe Energiedichte und Regelbarkeit erreicht. Die Realisierung von Ericsson-Prozessen anstelle von Stirling-Prozessen wird durch die Vergrößerung beider Expansionsvolumina gegenüber den Kompressionshubvolumina erreicht. Als Arbeitsgas kommt Stickstoff mit 25 bar zum Einsatz. Das Aggregat ist für den Netzparallelbetrieb geeignet und soll später auch für monovalenten und Inselbetrieb ausgelegt werden. Der doppelwirkende Heißgasmotor vom Alpha-Typ hat gegenüber der Beta- und Gamma-Bauart sowie den einfach wirkenden Alpha-Maschinen ein geringeres Leistungsgewicht sowie etwas höhere Wirkungsgrade.

Bei dem neu entwickelten 4-Zylinder-Heißgasmotor von Enerlyt handelt es sich um eine doppelt wirkende Alpha-Maschine, die die systemeigenen Vorteile nutzt. Die Stirlingmaschine wurde unter Verwendung von zwei Doppelkolbeneinheiten zu einer besonderen Anordnung und Verknüpfung der vier variablen Arbeitsgasräume konzipiert. Damit dieser Heißgasmotor bei allen vier Zyklen kontinuierlich Energie an die Kurbelwelle übertragen kann, laufen die Zustandsänderungen der Arbeitszyklen nacheinander um 90°-Phasen versetzt. Daraus folgt, dass die Expansion des jeweilig nächsten Zyklus um  $\frac{1}{4}$  Umdrehung nach der Expansion des vorangegangenen Zyklus erfolgt. Dieses hat auch zur Folge, dass die Volumenänderung jedes Expansionsraumes der Volumenänderung seines Kompressionsraumes um 90° vorauselt.

Aufgrund dieser beiden Randbedingungen sind die Motorzylinder mit den dazwischen angeordneten Wärmeübertragern hydraulisch verknüpft. Bei diesem neu entwickelten Heißgasmotor wird die Annäherung an einen Ericsson-Prozess mit der Vergrößerung des Expansionszylinders gegenüber dem Kompressionszylinder erreicht. Ausgehend von den idealisierten Zustandsänderungen wird das Arbeitsintegral des Stirling-Prozesses durch zwei Isotherme und zwei Isochore gebildet. Demgegenüber wird das Arbeitsintegral beim Ericsson-Prozess durch zwei Isotherme und zwei Isobare gebildet.



Der 4-Zylinder-Ericsson-Motor lässt sich mit Erdgas (Biogas) und dem Arbeitsgas Stickstoff insbesondere in Klein-KWK-Aggregate für Einfamilienhäuser einsetzen. Die thermische Leistung beträgt 3,5 kW und die elektrische Leistung 1,0 kW. Die Brennstoffgesamtleistung beträgt 5,0 kW. Entsprechend den Herstellerangaben erreicht das KWK-Modul einen Gesamtwirkungsgrad von 91 %, der elektrische Wirkungsgrad beträgt 18 %.

### **Stirling-KWK mit fester Biomasse (Stückholz/Holzpellets)**

Neben den Stirling-KWK-Aggregaten mit gasförmigen und flüssigen Brennstoffen wurden bereits auch Stirlingmotoren für festen Biobrennstoffen entwickelt, die einen Teil der Verbrennungswärme in elektrische Energie umwandeln und aufgrund der Effizienz und CO<sub>2</sub>-Neutralität gegenüber den konventionellen Systemen eindeutige Vorteile zu verzeichnen haben. So hat der Stirlingmotor gegenüber den Kleinst-KWK-Aggregaten mit Verbrennungsmotor den Vorteil, dass er kein Getriebe und keine wartungsintensiven Zündkerzen, Ventile, Steuerkette oder Ölbad enthält. Insofern bleibt der Motorinnenraum auch von Rückständen frei.

Aufgrund der dezentralen und hoch effizienten Parallelherzeugung von Strom und Wärme können die Stirling-KWK-Aggregate einen hohen Gesamtwirkungsgrad von über 90 % erreichen. Die Stirling-KWK-Technologiesysteme, bestehend aus Stirlingmotor, Brenner, Gebläse, Wärmeeinheit und Gasarmatur, arbeiten besonders umweltschonend, da die bei der Stromerzeugung frei werdende Wärme nahezu vollständig als Raumwärme und zur Warmwasserbereitung genutzt werden kann.

Aus diesem Grund wäre es je nach Bautyp und Wärmebedarf sinnvoll, die Stirlingmaschine auf die Grundlast auszulegen und die Spitzenlast mit einem Zusatzbrenner abzufahren. Aufgrund dieser Einsatzvariante kommt das Aggregat auch bei gut gedämmten Gebäuden sowie auch im Sommer bei hohem Komfort der Warmwassernutzung auf die erforderliche Anzahl an Vollastbetriebsstunden.

Im Bereich der ökologischen und ökonomischen Energieanwendung und der europäischen Ziele soll in den kommenden Jahren u. a. eine drastische Erhöhung des Anteils der Biomasse in der Kraft- und Wärmeversorgung angestrebt werden. Bisher war eine Stromerzeugung aus Wärme im Leistungsbereich unter 50 kW auf Basis einer Verfeuerung von fester Biomasse nahezu unmöglich. Die horizontale Verbrennung und das Funktionsprinzip eines Pellets-wärmeerzeugers stellen sich hierbei als ideale Konfiguration dar. Das entscheidende Plus der Pellets-wärmeerzeuger gegenüber den Stückholzwärmeerzeugern liegt in der längeren Laufzeit. Der Einsatz eines Kleinst-KWK-Aggregats ist in den Anwendungsfällen vorteilhaft, in denen die elektrische und thermische Nutzenergie möglichst zeitgleich und über mindestens 4500 Betriebsstunden im Jahr zur Versorgung benötigt werden.

Der Generator erzeugt eine Wechselspannung mit variabler Frequenz, die über eine Leistungselektronik zuerst gleich geregelt und dann auf eine netzkonforme 50 Hz Wechsel-frequenz umgeformt wird. Die Einsatzbereiche in den Leistungsbereichen von elektrischer Leistung von 5 bis 10 kW und thermischer Leistung von 10 bis 20 kW sind für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Gewerbebetriebe, Restaurationen, etc. angedacht.

Die Kleinst-KWK-Anlage mit einer elektrischen Leistung von ca. 1 kW haben dagegen insbesondere im Modernisierungsmarkt gute Marktchancen. Bei einer richtigen Dimensionierung und hydraulischen Einbindung in das vorhandene Heizungssystem sind im Vergleich

zur Brennwerttechnologie Primärenergieeinsparungen zwischen 10 bis 25 % realistisch. An den Tagen mit niedrigsten Außentemperaturen sollten zwischen 30 bis 40 % des Wärmebedarfs durch das Kleinst-KWK-Aggregat bereitgestellt werden. Zudem ist hier die Einbindung eines Pufferspeichers sinnvoll.

### Produkthersteller und Entwicklungsstand

#### *Sunmachine (Holzpellets-KWK)*

Die Verstromung aus Biomasse wird in der Regel mit der Bereitstellung der Wärme kombiniert. Hierbei handelt es sich um Kleinst-KWK-Geräte zum Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern, die gleichzeitig neben Wärme auch Strom erzeugen. Das Kleinst-KWK-Aggregate der Sunmachine hat mit einer kombinierten Pelletsheizung und mit in einem Stirlingmotor erzeugten Strom eine Nennleistung von 1,5 bis 3 kW<sub>el</sub> und von 4,5 bis 10,5 kW<sub>th</sub>. Der elektrische Wirkungsgrad wird vom Produkthersteller mit über 20 % und höher angegeben. Neben der Pelletsausführung, bei der ein Sturzbrenner einen Zylinder des Stirlings erhitzt, werden auch die Gasvarianten (Biogas, Erdgas und Flüssiggas) produziert.

Als neue Entwicklung befindet sich das Kleinst-KWK-Aggregat auf der Basis des Stirlingmotors mit der Antriebsenergie biogener Kraftstoffe wie Hackschnitzel, Pellets und Pflan-



**Abb. 3-20:** Sunmachine-Pellets-KWK  
(Quelle: Sunmachine, Nürnberg/Kempton)

zenöl aber auch Stück- und Schichtholz in der Vorserienfertigung. Seit Herbst 2006 läuft der erste mit Holzpellets betriebene Stirlingmotor vom Entwickler Sunmachine, Nürnberg und Kempten, der sich besonders bei der Verstromung mit einer Leistung von  $3\text{ kW}_{\text{el}}$  hervor getan hat.

### *Funktionsprinzip*

Die Holzpellets werden automatisch über eine Förderschnecke vom 80 Liter fassenden Vorratsbehälter auf den Heizrost transportiert und elektrisch auf ca.  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  vorgewärmt. Im Anschluss daran, werden die Holzpellets in einem Upside-down-Brenner vollständig in Holzgas umgewandelt. Indem das Holzgas über eine Unterdrucksteuerung nach unten gesaugt, entflammt und bei einer Temperatur von ca.  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  verbrannt wird, trifft die Flamme auf den Erhitzerkopf der Stirlingmaschine (Einzylindermotor mit  $520\text{ cm}^3$ ), in dem das Arbeitsgas (Stickstoff) integriert ist. Das Arbeitsgas dehnt sich aus und lässt nach dem Startimpuls den Stirlingmotor anlaufen. Sobald sich der Stirlingmotor dreht, wird über den integrierten Generator der einspeisefähige Strom produziert. Die relativ hohe Brenntemperatur bewirkt eine effiziente Brennstoffausnutzung. Als Endprodukte bleiben von den Holzpellets Mineralien und Spurenelemente zurück, die jedoch mit dem Abgas entweichen.

Der Vorteil des Sunmachine-Aggregats besteht in einer nach außen hin druckdichten Ausführung mit Anordnung des Generators innerhalb des Druckbereichs. Der Außenläufer des Synchrongenerators dient gleichzeitig als Schwungrad beim Anlassen. Nach Herstellerangaben weist der bei einem Arbeitsdruck von 33 bar betriebene Stirlingmotor bei einem thermischen Wirkungsgrad von 65 bis 70 % einen elektrischen Wirkungsgrad (aus elektrischer Arbeit/zugeführter Brennstoffwärmeleistung) von 20 bis 25 % auf. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage liegt bei ca. 90 %. Entscheidend sind auch die hydraulische Einbindung auf der Wärmeabnehmerseite und das Regelsystem. Die Wärmeabnehmerseite sollte mit einer maximalen Vorlauftemperatur von  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefahren werden. Um einen effizienten Brennwertbetrieb realisieren zu können, sollte die Rücklauftemperatur mit ca.  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ausgegelt werden. Der Produkthersteller Sunmachine GmbH hat zwischenzeitlich die Produktion der Pellets-KWK eingestellt. Derzeit vertreibt ein österreichisches Unternehmen ([www.sunmachine.at](http://www.sunmachine.at)) die Pellets-KWK-Aggregate.

### *Stirling Power Module Energieumwandlungs-GmbH, Graz*

Die Stirling Power Module Energieumwandlungs GmbH in der Oststeiermark, hat einen pelletsbefeuerten Vierzylinderstirling mit  $15\text{ kW}_{\text{th}}$  und  $1\text{ kW}_{\text{el}}$  entwickelt; alternativ ist eine Hackschnitzelvariante vorgesehen.

### *Objektbeispiel: Biomasse-Stirling-KWK im Forsthaus in Sulzbach (Saarland)*

Bereits Ende März 2007 wurde in Sulzbach (Saarland) ein Kleinst-KWK-Aggregat auf der Basis eines »AgroLyth«-Stückholzwärmeerzeugers mit einer Heizleistung von 25 kW von Hoval-Vaduz (Lichtenstein) mit Stirlingmotor als Generatorantrieb in Betrieb genommen. Der Stückholzwärmeerzeuger liefert einen kleinen Wärmeanteil, den der Stirlingmotor zur Stromerzeugung umwandelt.

### *Funktionsprinzip*

Das Stirling-KWK-Aggregat, eine Kombination aus Stückholzwärmeerzeuger/Stirlingmotor, arbeitet im dreistufigen Verbrennungsverfahren mit hoher Energieeffizienz. Als Arbeitsgas



**Abb. 3-21:** Vierzylinder-Pellets-Stirling  
(Quelle: KWB-Stranzel & Ptak  
OEG, Graz)

wurde »Stickstoff« eingesetzt. Der Wärmeerzeuger verfeuert Stückholz bis 15 cm Durchmesser und 0,5 m Länge sowie Grobhackgut oder Holzbriketts. In der Startphase wird das Stückholz getrocknet und erhitzt, wobei hier Holzgas entsteht, das zusammen mit der vorgewärmten Sekundärluft in die Brennkammer gelangt. Die Verbrennung findet vor dem Wärmeübertragerkopf der Stirlingmaschine statt, wobei die Sekundärluft zur Erreichung eines vollständigen Ausbrandes mittels einer Lambdasondenregelung im richtigen Verhältnis dosiert wird. Die Wärmeerzeugersteuerung und die Tatsache, dass der Generator auch als Anlasser funktioniert, lässt die Aufschaltung des Stirlingmotors auf das Netz in Abhängigkeit von der Erhitzertemperatur zu.

Es besteht somit die Möglichkeit mit der Biomasse-Stirling-KWK ein Wohnhaus mit einer Wohnfläche von ca. 150 m<sup>2</sup> mit 3 kW thermisch zu beheizen und gleichzeitig 1 kW-Strom zu erzeugen.

Für den Stückholzwärmeerzeuger wurden neben dem Warmwasserspeicher noch zwei Pufferspeicher mit einem Gesamtvolumen von 1000 Litern aufgestellt, die als Polster den Wärmestoß aus dem vollen Glutbett abfangen, das sich morgens und abends einige Minuten nach der Beschickung des Wärmeerzeugers aufbaut. Nachteilig wirkt es sich aus, dass sich der elektrische Wirkungsgrad mit kleiner werdender Aggregatleistung reduziert, d. h. bei einem Kleinst-KWK-Aggregat mit 1 kW<sub>el</sub> beträgt der Wirkungsgrad nur noch 12 %.

*Objektbeispiel:* Biomasse-Stirling-KWK in der Neubergschule in Neckarsulm.

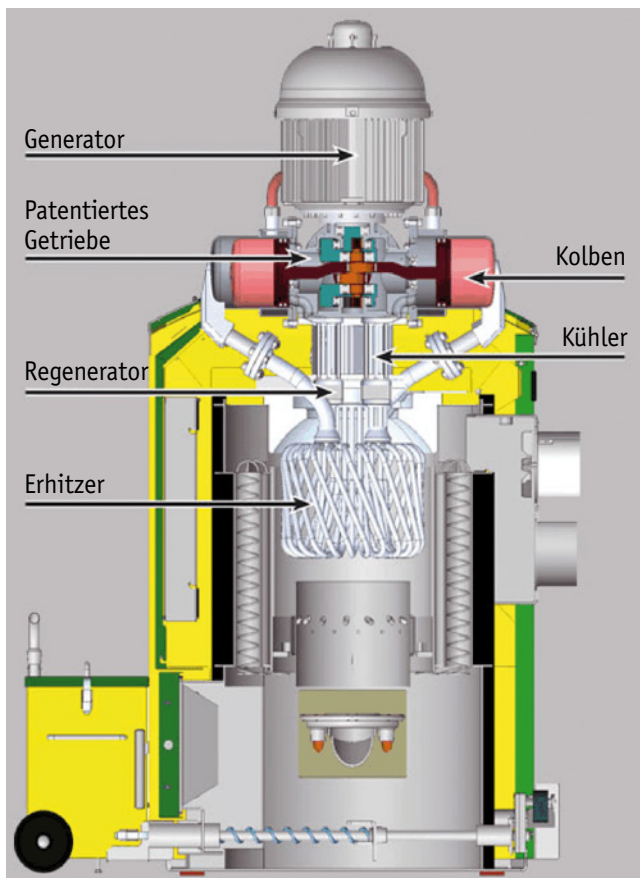
In der Neubergschule in Neckarsulm arbeiten seit Herbst 2007 zwei Pellets-Wärmeerzeuger vom Typ Biolyt mit je 70 kW in Kaskade. Hierbei deckt ein Wärmeerzeuger die Grundlast und der zweite die obere Teil- und Spitzelast ab. Auf dem Grundlast-Wärmeerzeuger wurde ein 3 kW-Stirling-Motor integriert, der aus der Biomasse (Holzpellets) elektrischen Strom produziert.

Der Produkthersteller KWB-Stranzel&Ptak OEG, Graz hat zwischenzeitlich mitgeteilt, dass der pelletbefeuerte Vierzylinder-Stirling ab 2011 nicht mehr weiterentwickelt wird.

Alle drei Produkthersteller (KWB-Graz, Hoval-Vaduz und Sunmachine) haben offenbar die gleichen technischen Probleme: Wirkungsgradreduzierungen aufgrund von Rußablagerungen im Bereich der Wärmeübertragungsflächen und infolgedessen häufige (kurze) Wartungszyklen.

*Mawera (Vierzylinder-Stirlingmotor)*

Das österreichische Unternehmen Mawera (Hard), als Tochter von Viessmann, Allendorf, greift bei seinem Kleinst-KWK-Konzept auf einen Vierzylinder-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von 35 kW zurück, der von Stirling Denmark vertrieben wird. Eine sehr aufwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeit stellte hierbei die Realisierung der effizienten Feuer-



**Abb. 3-22:** Schnittbild:  
Vierzylinder-Pellets-Stirling  
(Quelle: KWB-Stranzel&Ptak  
OEG, Graz)

stätte dar, die von Marewa in Zusammenarbeit mit der Bios Bioenergiesysteme GmbH in Graz konzipiert wurde.

Durch die Realisierung einer Hochtemperaturfeuerung mit 1300 °C konnten die Voraussetzungen für einen elektrischen Wirkungsgrad von ursprünglich 12 % auf jetzt bis zu 18 % erreicht werden. Um bei derart hohen Temperaturen eine Verschlackung des Erhitzerwärmeübertragers des Stirlingmotors zu unterbinden, kommen hier nur Brennstoffe mit hohem Ascheschmelzpunkt und niedrigem Chlorgehalt zum Einsatz. Hierzu zählen insbesondere Hackschnitzel, Pellets und Sägespäne mit einem geringen Rindeanteil. Zudem wurde der Erhitzerwärmeübertrager mit einem automatischen Abreinigungssystem auf Basis eines Druckluftsystems ausgerüstet.

Nach dem Wärmeübertrager des Stirlingmotors weist das Rauchgas noch eine Temperatur von ca. 850 °C auf. Diese Temperatur wird zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt und anschließend über einen Ecomiser geleitet, der die Wärme an das Wasser der bestehenden Heizkreise abgibt. Die Wärmeabfuhr im Kühler-/Wärmeübertrager des Stirlingmotors erfolgt mittels Vorwärmung des Heizungsrücklaufs. Die erreichbare elektrische Leistung ist auch von der Rücklauftemperatur abhängig. Bei 60 °C erreicht der Stirlingmotor seine Nennleistung von 35 kW, wogegen die Leistung bei tieferen Temperaturen noch ansteigt.



**Abb. 3-23:** Vierzylinder-Stirling-KWK 9 kW<sub>el</sub>  
(Quelle: Stirling Denmark ApS)



*Stirling Denmark*

Stirling Denmark, ApS, Lyngby fokussiert seine Entwicklungen ganz auf die Verfeuerung von Biomasse (Holzhackschnitzel) zum Antrieb des Stirlingaggregats.

Der Produkthersteller Stirling Denmark ApS hat zwischenzeitlich die Produktion des Vierzylinder-Stirling-KWK 9kW<sub>el</sub> eingestellt, die allerdings zu einem späteren Zeitpunkt neu aufgelegt werden soll.

Das 35 kW<sub>el</sub>-SD3-Modul als Vierzylinder-Stirling wurde speziell auf die Anwendung mit Biomassebefeuerung optimiert und hat aus diesem Grund große Wärmeübertragungsflächen, ein niedriges Druckverhältnis, ein hermetisch geschlossenes Kurbelwellengehäuse sowie eine geringe Drehzahl.

Bei einem gleichzeitig kostenlosen Brennstoffeinsatz kann hier die Eigenstromerzeugung mit der KWK im Leistungsbereich ab 30 kW umgesetzt werden. Günstige Einspeisevergütungen für Strom, erzeugt aus Biomasse, sowie in den meisten Fällen auch die vermiedenen Entsorgungskosten für Holzreste, Holzabfälle und die Tatsache, dass gegenwärtig keine vergleichbar effizienten Technologien zur Stromerzeugung aus Biomasse im Leistungsbereich unter 100 kW zur Verfügung stehen, machen die Stirlingmaschinen für diesen Anwendungsbereich attraktiv. Mit diesem Biomasse-KWK-Aggregat könnten, z. B. als kommerzielle Lösung im Nahwärmekonzept, ca. 50 Einfamilienhäuser mit Strom und Wärme versorgen.

Das Entwicklungsziel von Stirling Denmark besteht in einer modularen Baureihe, die den Leistungsbereich von 35 bis 500 kW<sub>el</sub> abdecken kann. Derzeit können zwei Module zu einer



**Abb. 3-24:** Vierzylinder-Stirling-KWK 35/70 kW<sub>el</sub>  
(Quelle: Stirling Denmark ApS)

Einheit mit 35/70 kW<sub>el</sub> zusammengeschaltet werden. Das Ziel ist es auch, dass die Stirling-motor-Aggregate sowohl für die Nachrüstung von bestehenden Biomassewärmerezeugern als auch für schlüsselfertige Kraft-Wärme-Kopplungslösungen geeignet sein sollen.

#### 3.4.2.4 Mikrogasturbinen-KWK

Im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung stellt der Einsatz von Mikrogasturbinen eine relativ neue und innovative Technologie dar. Als Mikrogasturbine (MGT) werden kleine, schnelllaufende Gasturbinen mit einer elektrischen Leistung von 30 bis ca. 500 kW definiert. Die Gasturbinen werden auch als »Massenstromsysteme« bezeichnet, weil sie kontinuierlich mehr Luft durchsetzen, als es für eine stöchiometrische Verbrennung erforderlich ist. Ein stöchiometrisches Verhältnis ( $\lambda$ ) von 5 bis 8 ist hier nicht außergewöhnlich. Dies führt zu einem thermodynamischen Prozess mit einer größeren Abhängigkeit von Luftdichte, Temperatur und Luftdruck (je nach Höhenlage des Aufstellungsorts; z. B. Alpine Schutzhütten).

Auf diese Betriebsmerkmale sind die Leistungswerte der Turbineneinheit, des Generators und die damit verbundene Leistungselektronik abgestimmt. Die Bezugsgröße für die Leistungsbewertung und Auslegung von Gasturbinen und Mikrogasturbinen ist aufgrund des hohen Luftbedarfs der Normzustand der Luft nach DIN 4341 (Ansauglufttemperatur 15 °C; Umgebungsdruck 1,013 bar; relative Luftfeuchte 60 %). Die Generatorwicklung und die Leistungselektronik sind technisch aufgrund ihrer Strombelastbarkeit begrenzt, die Nettoleistung der Mikrogasturbine ist auf maximale Leistung ausgelegt. Sinkt das Temperaturniveau der Verbrennungsluft, könnte die Turbine mehr Leistung erzeugen und bessere Wirkungsgrade erreichen. Eine Begrenzung erfolgt jedoch aufgrund der konstruktiven Auslegung der einzelnen Komponenten.

#### Komponenten

Die Hauptkomponenten einer Mikrogasturbine sind:

- der Verbrennungsluftverdichter
- der Rekuperator (integrierter Wärmeübertrager)
- die Brennkammer
- die Arbeitsturbine
- der Generator
- die nachgeschaltete Leistungselektronik (elektronisches Getriebe)
- der Ölkühlkreislauf bzw. die Wasserkühlung (herstellerabhängig).

Im Bereich der energieeffizienten Kraft-Wärme-Kopplung erweist sich der Einsatz von erdgasbetriebenen Mikrogasturbinen (MGT) als vielversprechende Alternative für die dezentrale Energieversorgung. Die bereits installierten Anlagen bestätigen die Zuverlässigkeit dieser Technologie. In der kleineren Leistungsklasse können die Mikrogasturbinen hervorragend für die dezentrale Energieversorgung im Wohnbereich und für Nahwärmenetze sowie für Kleingewerbebetriebe, Supermärkte, Schwimmbäder, etc. verwendet werden. Demgegenüber werden die Gasturbinen für den industriellen Einsatz im Leistungsbereich von 200 bis 500 kW<sub>el</sub> eingesetzt.



Die Hauptkonkurrenten der Mikrogasturbine und die am häufigsten eingesetzten KWK-Systeme basieren auf den Kolbenmotor. Die Stirlingmotoren und Brennstoffzellen befinden sich zum Teil noch in der Testphase bzw. werden als Pototypen eingesetzt. Im Gegensatz zu den Mikrogasturbinen befinden sich diese innovativen KWK-Systeme noch in der Markteinführung und sind in dem Leistungsbereich noch nicht serienreif.

Die Mikrogasturbinen zeichnen sich durch den ökonomischen Vorteil aus, dass sie aufgrund der sehr niedrigen Brennkammertemperaturen äußerst niedrige Stickoxide- $\text{NO}_x$  und Kohlenmonoxid-CO mit  $\text{NO}_x$ - und CO-Werten ( $< 15 \text{ ppm}$ ) erreichen. Zudem werden hier höhere Luftüberschüsse als bei den größeren Gasturbinen und relativ niedrige Brennkammerdrücke eingestellt.

Das Arbeitsmedium Luft wird direkt aus der Umgebung angesaugt und zuerst über den Generator geführt, um diesen zu kühlen. Im Anschluss daran wird die Luft im Verdichter auf ca. 5 bar verdichtet, wobei ein Temperaturanstieg bis über  $200^\circ\text{C}$  erreicht wird. Die weitere Erwärmung bis zum Turbineneintritt erfolgt zum Teil im Rekuperator mithilfe des heißen Turbinenabgases. Die einstufigen Mikrogasturbinen bestehen aus den Einzelkomponenten des radialen Verdichters, der Turbine und des Generators die auf einer Welle angeordnet sind. Aufgrund ihrer einfachen Konstruktion werden die Mikrogasturbinen mit niedrigen Turbineneintrittstemperaturen um ca.  $1000^\circ\text{C}$  betrieben.

Im Vergleich dazu betragen die Turbineneintrittstemperaturen bei den größeren Gasturbinen bis zu  $1450^\circ\text{C}$ . Die niedrigen Eintrittstemperaturen bewirken zwar einen geringeren Turbinenwirkungsgrad, der Nachteil wird jedoch aufgrund eines integrierten Rekuperators ausgeglichen. Der Rekuperator (interner Rauchgaswärmeübertrager) erwärmt mit dem ausströmenden Abgas die verdichtete Luft vor der Brennkammer. Hierdurch wird erreicht, dass die Luft mit einer höheren Temperatur in die Brennkammer eintritt und weniger Wärme durch die Verbrennung zugeführt werden muss. Insofern kann energetisch mit reduziertem Brennstoffeinsatz die gleiche Strommenge erzeugt werden. Um den erforderlichen Gasdruck am Eintritt der Mikrogasturbine sicherzustellen, muss für den Fall, dass örtlich kein Gasanschluss mit einem ausreichenden Gasvordruck von  $> 6 \text{ bar}$  vorhanden ist, ein zusätzlicher Erdgasverdichter investiert werden.

### Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten

Als Alternative zu den Verbrennungsmotoren weist die Mikrogasturbine interessante Eigenschaften und Vorteile auf. Der entscheidende Vorteil der gekoppelten gegenüber der getrennten Strom-Wärmeerzeugung besteht im hohen Gesamtwirkungsgrad und das kein Katalysator zur Abgasreinigung erforderlich ist. Über einen breiten Einsatzbereich kennzeichnen die Mikrogasturbine insbesondere der geringe Wartungsaufwand sowie die geringen Schadstoff- und Schallemissionen.

Da lediglich geringe Verschleißteile vorhanden sind und Schmierstoffe fehlen, erstreckt sich der Wartungsaufwand gegenüber den Kolbenmotor-KWK-Systemen lediglich auf die Inspektion des Gasverdichters sowie die Brennstoff- und Luftfilter. Ein weiterer Vorteil der Mikrogasturbinen zeigt sich in den geringen Schallemissionen. Einerseits liegt der Schallpegel mit  $65 \text{ dB(A)}$  nicht deutlich niedriger als bei den Kolbenmotoren, doch hierbei handelt es sich um einen hochfrequenten Schall, der sich mit einfachen Maßnahmen reduzie-

ren lässt. Weil die Mikrogasturbinen nahezu vibrationsfrei arbeiten, kann auf eine Schwingungskopplung wie bei den Kolbenmotoren komplett verzichtet werden.

### Nachteile der Mikrogasturbinen-KWK-Anlagen

Beim Einsatz von Mikrogasturbinen-KWK-Anlagen müssen die physikalischen Phänomene dieser Maschinen beachtet werden, wobei die von der elektrischen Leistung und damit auch der elektrische Wirkungsgrad von der Umgebungstemperatur beeinflusst werden. Hierbei spielt einerseits die mit höheren Umgebungstemperaturen und geringeren Luftdrücken z. B. in größerer Höhe abnehmende Dichte der angesaugten Luft eine Rolle. Andererseits steigt der Leistungsbedarf für die Verdichtung mit zunehmender Lufteintrittstemperatur merklich an, wodurch eine Minderung der abgegebenen mechanischen Leistung zu verzeichnen ist.

Nach den Gesetzen der Thermodynamik bewirken die niedrigen Brennkammerdrücke und Brennkammertemperaturen beim offenen Joule-Prozess der Mikrogasturbinen eine Reduzierung des Wirkungsgrads. Im Teillastbereich wird diese Reduzierung mithilfe des elektronischen Getriebes geregelt und teilweise ausgeglichen. Bei den größeren konventionellen Mikrogasturbinen mit Leistungen zwischen 200 bis 500 kW<sub>el</sub> erfolgt die Leistungsregelung über die zugeführte Gasmenge, d. h. durch die Verbrennungstemperatur. Bei den Mikrogasturbinen wird die bei Volllast niedrigere Temperatur auch bei Teillast konstant gehalten. Die Regelung erfolgt über die Drehzahl der Welle. Aus diesem Grund weist die Mikrogasturbine im Teillastbereich geringere Wirkungsgradverluste auf. In Verbindung mit einer drehzahlunabhängigen Strominvertierung durch die Leistungselektronik werden neben einem akzeptablen elektrischen Wirkungsgrad mit über 25 % und Gesamtwirkungsgrad von über 70 % auch ausgewogene Teillastwirkungsgrade erreicht, die sich insbesondere für die Anwendung in kleineren Versorgungsobjekten positiv auswirken. Als Nachteil wirkt sich auch der hohe Luftüberschuss im Abgas aus, der für eine effiziente Abwärmenutzung besonders niedrige Rücklauftemperaturen erfordert.

Die Mikrogasturbinen können sowohl im Netzparallel- als auch im Inselbetrieb gefahren werden. Beim Netzparallelbetrieb wird die Energie zum Starten der Mikrogasturbine aus dem Netz bezogen. Im Inselbetrieb muss diese Energie von Akkumulatoren bereitgestellt werden, die auch für den Betrieb des DC/AC-Wandlers benötigt werden. Zum Starten der Mikrogasturbine dient der Generator als Motor, der die Turbine zunächst auf eine bestimmte Startdrehzahl antreibt. Nach einer Warmlaufphase geht der Generator in den Lastbetrieb über. Auf die akzeptablen Modulkosten der Mikrogasturbinen wirkt sich u. a. aus, dass für den Generator und Wechselrichter erst ab einer Leistung von 60 kW<sub>el</sub> eine Flüssigkeitskühlung erforderlich wird. Bei den kleineren Modulen wird die Abwärme ausschließlich über die Abgase abgeführt.

Die Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten für Mikrogasturbinen erstrecken sich über die betrieblichen Anwendungen zur Strom- und Wärme- bis hin zur Dampferzeugung in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Wohnanlagen, Gewerbebetrieben, Einkaufszentren, Hotels, größeren Büros- und Verwaltungsgebäuden, Supermärkten, Schwimmbädern und Sportzentren sowie Industriebetrieben mit entsprechender Energieverbrauchsstruktur.

## Systemhersteller der Mikrogasturbinen KWK-Anlagen

### Capstone-Mikrogasturbine

Die Grundlagen für die Entwicklung von Mikrogasturbinen lieferte die Turboladertechnik, wobei der elektrische Strom über einen schnelllaufenden Generator erzeugt wird, der direkt mit der Turbine gekoppelt ist. Die Drehzahl des Turbosatzes liegt je nach Größe und Leistung zwischen 40.000 und 120.000 Umdrehungen pro Minute. Der so erzeugte hochfrequente Wechselstrom mit teilweise 1000 bis 1600 Hz wird in der Leistungselektronik der Turbine zunächst über Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt und im Anschluss daran in Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz umgewandelt. Die Mikrogasturbine wird mit hohem Verbrennungsluftüberschuss gefahren (z. B.  $\lambda = 6$ ), wobei die über den Turbosatz ausgekoppelte Wärme dem Heizungsnetz zugeführt wird. Ein Mikrogasturbinen-BHKW erreicht Gesamtwirkungsgrade von 85 % (Strom und Wärme) wobei der elektrische Wirkungsgrad zwischen 25 bis 33 % beträgt.

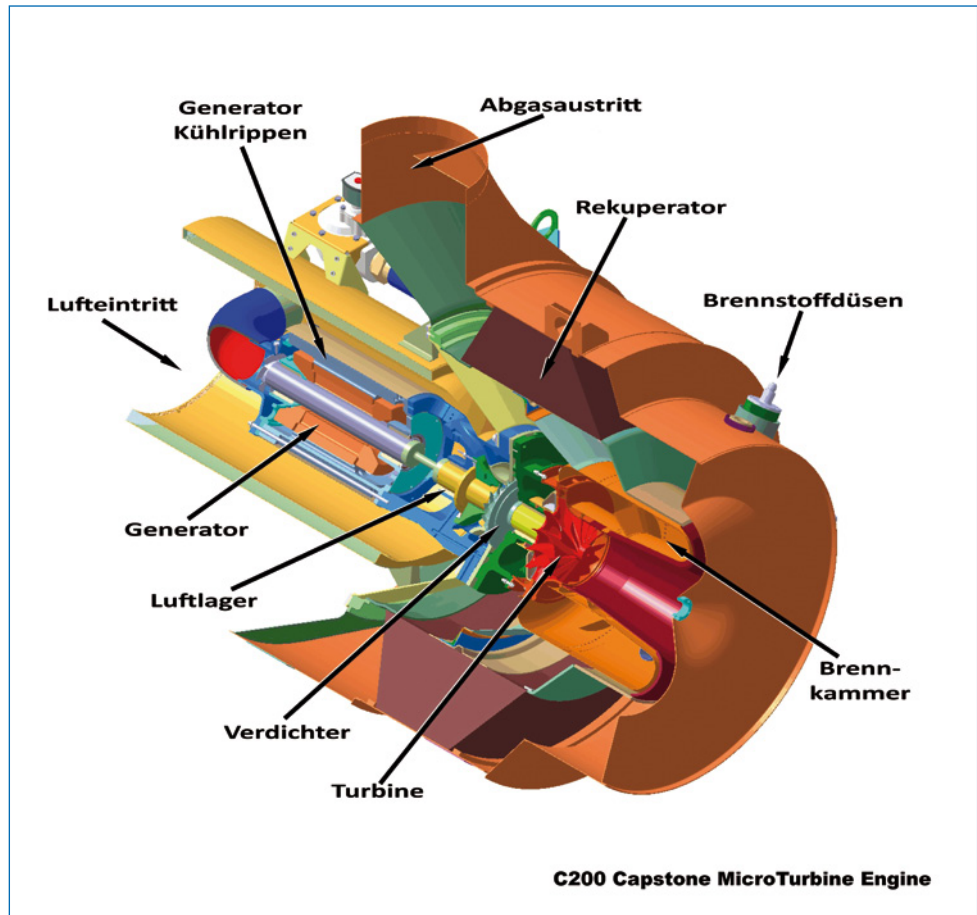


Abb. 3-25: Capstone-Mikrogasturbine (Quelle: E-quad Power Systems GmbH, Herzogenrath)

## Referenzprojekte: Capstone-Mikrogasturbinenanlagen

### *Bayerngas Verwaltungsgebäude*

Im Zuge der Analysen zur Heizwärmeversorgung des Bayerngas-Verwaltungsgebäudes in München wurden unterschiedliche Alternativen, wie der Einsatz von Brennwertwärmeerzeugern oder Brennstoffzellen bewertet, wobei sich unter Abwägung sämtlicher zu berücksichtigender Faktoren zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung die Systementscheidung einer Mikrogasturbine mit einer Generatorleistung von 27 kW realisiert wurde. Ausschlaggebend war hier, dass sich der Einsatz einer Mikrogasturbine unter der Prämisse der Innovation, Schonung der Energieressourcen und Wirtschaftlichkeit optimal vertreten lässt.

Durch den Einsatz einer nachgeschalteten Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 37 kW wird die Abwärme der Mikrogasturbine auch über die Sommermonate sinnvoll genutzt, wobei hier die Grundlastkälte abgedeckt wird. Insofern wird ein Teil des für die vorhandenen Kompressionskältemaschinen eingesetzten Stromes indirekt durch Erdgas substituiert.

Aufgrund der Kombination der Gasturbine und Absorptionskältemaschine werden zudem hohe Turbinenlaufzeiten erreicht.

Bei einer zugeführten Erdgasenergie von durchschnittlich 121 kW im Messzeitraum lag der elektrische Wirkungsgrad am Generatorausgang bei 20,7 %. Im selben Zeitraum wurde über die Ablesung am installierten Wärmezähler eine in den Heizkreis eingekoppelte thermische Leistung von durchschnittlich 75 kW ermittelt. Die Summe aus elektrischer und thermischer Leistung im Verhältnis zur eingespeisten Erdgasenergie ergab einen Nutzungsgrad von 82,7 %. Gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung wurden die CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen um über 40 % reduziert, wobei hier die Übertragungsverluste bei der überregionalen Stromversorgung noch nicht berücksichtigt wurden. Daneben wurden auf die Wärmeerzeugung bezogen 50 % der aus der Altanlage emittierten Stickstoffoxidemissionen reduziert.

### *St. Joseph Krankenhaus Prüm/Eifel*

Als erstes Krankenhaus in Deutschland betreibt das St. Joseph Krankenhaus in Prüm/Eifel seit dem 01. 12. 2006 eine erdgasbetriebene Mikrogasturbinen-KWK-Anlage, die in die zentrale Leittechnik des Krankenhauses eingebunden ist. Die C65-Mikrogasturbine wurde nach 8000 Betriebsstunden zum ersten Mal gewartet.

Das Hauptmerkmal der Mikrogasturbinentechnologie besteht darin, dass sie zum Betrieb keinerlei Schmier- oder Kühlmittel benötigt und sich sämtliche mechanisch beanspruchten Komponenten, d. h. Generatorkern, Verdichter und Turbine auf einer luftgelagerten, ca. 30 cm langen Welle angeordnet sind. Diese Welle dreht sich bei Nennlast mit 96.000 Umdrehungen pro Minute und »schwebt« hierbei in den wartungsfreien Luftlagern. Hieraus resultiert einerseits ein sehr geringer Wartungsaufwand von ca. einer Stunde im Jahr und den daraus resultierenden nur halb so hohen Wartungskosten gegenüber den vergleichbaren Verbrennungsmotoren der BHKW. Aufgrund der nicht benötigten Schmieröle und Wasserzusätze (Glykol) sowie der vergleichsweise geringen Brennkammertemperatur mit hohem Luftüberschuss ( $\lambda$  von 6 bis 8) und den daraus resultierenden geringen thermischen Abgaswerten (z. B. NO<sub>x</sub> < 8 ppm) kann die Mikrogasturbinentechnologie als besonders umweltfreundlich

eingestuft werden. Die Lebensdauer der leistungsmäßig frei modulierbaren Turbine beträgt ca. 80.000 Betriebsstunden bei einer Generalüberholung nach 40.000 Stunden.

Bei der im St. Joseph Krankenhaus installierten Mikrogastrurbine (MGT) handelt es sich um eine thermisch geführte Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit einer thermischen Leistung von 126 kW und einer elektrischen Leistung von 65 kW, die im Krankenhaus zu 100 % selbst verbraucht werden. Damit wird ca. 40 % des thermischen und ca. 30 % des elektrischen Gesamtenergiebedarfs des Krankenhauses gedeckt. Die erzeugten Energiemengen liegen knapp über der benötigten thermischen Grundlast des Krankenhauses, wodurch die Mikrogastrurbine nahezu das ganze Jahr über, d. h. Tag und Nacht im Volllastbetrieb läuft. Die eventuellen täglichen Schwankungen im thermischen Bedarf des Warmwasserkreislaufs werden über einen vorhandenen Pufferspeicher ausgeglichen. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage liegt bei den sämtlich erforderlichen Eigenverbräuchen und Verlusten bei über 83 %. Die Amortisationszeit der Mikrogastrurbinen-KWK-Anlage liegt bei rund vier Jahren.



**Abb. 3-26:** Mikrogastrurbine (MGT) im St. Joseph Krankenhaus Prüm/Eifel (Quelle: E-quad Power Systems GmbH, Herzogenrath)

Die zukünftige Erweiterungsplanung der Anlage umfasst die Installation einer weiteren C65-Mikrogastrurbine mit einer 75 kW-Absorptionskältemaschine oder eines Abhitzeessels zur Dampferzeugung. (Dampferzeugung für Sterilisationszwecke, z. B. Bettensterilisation, etc. sowie Reindampferzeugung für sterile adiabate Luftbefeuchtung der OP-RLT-Geräte).

Das Ziel ist es den elektrischen Strombedarf zu senken, da einerseits keine Kompressionskälte benötigt und andererseits die Laufzeit der Turbinen im Sommer erhöht werden.

Der große Vorteil gegenüber den BHKW-Verbrennungsmotoren besteht in einer solchen Kombination, dass aus der Mikrogastrurbine ein beliebiges Temperaturniveau  $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ausgekoppelt werden kann und somit exakt die benötigte Wasser- oder Dampftemperaturen bereitgestellt werden können.



**Abb. 3-27:** Mikrogasturbine (MGT) im ESWE-Staatstheater, Wiesbaden (Quelle: E-quad Power Systems GmbH, Herzogenrath)

#### *Heizzentrale des ESWE-Staatstheaters, Wiesbaden*

Der hessische Energieversorger ESWE nutzt eine auf 50 kW gedrosselte C60-Mikrogasturbine zur Unterstützung des Nahwärmenetzes des hessischen Staatstheaters, des Kurhauses Wiesbaden und der Areal Bank.

Dieses Turbinenmodell mit einer elektrischen Nennleistung von 60 kW wurde aus wirtschaftlichen Gründen auf eine Nettoleistung von 50 kW gedrosselt. Die Nennwärmeleistung beträgt hierbei 105 kW.

#### **Turbec-Mikrogasturbine**

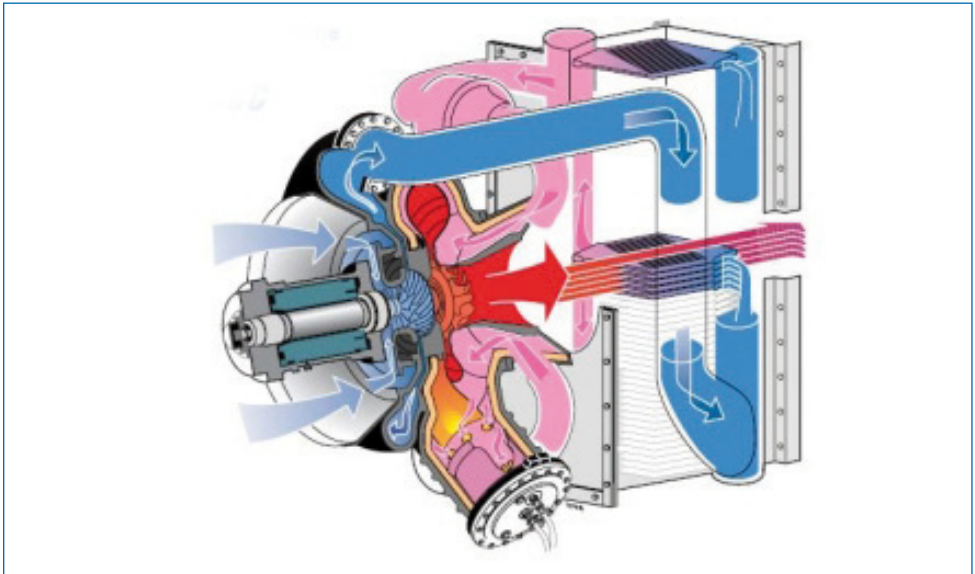
Die Turbec-Mikrogasturbine hat ölgeschmierte Lager, die aus einem Rollen- und Loslager bestehen. Es werden im Gegensatz zur Capstone-MGT keine Luftlager verwendet. Eine Luftlagerung bzw. Magnetlagerung war bei der Turbec-Mikrogasturbine bisher kein Thema, gegenüber den wesentlich kleineren Einheiten von Capston mit 30 und 60 kW.

Wesentliche Änderungen im Aufbau der Anlage sind, dass der Abgaswärmeübertrager aus dem Grundpackage herausgelöst und als Zusatzmodul mitgeliefert werden kann. Umgekehrt wurde der Erdgaskompressor, der bisher separat zu installieren war, mit in das Package integriert.

Mit dem neuen Modell stellt sich das Problem des Ex-Schutzes nicht mehr, weil hier der Erdgaskompressor in das Gehäuse der MGT-Anlage integriert wurde und somit nicht mehr als separate Komponente zu installieren ist. Mit dieser Integration nimmt man sich aber die Chance, aus einer mit höherem Druck betriebenen Leitung das Erdgas gleich unter Druck auch entnehmen zu können, was ja deutlich attraktiver wäre. In diesem Fall wird es sicherlich auch weiterhin eine Variante ohne Erdgaskompressor geben. Die Steigerung beträgt



dann rund 5 kW bei einer elektrischen Nettoleistung und ca. zweieinhalb Prozentpunkte beim Wirkungsgrad.



**Abb. 3-28:** Turbec NTM 100-Mikrogasturbine (Quelle: Turbec)

#### *Objektbeispiel:*

Tagungszentrum Buhlsche Mühle in Ettlingen

Das Mühlengebäude und Gästehaus wurde zum Tagungs- und Kongresszentrum umgebaut. Die Antriebswärme für die thermische Kältemaschine stammt von einer Mikrogasturbine Turbec NTM 100, die das Tagungszentrum mit Wärme und Strom versorgt. Die thermische Kälteerzeugung erfolgt hierbei mit indirekter Rückkühlung der Verflüssigerseite über das Flüsschen Alb. Ab ca. 75 °C Austreibertemperatur liefert die Absorptionskältemaschine Kaltwasser (12,5/7 °C). Die Mikrogasturbine erzeugt bei einer Last von 100% Heizwasser mit ca. 87 °C. Die gewählte Systemfindung der Kombination aus Mikrogasturbine und Absorptionskältemaschine hat sich in der Praxis zwischenzeitlich als optimale Energieeffizienz bestätigt.

#### **Abwärmenutzung zur Kälteerzeugung**

Wenn von der Gebäudeautomation Kälte angefordert wird, erfolgt die Freigabe des Absorbers. Die Maschine kühlt das Kaltwassernetz, solange ein Kältebedarf besteht. Bei zu geringer Kälteabnahme geht der Absorber über seine eigene Steuerung in den Stand-by-Betrieb. Im Kaltwassersystem wurde aus funktionellen und energetischen Gründen ein Kaltwasserpufferspeicher mit 2 m<sup>3</sup> Inhalt zwischengeschaltet.

#### **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) mit Mikrogasturbine**

In Verbindung mit einer Absorptionskälteanlage kann die Mikrogasturbine auch dort eingesetzt werden, wo neben der elektrischen Energie in erster Linie auch Kälte zur Klimati-

sierung benötigt wird. Die Mikrogasturbinen können elektrische Leistungen zwischen 30 und 200 kW sowie Prozesswärme erzeugen und als Wärmequelle für Absorptionskälteanlagen genutzt werden. Aufgrund der gasturbinenspezifischen Abwärmecharakteristik, bei der das gesamte Abwärmepotenzial auf einem hohen Temperaturniveau von rund 400 °C anfällt, eignet sich die Mikrogasturbine vor allem für kleinere Industriebetriebe mit Prozesswärmebedarf sowie als Aggregat zur Klimakälteerzeugung mittels Absorptionskältemaschine. Die Investition und der Betrieb fallen aufgrund der geringen Verschleißteile und langer Wartungsintervalle von 4000 bis 8000 Betriebsstunden wesentlich niedriger aus als z. B. für ein Verbrennungsmotorheizkraftwerk.

Eine weitere Alternative zur Abwärmenutzung ist die Verwendung des Gasturbinenabgases als Verbrennungsluft für die Erdgasverbrennung in Wärmeerzeugeranlagen. Aufgrund der minimierten Abgasverluste lassen sich die Nutzungsgrade bis zu 92 % erhöhen. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads der Systeme bietet sich z. B. mit einem nachgeschalteten ORC-Prozess an. Hier bieten die der Mikrogasturbinen die besten Voraussetzungen. Da ihre Abwärme in nur einem Medium (dem Abgas) gebunden ist und auf einem gut nutzbarem Temperaturniveau liegt.

### **Hybridsystem: Brennstoffzelle und Mikrogasturbine**

Als Kombination der regenerativen und rationellen Energieanwendungen für Büro- und Verwaltungsgebäude, Gewerbebetriebe, etc.

Ein besonders populäres Mikrogasturbinenkonzept ist die Kombination von Mikrogasturbine mit Hochtemperaturbrennstoffzellen, insbesondere mit den Solid Oxide Fuel Cells (SOFC). Hierbei arbeitet die Brennstoffzelle als Brennkammer der Mikrogasturbine. Zum einen weisen diese Brennstoffzellen bei erhöhtem Druck erhöhte Wirkungsgrade auf und zum anderen reduziert sich ihr Wirkungsgrad dadurch, dass das Abgas mit hoher Temperatur die Brennstoffzelle verlässt. Auch der Anteil an brennbaren Gasen im Abgas der Brennstoffzellen reduziert deren Wirkungsgrad. Die Brennstoffzelle wandelt nur zwischen 70 bis 90 % des Brenngases in Strom um, der Rest verlässt die Brennstoffzelle ungenutzt. Erhöht man mit dem ungenutzten Brenngas die Temperatur des Brennstoffzellenabgases, kann die so gewonnene Wärme in die Gasturbine zusätzlich genutzt werden.

Wenn die Abwärme durch die Entspannung in einer Mikrogasturbine reduziert wird, dann wird hierdurch auch nicht mehr Strom erzeugt, sondern zugleich der Eigenbedarf für den Verdichter gedeckt und die Verbrennungsluft vor dem Eintritt in die Brennstoffzelle vorgewärmt. Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems wird durch die Kombination mit Mikrogasturbinen wesentlich erhöht. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellenmodule von Siemens-Westinghouse erhöht sich durch die Mikrogasturbine z.B. beim Betrieb mit Erdgas von 49 auf 57 %.

### **Innovation: Erdgas BHKW mit Entspannungsturbine**

Der Gasverbund Mittelland AG in Oberbuchsitzen (CH) betreibt ihr zweites Erdgas BHKW mit einer Entspannungsturbine. Mit der Entspannungsturbine wird die durch die Druckabsenkung frei werdende Energie zur Stromgewinnung benutzt und daher der Energieverlust verstromt.



Das Erdgas wird über Hochdruckleitungen mit einem Druck von 50 bis 70 bar überregional transportiert und in lokale 4 bis 5 bar-Netze eingespeist. Für den Verbrauch der Endabnehmer, wird der Druck auf 4 bis 5 bar innerhalb der Übergabestationen (Druckreduzier- und Messstationen) abgesenkt, wobei die hierbei frei werdende Energie zur Stromerzeugung genutzt wird.

Im lokalen Verteilnetz wird das Druckniveau in mehreren Stufen weiter abgesenkt.

Bei der konventionellen Drosselung des Erdgasdruckes gelangt die bei der Absenkung frei werdende Energie ungenutzt in die Atmosphäre. Mit der neuen, innovativen, zweistufigen Entspannungsturbine wird die frei werdende Energie zur Stromgewinnung genutzt und somit der Energieverlust verströmt. Das Erdgas wird vor dem Turbineneintritt vorgewärmt, um die Vereisung der Anlagen zu verhindern, die sich bei der physikalisch bedingten Abkühlung des Erdgases im Entspannungsprozess entwickelt. Die Wärmeenergie liefert ein Erdgas-BHKW, das einerseits Strom produziert und andererseits Warmwasser für die Vorwärmung.

Das kompakte Kleinkraftwerk besteht aus einem Erdgas-BHKW und einer zweistufigen Erdgasentspannungsturbine. Die Innovation basiert auf einer neuartigen Bauart der Turbinenräder und dem Rotor mit berührungsloser Magnetlagerung. Gemeinsam liefern die Anlagenteile 711 kW elektrischen Strom, davon das BHKW 311 kW und die Erdgasentspannungsturbinen je 200 kW. Die erzeugte Strommenge reicht zur Deckung des jährlichen Strombedarfs von rund 1200 Vierpersonenhaushalten.

Bei der Erdgasentspannungsanlage in Oberbuchsiten handelt es sich um die zweite Anlage, die in der Schweiz errichtet wurde. Die erste Anlage mit einer elektrischen Leistung von 3000 kW hat GVM vor vier Jahren in Arlesheim errichtet. Die Erdgasentspannungsanlage Oberbuchsiten erzielt im Vergleich zu anderen stromproduzierenden Aggregaten einen elektrischen Spitzenwirkungsgrad von über 85 %. Im Vergleich zum europäischen Strommix erreicht die Erdgasentspannungsanlage eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen von etwa 1800 Tonnen pro Jahr.

### 3.4.2.5 Kleinst-Brennstoffzellen-KWK

Aus historischer Sicht hat bereits 1850 William R. Grove die Brennstoffzelle erfunden. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich um einen hocheffizienten Energiewandler, der chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandelt. Im Unterschied zu anderen Energieerzeugern unterliegt die Brennstoffzelle wegen der direkten, elektrochemischen Umsetzung von Wasserstoff nicht dem Carnot-Prozess, wodurch prinzipiell höhere Wirkungsgrade erreicht werden können.

Im Fokus des öffentlichen Interesses stehen derzeit besonders die Innovationen und Entwicklungstendenzen der Brennstoffzellen und deren Einsatzmöglichkeiten in der Gebäudetechnik. Heute vereint die Brennstoffzellentechnologie die Vorteile der KWK mit niedrigen Schadstoffemissionen. Wenn eine zeitgleiche Nachfrage nach Strom und Wärme besteht, kann durch die KWK der Primärenergiebedarf im Vergleich zur getrennten Erzeugung deutlich verringert werden.

Die Brennstoffzellen wandeln im Gegensatz zur konventionellen Stromerzeugung (Verbrennung, Dampferzeugung, Turbine und Generator) chemisch gebundene Energie direkt in

Strom und Wärme um. Als Brennstoff benötigen sie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid. Da diese Gase als Primärenergieträger nicht vorliegen, müssen sie erzeugt werden. Aus ökonomischer Sicht wird erwartet, dass der Einsatz einer Brennstoffzelle eine im Vergleich zu den derzeit bestehenden Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien höhere Stromkennzahl, einen höheren Teillastwirkungsgrad und eine drastische Senkung der Treibhausgasemissionen erreicht.

Zur serienreifen Markteinführung besteht derzeit allerdings noch ein erheblicher Handlungsbedarf, da konkurrenzfähige Brennstoffzellen in Bezug auf die Materialien und Komponenten noch wesentliche Forschungsleistungen erfordern. Ferner ist aus technologischer Sicht das Gesamtwirkungsgradpotenzial bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Ferner wird die Wirtschaftlichkeit auch durch umfangreiche Faktoren bestimmt wie:

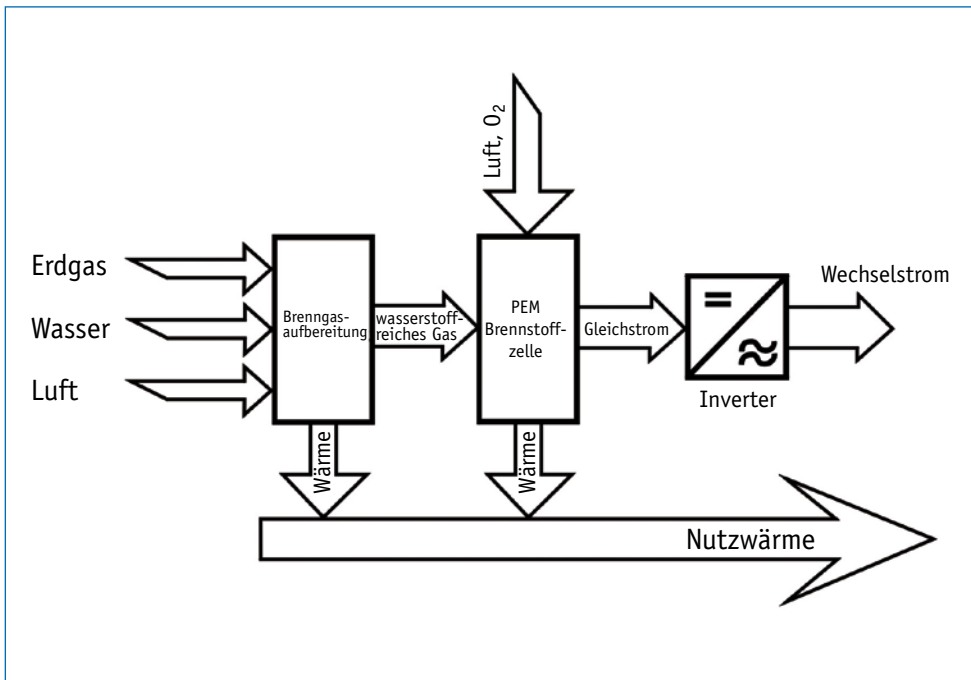
- Gesetzesvorgaben
- Strom- und Gaspreis und Einspeisevergütung
- Investitionskosten
- Betreibermodell
- Lastkurven und Nutzerverhalten
- Betriebsstunden und Lebensdauer
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Amortisation.

Für einen privaten Betreiber würde sich z. B. ein Modell mit nachfolgend aufgeführter Betriebsstrategie am günstigsten erweisen:

- Wärmebezug
- wärmeorientierte modulierte Betriebsweise
- Zusatzheizgerät, das die thermischen Lastspitzen abdeckt sowie
- intelligente Speicherladung während der Spitzenstromerzeugung.

Als optimal zeigt sich der Einsatz von Brennstoffzellen-BHKW, wenn sich ein Verhältnis der Stromerzeugung zum Eigenverbrauch in gleichen Anteilen einstellt, der Strombezug vom Netz nur dann erfolgt, wenn der Eigenverbrauch höher ist als die Stromerzeugung, ein Stromüberschuss in das Netz eingespeist wird und eine Spitzenstromerzeugung erfolgt.

Die Investition eines Kleinst-Brennstoffzellen-BHKW würde sich unter Zugrundelegung der derzeitigen Energiepreise, einer geringen Rückspeisevergütung und einem Serien-Gerätepreis von 1500 €/kW<sub>el</sub> bereits nach ca. sechs Jahren voll amortisieren.



**Abb. 3-29:** Blockschema erdgasbetriebenes Brennstoffzellen-BHKW (Quelle: IB-THEISS, München)

#### Funktionsprinzip:

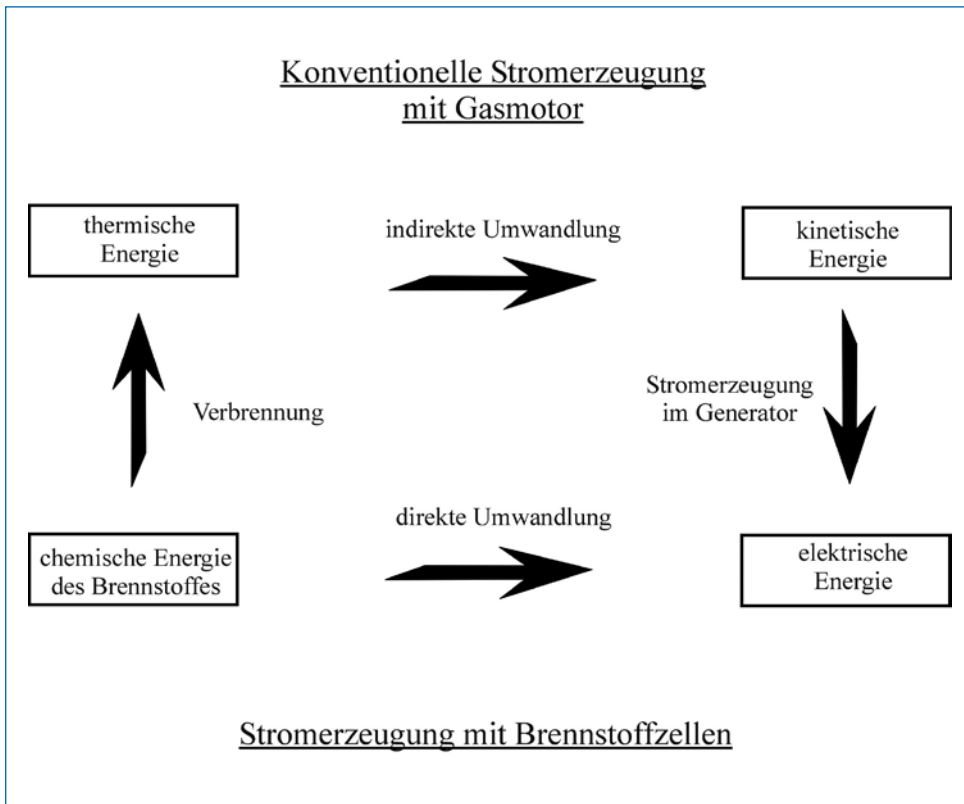
Die Brennstoffzelle ist keine Wärmekraftmaschine und enthält zur Erzeugung von elektrischem Strom daher auch keine rotierenden Teile, sondern besteht aus den drei statischen Elementen:

- Elektrolyte
- Anode oder Brennstoffelektrode
- Kathode oder Lufolektrode.

In einer Brennstoffzelle erfolgt die Umsetzung der Brennstoffenergie Erdgas bzw. Wasserstoff mithilfe eines elektrochemischen Prozesses in Strom und Wärme. Die Energieumwandlungskette stellt eine Abkehr von der klassischen Energieumwandlung dar.

Im Vergleich zur herkömmlichen und komplizierten mit Wirkungsgradverlusten behafteten Stromerzeugung mittels Verbrennung fossiler Brennstoffe, mechanischer Umsetzung (Turbine/Motor) und elektrischer Umwandlung im Generator erfolgt die Energieerzeugung mit der Brennstoffzelle analog zu einer Batterie auf direktem Weg.

Wenn die Brennstoffzellen kontinuierlich mit Wasserstoff ( $H_2$ ) versorgt werden, dann liefert diese auch ständig elektrische Energie. Zur elektrochemischen Reaktion benötigen die Zellen den Sauerstoff ( $O_2$ ), den sie in der Regel der Luft entnehmen.



**Abb. 3-30:** Umwandlungsstufen bei der Stromerzeugung (Quelle: IB-THEISS, München)

#### Konstruktionsaufbau

Das Kernstück der symmetrisch aufgebauten Brennstoffzellen besteht aus einer ca. 0,1 Millimeter dünnen, mit einem Katalysator Platin beschichtete Kunststoffmembran. Die für Protonen (positiv geladene Elementarteilchen) durchlässige Membran, englisch »Proton-Exchange-Membrane« kurz PEM, gibt diesem Brennstoffzellentyp seinen Namen. Die einzelnen Brennstoffzellen werden für die praktische Anwendung in Reihe geschaltet, also in Stapeln (englisch: stacks) zusammengefasst.

#### Klassifizierung

Die Elektroden einer Brennstoffzelle werden durch einen Elektrolyten getrennt, der die elektrisch geladenen Teilchen leitet. Aus dem im Prozess verwendeten Elektrolyten ergibt sich der Typ der jeweiligen Brennstoffzelle:

- AFC: Alkalische Brennstoffzelle (Alkalische Laugen)
- PAFC: Phosphorsäure
- PEMFC: Polymermembranen
- MCFC: Karbonatschmelzen
- SOFC: Oxydkeramiken
- DMFC: Direkt Methanol Fuel Cell; d. h. ein Sondertyp der PEM.

### Einsatzbereiche

In der Praxis haben die bisherigen Testreihen ergeben, dass beim Einsatz von PAFC-Brennstoffzellen die Stacks und beim System der PEMFC-Brennstoffzelle die Membran-Elektroden-einheit noch billiger werden müssen. Ferner treten derzeit noch immer Probleme in der Anlagenperipherie auf, d. h. überwiegend beim Erdgasreformer, weil die Schwefelbestandteile im Erdgas die meisten der im Reformer und in der Brennstoffzelle eingesetzten Katalysatoren sehr schnell und irreversibel vergiften.

Gemessen an der installierten Leistung ist die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) zwar der am weitesten verbreitete Brennstoffzellentyp, zum gegenwärtigen Zeitpunkt befindet sich die phosphorsaure Brennstoffzelle jedoch am Scheideweg. Der Grund liegt darin, dass sowohl auf der Anbieter- als auch auf der Nachfrageseite das Interesse an dieser Technologie zunehmend schwindet. Die Hauptursache hierfür sind die nach wie vor hohen Herstellungskosten sowie die geringe Lebensdauer.

Primärenergieversorgung der Brennstoffzelle:

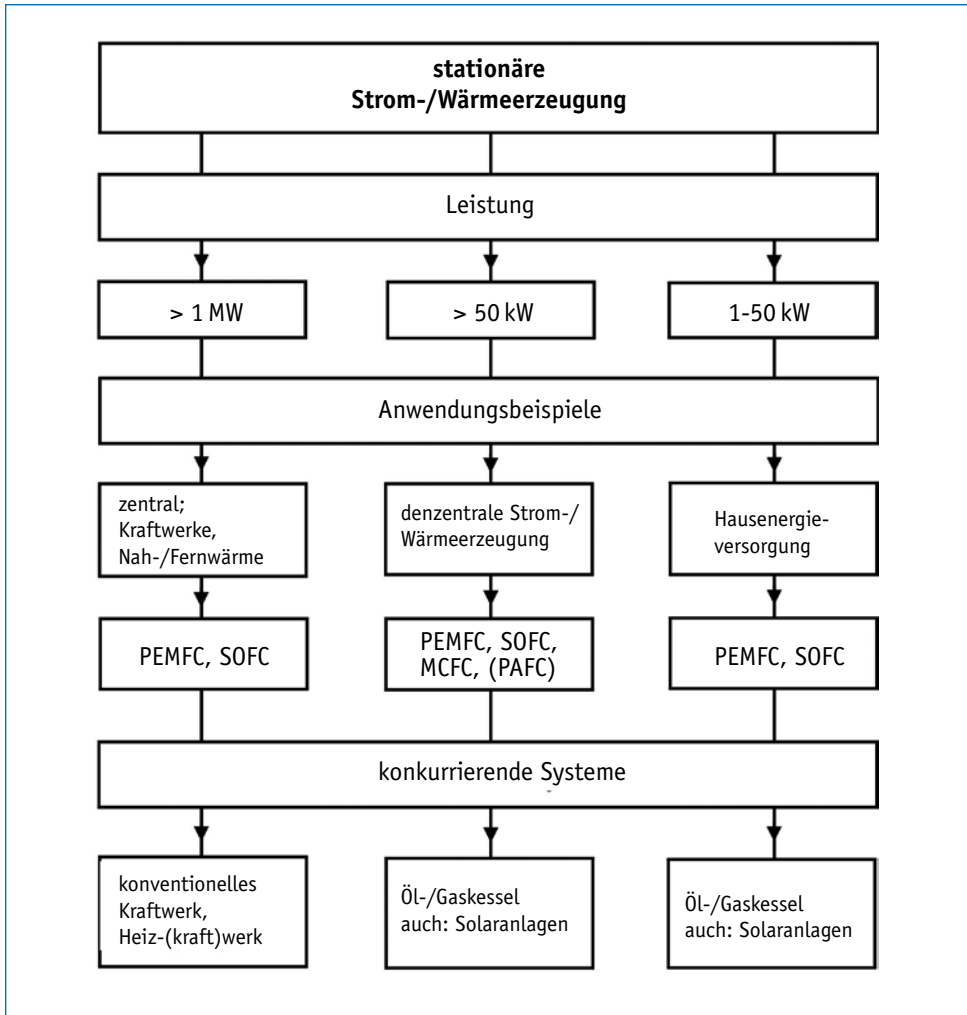
- Erdgas  $\Rightarrow$  Entschwefelung  $\Rightarrow$  Reformer (Spaltung in  $\text{LH}_2$ )
- Wasserstoff ( $\text{LH}_2$ )  $\Rightarrow$  Solarenergie/Stirling  $\Rightarrow$  Wasser-Elektrolyse
- Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )  $\Rightarrow$  Biokraftstoff.

Bei den stationären Brennstoffzellen wird der erforderliche Wasserstoff in der Regel durch die Aufbereitung kohlenwasserstoffreicher Gase (Reformierung) gewonnen. Besonders geeignet ist dafür Erdgas, da es sich leicht reformieren lässt und das gewonnene Reformat einen hohen Wasserstoffanteil hat. Bei der Dampfreformierung handelt es sich somit um ein katalytisches Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas oder anderen kohlenwasserstoffreichen Gasen. Dabei reagiert z. B. ein Methan-Wasser-Gemisch zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Für diese chemische Reaktion muss Wärme von außen zugeführt werden (endotherm). Die Dampfreformierung hat im Vergleich zu anderen Reformierungsverfahren (autotherme Reformation, partielle Oxidation) die höchste Wasserstoffausbeute. Die Gasaufbereitung umfasst im Wesentlichen folgende Komponenten: Entschwefelung, Reformer, Shift-Reaktor und Gasreinigung.

Wasserstoff kommt in der Natur nur in gebundener Form vor. Um ihn z. B. für Brennstoffzellen nutzbar zu machen, muss er in einer Reformierung aus seiner chemischen Verbindung gelöst werden. Erprobte Verfahren dafür sind die Dampfreformierung, die partielle Oxidation und die autotherme Reformierung. Der Reformer gehört zur Peripherie einer Brennstoffzelle. Er bildet das Zentrum der Brenngasaufbereitung. Hier wird mit katalytischen und thermischen Verfahren aus dem eingesetzten Brenngas (z. B. Erdgas) wasserstoffreiches Prozessgas erzeugt.

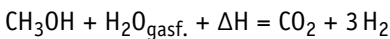
Teil der Peripherie von (Niedertemperatur-) Brennstoffzellen. Er bildet das Zentrum der Brenngasaufbereitung mittels katalytischer und thermischer Verfahren.

Nahezu alle für die Wasserstofferzeugung eingesetzten Energieträger enthalten in gewissen Mengen Schwefel (S). Er ist sehr schädlich für die Katalysatoren der Brennstoffzellen. Deshalb wird dem Reformer eine Entschwefelungsstufe vorgeschaltet, die den Schwefel physikalisch abtrennt. Da bestimmte Zelltypen (primär: PEMFC) ein besonders reines Gas erfordern, muss auch Erdgas entschwefelt werden, das von Natur aus praktisch kaum Schwefel enthält, aber aus Sicherheitsgründen mit schwefelhaltigen Geruchsstoffen versetzt wird.



**Abb. 3-31:** Einsatzbereiche stationärer Brennstoffzellensysteme (Quelle: IB-THEISS, München)

Beispielsweise geschieht die Reformierung bei Verwendung von Methanol als Brennstoff nach der Reaktionsgleichung der thermischen Zersetzung:



mit  $\Delta H_{250^\circ\text{C}}$  = Reaktionswärme für  $250^\circ\text{C}$  ablaufende Reformierung.

Die Elektroden einer Brennstoffzelle werden durch einen Elektrolyten getrennt, der elektrisch geladene Teilchen leitet, aber gasdicht ist. Dadurch verhindert er, dass Wasserstoff und Sauerstoff direkt miteinander in Verbindung kommen und reagieren (sogenannte Knallgasreaktion). Hierbei handelt es sich also um eine kalte Verbrennung. Bei Brennstoffzellen kommen je nach Zellentyp unterschiedliche Elektrolyten zum Einsatz, z. B. alkalische Laugen (AFC), Phosphorsäure (PAFC), Polymermembranen (PEMFC), Karbonatschmelzen (MCFC) oder Oxidkeramiken (SOFC). Die Bezeichnung der verschiedenen Zellentypen leitet sich von den englischen Begriffen für die verwendeten Elektrolyten ab.

Auf jeder Seite der Membran einer PEM-Brennstoffzelle befindet sich eine Gasdiffusions-schicht. Diese hat zum einen die Aufgabe, Wasserstoff und Sauerstoff gleichmäßig an die Folie zu führen, zum anderen führt sie Strom, Wasser und Wärme an die Bipolarplatten ab. Je nach Brennstoffzellentyp kann es erforderlich werden, den Kohlenmonoxidgehalt des Prozessgases nach dem Verlassen des Shiftreaktors durch chemische oder physikalische Trennverfahren weiter zu reduzieren. Die physikalische Gasreinigung erfolgt durch Adsorption oder Membrantrenntechnik. Ein chemisch-katalytisches Verfahren ist die elektive Oxidation (PROX), bei der Kohlenmonoxid unter Zufuhr von Luftsauerstoff zu Kohlendioxid reagiert.

### Die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)

Für eine Integration des Brennstoffzellenmoduls in die Energieversorgungsstruktur von Siedlungen erweisen sich zudem die erforderlichen Heiztemperaturen als problematisch. Da beispielsweise die Nennwärmeleistung bei einer phosphorsauren Brennstoffzelle (PAFC) nur bei einer Rücklaufftemperatur von ca. 40 °C begrenzt ist. Bei einer in der Regel für Fernheiz-zwecke vorgegebenen Rücklaufftemperatur von 50 °C wären hier nur noch ca. 40% der erforderlichen thermischen Leistung in das Heiznetz übertragbar, die restliche Wärme müsste über ein systeminternes Kühlmodul abgeführt werden. Um hier eine mögliche Wärmeauskopplung aus dem Brennstoffzellensystem zu erhöhen, müsste das System z. B. mit einer Absorptionswärmepumpe (AWP) kombiniert werden. Diese Absorptionswärmepumpe würde als thermischer Adapter zwischen der Brennstoffzelleneinheit und dem Heiznetz dienen.

### Die PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Die PEMFC ist eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle mit einer Arbeitstemperatur zwischen 60 und 90 °C. Sie wird mit Luft und Wasserstoff oder mit einem reformierten, wasserstoffreichen Gas (z. B. Erdgas) betrieben. Als Elektrolyt dient eine Polymermembran, die nur Protonen leitet. Sie ist mit edelmetallhaltigen Katalysatoren beschichtet (Platin). Durch seine hohe Leistungsdichte und die vergleichsweise unkomplizierte Arbeitsweise ist dieser Zellentyp sehr vielseitig einsetzbar – für mobile und portable ebenso wie für stationäre Anwendungen (Hausenergieversorgung, Strom und Wärmeerzeugung im mittleren Leistungsbereich). Vor allem in der dezentralen Energieversorgung werden der PEMFC-Brennstoffzelle gute Chancen eingeräumt. Hier laufen bereits erfolgreiche Tests und Feldversuche mit Vorseriengeräten (Brennstoffzellenheizgerät).

### Die Karbonatschmelze-Brennstoffzelle MCFC (Molton Carbonat Fuel Cell)

Mit einer Arbeitstemperatur zwischen 620 und 660 °C ist die MCFC (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle) eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Als Elektrolyten dient eine Mischung aus Kalium und Lithiumkarbonat, deren Schmelztemperatur bei ca. 500 °C liegt. Durch die hohen Betriebstemperaturen ist die MCFC unempfindlich gegen Kohlenmonoxid (CO) und braucht keine Katalysatoren; das Brenngas kann direkt in den Zellen reformiert werden. Ladungsträger in einer MCFC sind Carbonat-Ionen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Deshalb kann dieser Zelltyp nicht mit reinem Wasserstoff betrieben werden. Er eignet sich insbesondere für Brenngase mit höherem Kohlenstoffgehalt.

Die auf hohem Temperaturniveau anfallende Abwärme kann für die Dampferzeugung genutzt werden. Damit bietet sich die MCFC, z. B. für die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung

und die stationäre Energieerzeugung im mittleren und großen Leistungsbereich an. Brennstoffzellen-Nahwärmeschiene für Siedlungen mit zentralem Lastmanagement, wobei der Verbrauch über mehrere Haushalte gemittelt wird. Als Containereinheiten auch zur Nahwärme-Versorgung von zwei oder drei kleineren Gemeinden geeignet. In mehreren Ländern (insbesondere Japan) wird sehr intensiv an der Entwicklung der MCFC gearbeitet; in Deutschland bei der MTU Friedrichshafen GmbH (Hot Module).

### **Die Festoxid-Brennstoffzelle SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)**

Die Festoxid-Brennstoffzelle arbeitet bei Temperaturen von 900 bis 1000 °C (Hochtemperaturbereich). Im Gegensatz zu anderen Brennstoffzellentypen ist die SOFC aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur in der Lage, neben Wasserstoff auch Kohlenmonoxid zu oxidieren. Dies macht sie besonders geeignet für die Verwendung von kohlenstoffhaltigen Brenngasen, wie z. B. Erdgas oder reformiertem Benzin bzw. anderen Kohlenwasserstoffen. Sie hat einen Keramikelektrolyten (überwiegend Zirkonoxid), der Sauerstoffionen leitet. Durch den festen Elektrolyten kann die SOFC fast jede Zellenbauform einnehmen (z. B. Scheiben oder Röhren). Dank der hohen Betriebstemperaturen kann das Brenngas innerhalb der Zelle reformiert werden; an seine Reinheit werden relativ geringe Anforderungen gestellt. Dieser Zellentyp eignet sich für mobile Brennstoffzellen sowie für kleinere und größere Anlagen zur stationären Energieerzeugung (Hausenergieversorgung, Industrie, BHKW, Kraftwerke). Er wird unter anderem in den Brennstoffzellenheizgeräten von Sulzer Hexis verwendet.

### **Vor- und Nachteile der Brennstoffzellen**

#### *Vorteile:*

- hoher Wirkungsgrad bei Voll- und Teillast
- gute Regelbarkeit
- hohe Stromkennzahl und dadurch hoher elektrischer Wirkungsgrad
- gute Leistungsanpassung durch modularen Aufbau
- geringer zu erwartender Wartungsaufwand
- geringere Schadstoff- und Lärmemissionen
- hohes Entwicklungspotenzial.

#### *Nachteile:*

- wenige Betriebserfahrungen
- Wechselrichter ist bei kleinem Gleichstrom (12 V, 24 V) sowie gegen Oberschwingungen störanfällig
- wenig Anbieter
- fehlender Nachweis über hohe Lebensdauer
- Zudem sind hier die drei Komponenten (Brennstoffzelle mit Platinbeschichtung, Reformier und Wechselrichter) noch nicht ausgereift, z. B. CO<sub>2</sub>-empfindliche PEM-Zelle.

Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und ihres schadstoffarmen Betriebes können Brennstoffzellen einen erheblichen Beitrag zu einer umwelt- und ressourcenschonenden Energieversorgung beitragen. Der Einsatz von Brennstoffzellen wird allerdings nur dann eine breite Anwendung finden, wenn es gelingt, die Kosten auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu



senken sowie die Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme in die Größenordnung konventioneller Anlagen weiter zu entwickeln.

Die hohen Energiekosten und strengere Gesetze, wie z.B. der Energieausweis, der seit Januar 2009 auch für Neubauten gilt, lassen den Bedarf nach mehr Effizienz ansteigen. Eine Maßnahme besteht in der Sanierung der Gebäudehülle; eine weitere Möglichkeit sind moderne Wärmeerzeugungssysteme, z. B. Kleinst-Kraft-Wärme-Kopplung für Ein- oder Mehrfamilienhäuser.

In Europa werden zur Energieversorgung von Wohngebäuden zukünftig Brennstoffzellenanlagen mit elektrischen Leistungen von weniger als 10 kW zum Einsatz kommen. Die dezentralen Wärmeerzeugungseinheiten in Gebäuden könnten nach und nach durch diese KWK-Technologie zur dezentralen Elektroenergieerzeugung ersetzt werden, um so einerseits den Elektroenergiebezug von Wohngebäuden zu reduzieren und andererseits die Möglichkeiten einer Rückspeisung in das elektrische Verteilernetz zu nutzen.

### **Brennstoffzellenheizgeräte (BZHG)**

Bei den Brennstoffzellenheizgeräten handelt es sich um Kleinst-KWK-Geräte, die unter Verwendung von Wasserstoff, der aus Erdgas oder Flüssiggas gewonnen wird, auf umweltschonende Art und Weise Privathaushalte dezentral mit Strom und Wärme versorgen. Das BZHG wird an das Erdgasnetz angeschlossen und setzt damit auf einen umweltschonenden Energieträger. Während diese Brenngase bei anderen Brennstoffzellentypen erst in ein wasserstoffreiches Synthesegas reformiert werden müssen, kann z. B. Erdgas direkt in der SOFC intern reformiert werden. In der Brennstoffzelle reagiert der Wasserstoff mit Luftsauerstoff bei einer geräuschlos ablaufenden »kalten Verbrennung« zu reinem Wasser. Dabei erzeugt die Brennstoffzelle Gleichstrom und Wärme. Ein Wechselrichter wandelt den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um. Für dezentrale Hausversorgungsanlagen können Leistungsbereiche  $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$  realisiert werden.

#### *Steuer- und Regeltechnik eines Brennstoffzellensystems*

Der Energiemanager steuert das Zusammenwirken der verschiedenen Systemkomponenten und den bedarfsabhängigen Betrieb. Bei Systemen zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden regelt der Energiemanager auch (bei Bedarfsspitzen) den Strombezug aus dem öffentlichen Netz oder die Wärmeerzeugung mit Zusatzheizgeräten (Brennstoffzellenheizgerät). Beim elektro-chemischen Energiewandler sind 0,7 V pro Zelle in Reihe geschaltet. Stromseitig wird der Einsatz eines Wechselrichters (Inverter DC/AC) und Stromrichters (Stromverstärker) erforderlich. Der Wechselrichter ist Teil der Brennstoffzellenperipherie. Er wandelt die vom Stack gelieferte Gleichspannung in netzkonforme Wechselspannung um.

Die Brennstoffzellenheizgeräte (BZHG) erzeugen direkt beim Verbraucher Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung und arbeiten bei einer Dauerbetriebstemperatur von rund 90 °C. Ein Wechselrichter wandelt den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um. Die freigesetzte Wärme wird an das Kühlsystem des Brennstoffzellenstacks abgegeben und von dort an den Heizkreislauf übertragen. Das in der Brennstoffzelle nicht umgesetzte Prozessgas strömt als Restgas in den Reformerbrenner zurück und verbrennt dort mit der zugeführten Luft. Zudem bildet sich im Stack das Kathodenabgas, das als feuchte Abluft abgeleitet wird. Mit den Brennstoffzellenheizgeräten könnte sich die Gebäudeenergieversorgung grundsätz-

lich verändern. Als kompakte Brennstoffzellen-Außenergiezentralen konzipiert würden die Brennstoffzellen den Grundbedarf an Strom und Wärme in Haushalten, Büros, etc. rationell und emissionsarm decken.

Für die praktische Anwendung werden die einzelnen Brennstoffzellen in Reihe geschaltet, d. h. in Stapeln zusammengefasst. Die Brennstoffzellenstapel für die Heizgeräte liefern je nach Größe zwischen 1 kW und 10 kW elektrische Leistung. In Verbindung mit einem »Nachbrenner« kann die thermische Leistung dem Bedarf angepasst werden. Ein weiterer Vorteil liegt im schnellen An- und Abfahren. Das macht die Brennstoffzellenheizgeräte für die Anwendung in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie in kleineren Gewerbebetrieben interessant.

Einsatzbereiche:

- Einfamilienhaus:  $1,5 \text{ kW}_{\text{th}}$  bis  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$
- Mehrfamilienhaus (6 bis 8 Wohnungseinheiten):  $4,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis  $50 \text{ kW}_{\text{th}}$ .

Mehrere Prototypen der einzelnen Produkthersteller haben zwischenzeitlich zwar ihre Praxis-tauglichkeit bewiesen, es sind aber noch einige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu bewältigen, nicht zuletzt mit dem Ziel, die Kosten auf ein konkurrenzfähiges Niveau von deutlich unter  $1500 \text{ €/kW}_{\text{el}}$  zu senken. Die Prognosen besagen, dass die Brennstoffzellenheizgeräte im kleineren Leistungsbereich die konventionelle Heiztechnik und Stromversorgung nicht völlig verdrängen, aber dennoch ergänzen werden.

Der überwiegende Teil der Produkthersteller setzt beim Konstruktionskonzept der Brennstoffzellenheizgeräte auf die PEM-Technologie. Für die Brennstoffzellenenergiezentrale werden PEM-Brennstoffzellen verwendet, die eine hohe Leistungsdichte und Lebensdauer aufweisen. Die Hausenergiezentrale soll die Grundlasten des Strom- und Wärmebedarfs eines Einfamilienhauses decken. Ziel der Entwicklung ist eine elektrische Leistung von 2 kW und eine Heizleistung von 3,5 kW. Der elektrische Wirkungsgrad soll bei mehr als 32 % liegen, der Gesamtwirkungsgrad bei mindestens 87 %.

Das Entwicklungsziel ist eine Lebensdauer von mehr als 40.000 Stunden. Den Brennstoff bezieht die Hausenergiezentrale aus Erdgas, das in einem eigenen Reformer mithilfe von Dampf zu einem wasserstoffreichen Prozessgas reformiert wird. Die nötige Energie liefert ein Reformerbrenner. Die Wärme des Abgases wird dabei über Wärmeübertrager zur Vorwärmung im Prozess verwendet. Ein zweiter Wärmeübertrager überträgt die anschließend im Heizgas noch vorhandene Restwärme auf den Heizkreislauf. Auf diese Weise können die Energieverluste bei der Reformierung auf ein Minimum reduziert werden.

Ganzzeit-Energiesystem:  $\Rightarrow$  Wärme-/Kraft (Strom)-Kopplung zum Lastausgleich bei Schwach-, Teil- und Spitzenlasten.

Da z. B. im Einfamilienhaus im Winter die Wärmeabnahme (11 kW; im Sommer 4 kW) überwiegt, sollte zur Lastanpassung ein Pufferspeicher eingesetzt werden.

Dagegen werden im Sommer nur 20 bis 30 % der Teillast zur Bereitstellung des Warmwasserbedarfs benötigt. Daraus folgt, dass im Teillastbereich von den  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$  nur  $0,3 \text{ kW}_{\text{el}}$  erzeugt werden. Da die Investition der Brennstoffzelle über 2/3 des Jahres ansteht, kann das Brennstoffzellenheizgerät nur zur Deckung der Spitzenlast genutzt werden. Mittels übergreifendem Lastmanagement wird für ein Einfamilienhaus ein Strombedarf von ca.  $4870 \text{ kWh/anno}$  erforderlich.

Ein Betrieb mit Biogas ist nicht möglich, da für die Brennstoffzelle die Forderung besteht:

- CO<sub>2</sub>-Gehalt max. 10 ppm
- N<sub>2</sub>-Gehalt < 1 ppm.

### Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Um marktgängige und im Betrieb wirtschaftliche und zuverlässige Seriengeräte anbieten zu können, müssen die Brennstoffzellenheizgeräte aufwendige und kostenintensive Erprobungs-, Demonstrations- und Testphasen absolvieren. Unterstützend zu diesen Aktivitäten sollen hier das NIP-Programm und das Callux-Projekt einen Beitrag leisten.

Mit dem NIP-Programm, das seit 2007 über einen Zeitraum von 10 Jahren verlaufende Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie des Deutschen Ministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), soll die Vorbereitung der Markteinführung der erdgasbetriebenen Brennstoffzellenheizgeräte als wichtiger Beitrag zur Reduzierung von Schadstoffemissionen und Schonung der Brennstoffressourcen forciert werden.

Im ersten Abschnitt wurden bis 2010 für die Brennstoffzellenheizgeräte primär eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer, die Reduktion der Systemkomplexität sowie Kostenreduzierung angestrebt. Zudem sollten die Brennstoffzellenheizgeräte einen elektrischen Wirkungsgrad von 30 bis 33 % und einen Gesamtwirkungsgrad zwischen 84 bis 90 % erreichen, wobei eine Zeitstandsfestigkeit der Stacks von mindestens 10.000 Betriebsstunden vorgegeben wurde. Ferner wurden unter praktischen Betriebsbedingungen Technologieevaluationen durchgeführt.

Im zweiten Abschnitt soll zwischen 2011 bis 2015 eine weitere Erhöhung der Wirkungsgrade und Lebensdauer, d. h. Zeitstandsfestigkeit der Stacks von über 25.000 Betriebsstunden, sowie eine Reduzierung der Gesamtkosten erreicht werden.

Zielphase: Beginn der Serienfertigungen ab 2012 mit einem Gerätepreis ab 2020 von ca. 1700 €/kW<sub>el</sub> über dem für einen konventionellen Wärmeerzeuger.

Im Rahmen des NIP-Programms werden parallel auch die industriellen KWK-Anlagen auf Brennstoffzellenbasis im Leistungsbereich von 100 kW<sub>el</sub> bis zum MW-Bereich weiterentwickelt. Hierbei ist beabsichtigt, dass bis zur angestrebten Marktreife, d. h. 2012 bis 2015, auch die Auskopplung von Hochtemperaturwärme zum Antrieb von Absorptionskältemaschinen sowie zur Stromerzeugung über ORC-Prozesse umgesetzt wird.

### Das Callux-Projekt

Beim »Callux«-Projekt handelt es sich um den bundesweit größten Praxistest von Brennstoffzellen-Demonstrationsanlagen für Eigenheime, der gleichzeitig in das Nationale Investitionsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) integriert ist. Das Projekt läuft über sieben Jahre mit über 800 Brennstoffzellenheizgeräten, die in Ein- und Mehrfamilienhäusern installiert und ihre Validierung im praktischen Betrieb getestet werden.

Unternehmen und Forschung fördern seit Ende September 2008 mit dem Leuchtturmprojekt »Callux« eine umfangreiche Erprobung und Demonstration der Brennstoffzellenheizgeräte. Das Kunstwort »Callux« steht für: calor (lat. Wärme) und lux (lat. Licht).

An »Callux« beteiligen sich fünf deutschen Energieversorgungsunternehmen: EWE AG, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, MVV Energie AG, E.ON Ruhrgas AG und VNG Verbundnetz Gas AG sowie das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Stuttgart und die drei Entwickler und Produkthersteller von Brennstoffzellenheizgeräten Baxi Innotech GmbH, Vaillant GmbH und Hexis GmbH. Sie haben sich in Berlin zu einem Konsortium vereinigt, das sich die Markteinführung erdgasbetriebener Brennstoffzellenheizgeräte zur Aufgabe gemacht hat.

### Systementwicklungen

Ein wichtiger Bestandteil einer mit Brennstoffzellen betriebenen Heizungsanlage ist die elektrische Steuerungs- und Regelungstechnik, die nach den unterschiedlichsten Zielvorgaben arbeiten kann: Eine wärmegeführte Regelung orientiert sich am Wärmebedarf des Gebäudes, eine stromgeführte Regelung dagegen am Strombedarf. Zudem kommt noch die netzgeführte Regelung in Frage, bei der ein in der Regel regionaler Versorgungsnetzbetreiber (VNB) die Brennstoffzellenanlage nach bestimmten Anforderungen regeln kann. Das wäre dann sinnvoll, wenn die Anlage in eine übergeordnete elektrische Energieversorgung eingebunden werden soll. Die Möglichkeit einer solchen Konzeption wird derzeit in einem europäischen Projekt mit der Namensgebung »Virtuelles Kraftwerk« (Virtual Fuel Cell Power Plant) erprobt. Hier ergeben sich völlig neue Möglichkeiten zu einer dezentralen Energieversorgung.

### Systemhersteller von Brennstoffzellenheizgeräten

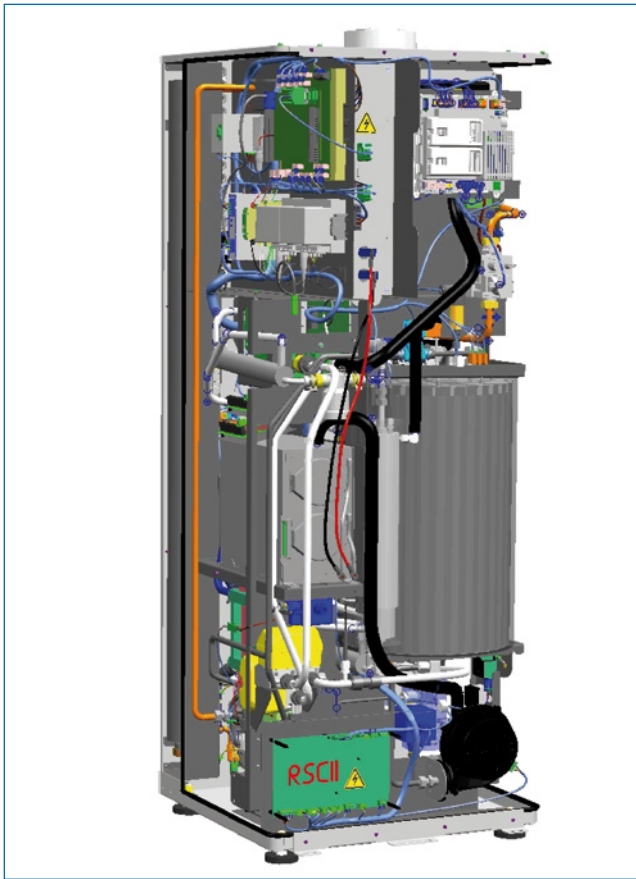
*Baxi Innotech GmbH, Hamburg*

Der Produkthersteller Baxi Innotech, Hamburg (vormals efc-Hamburg) hat seit der ISH-Messe im März 2009 das Brennstoffzellenheizgerät »Gamma 1« als Seriengerät auf der Konzeption des Beta 1,5 Plus mit der Niedertemperatur PEM-Brennstoffzelle (70 °C) vorgestellt:

- Leistungsspektrum: max.  $1,7 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $1,0 \text{ kW}_{\text{el}}$ , als stromgeführte und wärmegedeckte Strategie; zzgl. integriertem Brennwertgerät, modulierend von 3,5 bis  $15 \text{ kW}_{\text{th}}$
- Brennstoff: Erdgas, Bioerdgas; Elektrischer Wirkungsgrad: ca. 34 %; Gesamtwirkungsgrad über 85 %.

Neu ist, dass die elektrische Leistungsklasse von bisher  $1,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  auf  $1,0 \text{ kW}_{\text{el}}$  und die thermische Leistung von  $3,0 \text{ kW}$  auf  $1,7 \text{ kW}$  reduziert wurden. Zum einen soll mit den längeren Aggregatelaufzeiten das Produktionsverhältnis von Strom zu Wärme optimiert werden. Zum anderen sollen aufgrund der bedarfsgerechten Modulation während der Sommermonate bessere Betriebszeiten (aufs Jahr bezogen) erreicht werden, die in Folge einen höheren Nutzungsgrad im Nennlastpunkt bewirken sollen.

Aufgrund der Kooperation mit Ballard Power Systems aus Kanada wird in der Gamma 1.0 der FCgen 1030 Stack von Ballard im Rahmen des Callux-Praxistests zur Markteinführung in Deutschland eingesetzt. Einsatzbereich: Einfamilienhäuser; Markteinführung: für 2012 vorgesehen.

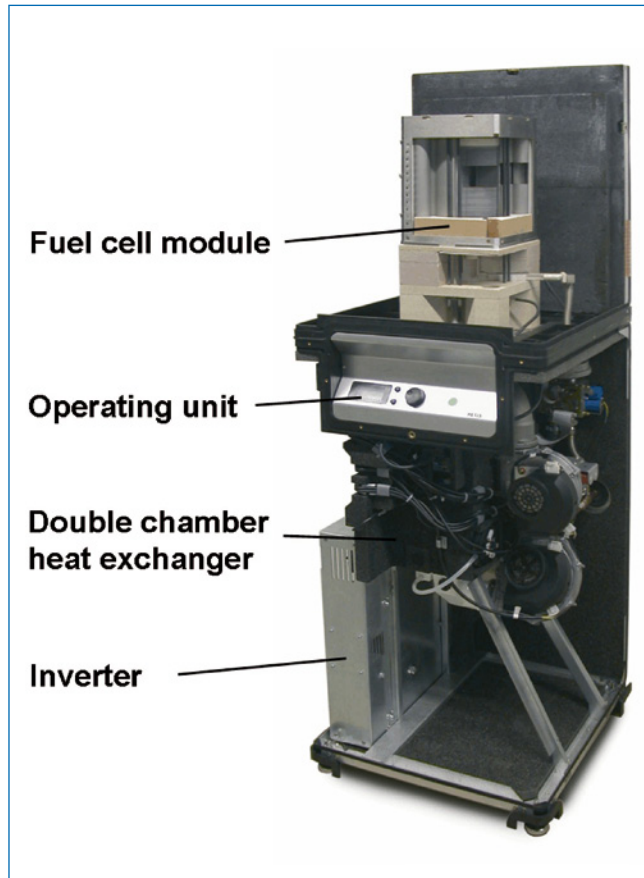


**Abb. 3-32:** Brennstoffzellen-  
heizgerät »Gamma 1«  
(Quelle: Baxi Innotech,  
Hamburg)

#### *Hexis AG, Winterthur (CH)*

Der schweizerische Systemhersteller Hexis AG (Winterthur/CH), Hoval (Vaduz/Lichtenstein) und Stiebel Eltron (Holzminden) haben sich Ende 2008 in einer Kooperation zur Entwicklung und Vermarktung (Vertrieb und Service) der innovativen SOFC-Brennstoffzellentechnologie zusammengeschlossen. Diese Kooperation basiert auf dem von Hexis entwickelte Brennstoffzellenheizgerät »Galileo 1000 N«. Die Hochtemperaturbrennstoffzelle enthält einen festen keramischen Elektrolyten und arbeitet bei Temperaturen von bis 1000 °C, woraus sich Vorteile bei der Brennstoffaufbereitung ergeben. Die einzelnen Brennstoffzellen (Stacks) werden planar, d. h. flach angeordnet, wobei eine besondere Technik dafür sorgt, dass der gegebenenfalls nicht verbrannte Wasserstoff einer Nachverbrennung zugeführt wird.

Beim »Galileo N« wird eine Brenngasaufbereitung, d. h. Entschwefelung des Erdgases mittels Reformer (Fuel processor) nicht erforderlich, weil die Reformierung im Prozess als Catalytic Partial Oxidation (CPO) abläuft. Bei der Catalytic Partial Oxidation (CPO) wird das Erdgas mit einer geringen Luftmenge (Luftzahl = 0,27) zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgesetzt. Da diese Reaktion thermodynamisch als exotherm verläuft, ist hier auch keine externe Wärmezufuhr erforderlich. Daraus erfolgt ein einfacher Aufbau, d. h. es wird kein Wärmeübertrager benötigt. Zudem entfällt der direkte Betrieb mit dem kalten Erdgas-Luft-



**Abb. 3-33:** Brennstoffzellen-  
heizgerät »Galileo N«  
(Quelle: Hexis AG, Winterthur)

Gemisch und es wird für die Reaktion auch kein Wasser benötigt. Somit kann hier auch auf den Einsatz einer kostenintensiven und störanfälligen Wasserdosierung und Deionisierung verzichtet werden.

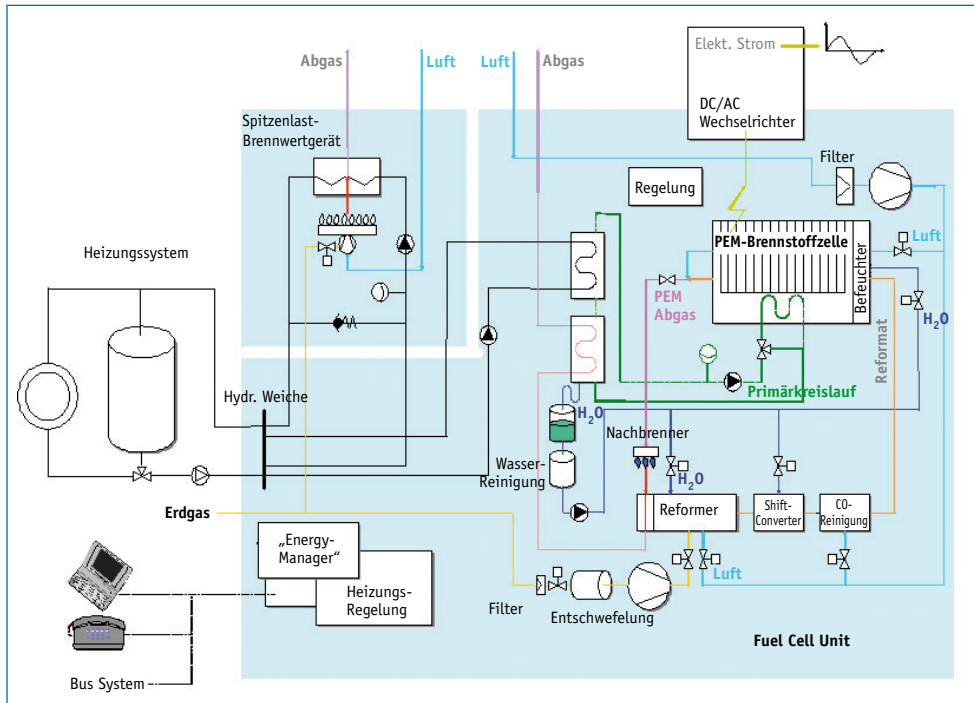
Einsatzbereich: Ein- und Mehrfamilienhäuser im Leistungsspektrum:  $2,5 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$ , zzgl. integriertem Brennwertgerät,  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$ , modulierend 1:5; der elektrische Wirkungsgrad liegt zwischen 25 bis 30 %; der Gesamtwirkungsgrad beträgt über 90 %.

Technologiestand:

- seit 2009 läuft der Feldtesteinsatz mit Brennstoffzellenheizgeräten
- Marktreife: ab 2012 als kommerzielles Produkt auf dem Markt.

*Vaillant GmbH, Remscheid*

Das Vaillant-Brennstoffzellenheizgerät wurde in Kooperation mit PlugPower für eine Leistung von  $7,0 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $4,6 \text{ kW}_{\text{el}}$  konzipiert. Die im Dauerbetrieb der Brennstoffzelle produzierten  $7 \text{ kW}_{\text{th}}$  reichen für den ganzjährigen Warmwasserbedarf eines Mehrfamilienhauses und stützen zudem ganzjährig die Heizwärmeerzeugung. Für den thermischen Spitzenbedarf wird die Wärme während der Wintermonate durch einen Brennwertwärmeerzeuger mit modularer Betriebsweise zur Verfügung gestellt.



**Abb. 3-34:** Prozessflussdiagramm Brennstoffzellenheizgerät (Quelle: Vaillant, Remscheid)

Seit 2006 verwendet Vaillant an Stelle der Niedrigtemperatur-PEM, die bei ca. 70 °C arbeitet, auch eine neue Hochtemperatur PEM-Brennstoffzelle von PlugPower, die bei 160 bis 180 °C läuft und deren Prozessgasaufbereitung wesentlich einfacher gestaltet ist. Insofern werden hier auch weniger Komponenten benötigt und somit die Herstellungskosten reduziert. Diese Variante des Brennstoffzellenheizgeräts befindet sich derzeit ebenfalls im Feldtest.

Als weiteres Segment im Bereich der Brennstoffzellenheizgeräte verstärkte die Vaillant-Group seit Ende 2008 ihre Aktivitäten auch auf den Bereich der keramischen Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die Entwicklungsarbeiten an dem Brennstoffzellenheizgerät mit einem SOFC-Brennstoffzellenstack werden von Vaillant in Kooperation mit der Webasto AG durchgeführt. Um die SOFC-Brennstoffzellenheizgeräte zur Marktreife zu bringen, hat Vaillant eine mehrjährige exklusive Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden vereinbart. Einsatzbereiche sind Mehrfamilienhäuser und Kleingewerbe mit Leistung: max. 9 kW<sub>th</sub> und 4,6 kW<sub>el</sub>.

Die Brennstoffzellensysteme zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden werden in der Regel so ausgelegt, dass sie die Grundlast des Strom- und Wärmebedarfs abdecken. Nur dann erreichen sie eine optimale Effizienz. Sogenannte Brennstoffzellenheizgeräte sind deshalb mit einem konventionellen Zusatzheizgerät ausgestattet (in der Regel ein Gasbrennwertgerät), das die erforderliche Wärme zur Abdeckung der Bedarfsspitzen im Heiz- und Warmwasserbetrieb liefert. Es wird ebenso wie die Brennstoffzelle über eine zentrale Regelung (Energiemanager) gesteuert. Je nach System kann das Brennstoffzellenheizgerät mit



einem integrierten oder externen Zusatzheizgerät kombiniert werden. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, vorhandene konventionelle Heizgeräte über eine spezielle hydraulische Weiche mit dem Brennstoffzellenheizgerät zu verbinden.

Das Brennstoffzellenheizgerät von Vaillant (Leistung maximal  $5,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ ,  $12,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ ) arbeitet mit einer PEMFC des amerikanischen Brennstoffzellenunternehmens PlugPower. Mit der Leistung dieses Prototyps kann der Grundbedarf an Strom, Warmwasser und Heizung in Mehrfamilienhäusern und kleineren Gewerbebetrieben abgedeckt werden. Parallel zu den Feldtests wird die Brennstoffzellentechnologie hinsichtlich der Praxisreife kontinuierlich weiterentwickelt. Die Marktreife von Brennstoffzellenheizgeräten wird jedoch nicht vor 2010 erwartet. Für die Warmwasserbereitung werden beide Geräte mit einem indirekt beheizten Speicher kombiniert.

#### *Viessmann-Werke, Allendorf*

Die Innovationen einer Brennstoffzellen-Hausenergiezentrale von Viessmann sind für den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern konzipiert. Derzeit erfolgen Simulationsrechnungen der Energiekosten und die  $\text{CO}_2$ -Schadstoffemissionsbilanzen. Als Eingangsparameter dienten die Daten aus Verbrauchsmessungen in einem Einfamilienhaus mit einem konventionellen Heizsystem der thermischen und elektrischen Verbräuche in Minutenwerten. Diese Verbräuche wurden mit den Simulationsergebnissen für ein EFH mit einem Brennstoffzellenheizgerät verglichen und die Gas- und Stromverbräuche bilanziert.

Das im Modell abgebildete Brennstoffzellenheizgerät hat bei einem Modulationsgrad von 1:5 eine Leistung von  $5 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Um über die Wintermonate die erhöhten Wärmeanforderungen decken zu können, beinhaltet das Gesamtsystem einen Spitzenlastwärmeerzeuger. Ein Kombispeicher dient als Puffer für das erwärmte Heizwasser und zur Brauchwassererwärmung.

Die Brennstoffzelle wird wärmebedarfsgeführt betrieben, woraus folgt, dass sie stets dann mit hohen Leistungen betrieben wird, wenn im Gebäude ein hoher Wärmebedarf besteht. Das Brennstoffzellensystem wird angeschaltet, wenn der Kombispeicher vollständig geladen ist.

Die neben der Wärme erzeugte elektrische Energie wird direkt zum Eigenbedarf genutzt und der nicht genutzte überschüssige elektrische Strom ins öffentliche Netz eingespeist.

#### *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Stuttgart*

Das ZSW hat ein Brennstoffzellenheizgerät zur dezentralen Kraft-Wärmeversorgung auf Basis der Polymer-Elektrolyt-Membrantechnologie für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern entwickelt. Das neue System vom Typ bw-cell gewinnt aus Erdgas Wasserstoff und produziert damit Elektrizität und Wärme.

Die Testergebnisse an zwei Prototypen haben über eine längere Laufzeit ergeben, dass stabile hohe elektrische Systemwirkungsgrade mit minimalen Emissionswerten erreicht werden. Hinsichtlich der Betriebserfahrungen laufen derzeit die Teststudien.

Das Brennstoffzellenheizgerät vom Typ bw-cell besteht aus einem Erdgasreformer der WS Reformer GmbH, Renningen und einer am ZSW entwickelten und auch hergestellten PEM-Brennstoffzelle. Die Gesamtanlage liefert eine Leistung von  $6,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $3,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ .

Bei Temperaturen von ca.  $800^\circ\text{C}$  setzt der Reformer Erdgas in Reformatgas um, das aus etwa 80 % Wasserstoff besteht. Das Reformatgas wird von der Brennstoffzelle in Strom und



Wärme umgewandelt. Das im Erdgasreformer entstehende Katalysatorgift Kohlenmonoxid wird mithilfe von Gasreinigungsstufen auf eine CO-Konzentration im Reformgas von unter 20 ppm reduziert.

Das bw-cell-Brennstoffzellenheizgerät hat eine Höhe von 1,80 m und eine Grundfläche von 0,75 x 0,75 m sowie ein Gewicht von ca. 200 kg.

Die Entwicklung des bw-cell-Systems wurde in der Zeit von 2003 bis 2006 im Rahmen eines Förderprojektes des Umweltministeriums Baden-Württemberg erfolgreich abgeschlossen.

Eine Weiterentwicklung zu einem seriellen Produkt in Kooperation mit einem Industriepartner ist bislang nicht erfolgt.

Das ZSW arbeitet zudem an der Systementwicklung und an H<sub>2</sub>-Erzeugungsverfahren auf Basis regenerativer Brennstoffe (Ethanol, Methanol, Dimethylester, etc.). Diese Entwicklungsarbeiten beziehen sich jedoch nicht speziell auf das bw-cell-System, sondern allgemein auf PEM-Brennstoffzellensysteme im Leistungsbereich von 1 bis 10 kW<sub>el</sub> in den Anwendungsbereichen der Hausenergieversorgung und dezentralen, nicht leitungsgebundenen Stromerzeugung.

### 3.4.2.6 Brennstoffzellen-Innovationen

#### Heizöl-Brennstoffzellenheizgerät

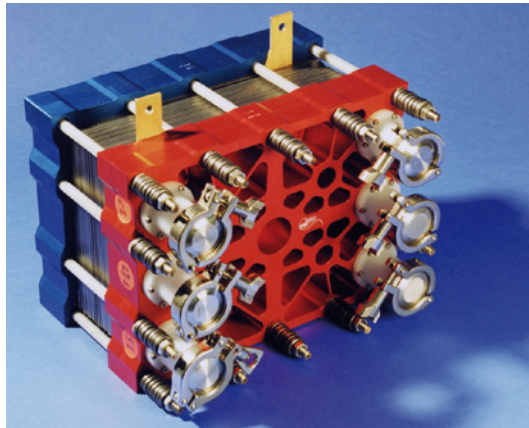
Bisher wurde die Entwicklung von Brennstoffzellenheizgeräten von erdgas- und wasserstoffbetriebenen Geräten dominiert. Die deutsche Aral AG in Bochum und die Schweizer Sulzer Hexis AG in Winterthur haben jedoch erstmals einen Prototyp einer gemeinsam entwickelten, heizölbetriebenen Brennstoffzelle zur Erzeugung von Strom und Wärme realisiert, die für den Einsatz in Einfamilienhäusern vorgesehen ist. Der Prototyp verdeutlicht, dass als Brennstoff für eine Niedertemperaturbrennstoffzelle auch Heizöl EL zum Einsatz kommen kann.

Zum Betrieb der Brennstoffzelle wird Wasserstoff benötigt. Da Wasserstoff aber derzeit nicht als Primärenergie vorliegt, wird es über die Reformierung von Heizöl bereitgestellt.

Die gesamte technische Konzeption beinhaltet die komplette Prozesskette, von der Brenngaserzeugung über die Synthesegaserstellung bis zur elektrochemischen Umsetzung in einer Niedertemperaturbrennstoffzelle (PEM) sowie der Oxidation von Wasserstoffrestgehalten im Brennstoffzellenabgas. Die hier anfallende Wärme kann als Nutzwärme verwendet werden. Der Hochleistungs-Wärmeübertrager ermöglicht ein optimales Wärmemanagement und eine kompakte Bauform, wobei für die Serienproduktion dieses kompakten Brennstoffzellensystems ein Leistungsbereich von bis zu 10 kW angestrebt wird.

#### Neuer Werkstoff für Brennstoffzellen

Eine neue Metalllegierung, die für den serienmäßigen Einsatz in Hochtemperaturbrennstoffzellen besonders geeignet ist, haben Wissenschaftler des Forschungszentrums Jülich jetzt entwickelt. Der Werkstoff ermöglicht erstmals eine Serienproduktion der Interkonnektoren, mit denen die kleinen Brennstoffzelleneinheiten zu einer leistungsfähigen Großeinheit (Stack) zusammengeschaltet werden. Die Interkonnektoren stellen die elektrische Verbindung zwischen den Einheiten her und versorgen sie über Gaskanäle mit dem Brenngas. Bis-



**Abb. 3-35:** PEM-Brennstoffzelle  
(Quelle: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW))



**Abb. 3-36:** BrennstoffzelleG  
(Quelle: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW))

her war es nicht möglich, die Interkonnektoren kostengünstig und mit den gewünschten elektrischen Eigenschaften aus metallischen Legierungen herzustellen. Damit die Metalllegierungen bei Betriebstemperaturen um 900 °C eine vergleichbar geringe Wärmeausdehnung aufweisen wie die angrenzenden keramischen Werkstoffe, wird ihnen ein hoher Chromanteil beigemischt. Zugleich wird so die Lebensdauer der Interkonnektoren verlängert. Allerdings wird das Chrom bei den hohen Temperaturen teilweise abgedampft. Es durchdringt die Kathode bis zur Grenzfläche zwischen der Kathode und dem Elektrolyt. Hierdurch wird die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle drastisch herabgesetzt.

Dieses Problem wird jedoch durch eine Art »Selbstversiegelung« gelöst. Sobald die Brennstoffzelle aktiv wird, bildet sich auf der Oberfläche der Interkonnektoren eine Schutzschicht aus Chrom-Manganoxid, die die Chromabdampfung verhindert. Zudem besitzt diese Oxidschicht die erforderliche hohe elektrische Leitfähigkeit und platzt nicht von der Oberfläche ab. Ausschlaggebend dafür ist unter anderem eine Beimischung von Lanthan, Mangan und Titan.

**Tab. 3-12:** Referenzprojekte über Klein-KWK mit Brennstoffzellen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten  |
|--|--|---|
| Technologiepavillon in Poing bei München; kaup jesse hofmayr werner, München | Die elektrischen Energien für das Technologiepavillon wird aus dem Einsatz der Brennstoffzelle bezogen. Die Kopplung der elektrischen Energieerzeugung über diesen chemischen Umwandler und die gleichzeitige Nutzung der anfallenden Abwärme machen die Brennstoffzelle zu einer Technologie mit einem hohen Gesamtnutzungsgrad. Auf dem Dach des Technologiepavillon im Bauzentrum wurden Vakuumröhrenkollektoren installiert die in Verbindung mit der Abwärme der erdgasbetriebenen Brennstoffzelle die Wärmeversorgung zur Raumheizung und Warmwasserbereitung decken. Die im Sommer überschüssige Wärmeenerzeugung wird in einem Langzeitwärmespeicher im Erdreich gesammelt und dem Gebäude während der Heizperiode wieder zugeführt. | Die massiven Bauteile verhindern das Überhitzen der Ausstellungs-, Seminar- und Vortragsräume und geben die gespeicherte Wärme nachts ab. Über ein »Change-Over-System« kann die Wärme mittels wasserführender Rohre (Fußbodenrohrregister) in andere Gebäudeteile geführt werden. Ferner können im Winter bei einem besonders hohen Wärmebedarf zwei Grundwasser-Wärmepumpen zugeschaltet werden. Andererseits kann mit dieser Wärmepumpe im Sommer über das kühlere Grundwasser eine Raumkühlung realisiert werden. Tageslichtsteuerung |

Fortsetzung Tab. 3-12

|  |  |  |
|--|--|--|
| Landesvertretung<br>Nordrhein-Westfalen,<br>Berlin<br>Petzinka Pink Architek-<br>ten, Düsseldorf | Wesentliche Merkmale des ökolo-<br>gisch-ökonomischen Energie-<br>konzeptes des Gebäudes sind die<br>nutzungsgerechte Zonierung sowie<br>der Einsatz energiesparender Sys-<br>teme. Brennstoffzellen-BHKW zur<br>Abdeckung der elektrischen und<br>thermischen Gebäudegrundlast.<br>Absorptionskältemaschine mit An-<br>triebsenergie aus der Abwärme der<br>BHKWs: Kühlpotenzial für die<br>Kühldecken innerhalb der Sonder-<br>bereiche. | Fernwärme (für thermische Spit-<br>zenlast);<br>die Luft für das Heiz-/Kühlsystem<br>des Atriums wird in einem 175 m<br>langen Erdluftkanal vorkonditio-<br>niert, 100 m <sup>2</sup> große Photovoltaik-<br>anlage auf den Flachdächern der<br>Büroriegel |
|--|--|--|

### 3.4.3 Blockheizkraftwerke

Mit einem Blockheizkraftwerk kann Nutzwärme und elektrische Energie ausgekoppelt und mit einem hohen Ausnutzungsgrad des verwendeten Brennstoffes produzieren werden. Auf diese Weise entsteht ein energetischer Vorteil gegenüber der getrennten Produktion von Wärme und elektrischer Energie, wie dieses in den konventionellen Kraftwerken und Wärme-erzeugern der Fall ist, wo zudem ein großer Energieanteil ungenutzt in die Atmosphäre ent- weicht. Die konventionellen Kraftwerke, die zur Stromerzeugung betrieben werden, haben lediglich einen Wirkungsgrad von 30 bis 35 % zu verzeichnen. Die bei der Stromerzeugung produzierte Wärme ist hier völlig nutzlos und geht in der Regel ungenutzt verloren. Bei den Blockheizkraftwerken (BHKW) wird das energetische Ergebnis in der Form verbessert, weil hier der elektrische Strom und die Wärme dezentral produziert werden.

Das Blockheizkraftwerk besteht aus einem Verbrennungsmotor, der mit Gas oder Öl an- getrieben wird. Dieser Motor ist mit einem Generator zur Stromerzeugung gekoppelt. Im Betrieb wird in diesem Block gleichzeitig die entstehende Motorwärme sowie die Abgas- wärme zum Heizen und mit der Motorkraft der Strom erzeugt. Der elektrische Strom wird entweder selbst verbraucht oder in das öffentliche Netz eingespeist. Aufgrund der Techno- logie der gleichzeitigen Wärme- und Stromerzeugung können Wirkungsgrade bis zu 90 % er- reicht werden. Bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme durch Blockheizkraft- werke entstehen insgesamt ca. 40 bis 60 % geringere Schadstoffemissionen als bei der Stromerzeugung in einem konventionellen Kraftwerk.

Der Betrieb von Blockheizkraftwerken zur Kraft-Wärme-Auskopplung erfolgt derzeit zwar noch überwiegend mit fossilen Brennstoffen, wie Erdgas und Heizöl. Dennoch wird zuneh- mend Biogas, Klärgas- und Deponiegas sowie Biodiesel und Rapsöl eingesetzt. Zudem wird für die BHKW die Biomasse in Form der regenerativen Energie Hackschnitzel, Holzpellets, etc. an Bedeutung gewinnen. Die Energieerzeugung aus Biomasse erlebt in Deutschland derzeit einen starken Aufschwung. Hierbei wird die Biomasse primär in Anlagen zur Wärme- erzeugung genutzt. Um auch lignozellulosehaltige Biomassen, wie Holz und Stroh im Lei- stungsbereich bis zu 10 MW<sub>el</sub> mit vertretbaren Wirkungsgraden zur Stromerzeugung nutzen zu können, bietet sich hier die Vergasung von Biomasse an. Bei diesem Prozess wird die

Biomasse zunächst in ein Brenngas umgewandelt, das im Anschluss daran in konventionelle Wärmekraftmaschinen, d. h. in einen Gasmotor oder eine Gasturbine zur Stromerzeugung genutzt wird.

Die Biomassevergasung bietet hierbei außerdem die Möglichkeit Synthesegas als Einsatzstoff für die chemische Industrie oder für synthetische Biokraftstoffe bereitzustellen. Es ist egal, welcher Brennstoff verwendet wird, denn die BHKW nutzen ihn effizienter und sparen so wertvolle Ressourcen. Besonders kostengünstig sind BHKW, die mit Erd-, Flüssiggas oder Pflanzenöl sowie mit Dieselmotor betrieben werden. Eine reine Stromerzeugung wird lediglich in wenigen größeren Anlagen mit dem Einsatz von Altholz betrieben. Die Endstufe eines BHKW einer Biogasanlage besteht aus dem Gasmotor mit Wärmeübertrager und angekoppeltem Generator. Bezogen auf den Energiegehalt des Biogases erzeugt das BHKW mit einem Wirkungsgrad von ca. 30 % elektrischen Strom und mit einem Wirkungsgrad von ca. 60 % Wärme.

### Ökologische Aspekte

Der größte Teil des europäischen Stroms (UCTE) wird in thermischen Kraftwerken mit weniger als 40 % Wirkungsgrad erzeugt. Durch den Gesamtwirkungsgrad des BHKW von etwa 90 % ergibt sich eine erhebliche Verbesserung der Energieausnutzung. Zu diesem hohen Gesamtwirkungsgrad trägt die gute Auslastung durch den Wärmebezug eines Absorbers bei, der mit dem umweltschonenden Kältemittel Lithiumbromid (gesättigte Salzlösung) arbeitet. Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen errechnet sich zu 1620 t/a. Diese Umweltentlastung hat zudem einen finanziellen Nebeneffekt in der Form zur Folge, dass im Rahmen des europäischen Emissionszertifikathandels zum Schutz des Klimas eine zusätzliche wirtschaftliche Vergütung erfolgt.

### Schadstoffreduktion

Ein BHKW reduziert – verglichen mit der konventionellen, getrennten Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom – den Primärenergieeinsatz um 40 %. Diese Einsparung trägt proportional zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen bei, daraus folgt, dass ein BHKW rund 60 % weniger CO<sub>2</sub> erzeugt, als ein konventionelles Kraftwerk. Durch den Einsatz von Magermotoren wird zudem die Bildung von NO und NO<sub>2</sub> deutlich reduziert. In Verbindung mit einem Oxydationskatalysator, der die Umwandlung von CO und Kohlenwasserstoffen zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O begünstigt, tragen die BHKW-Systeme mit einer Minderung von rund 26 % in der Gesamtstickoxid (NO<sub>x</sub>)-Bilanz erheblich zur Schadstoffemissionsentlastung bei.

#### 3.4.3.1 Verbrennungsmotor-BHKW

In der Betriebsweise dieser BHKW sind zwei Varianten denkbar:

- Bei einem »stromgeführten« BHKW steht die Stromproduktion wie bei einer Biogasanlage im Vordergrund und das BHKW arbeitet möglichst rund um die Uhr. Hierbei fällt die Wärme als Nebenprodukt an.
- Demgegenüber wird ein »wärmegeführtes« BHKW primär für die Heizung der angeschlossenen Wohn- und Betriebsräume genutzt. Der Strom wird hierbei als Nebenprodukt erzeugt.

**Tab. 3-13:** Kraftstoffe und Normung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Parameter  | Biodiesel (FAME)<br>DIN EN 14214 | Diesel<br>DIN EN 590 | Rapsöl<br>DIN V 51605 |
|--|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Dichte (15 °C) kg/m <sup>3</sup>                       | 860 bis 900                      | 820 bis 845          | 900 bis 930           |
| Viskosität <sup>1)</sup> (40 °C)<br>mm <sup>2</sup> /s | 3,5 bis 5,0                      | 2,0 bis 4,5          | ≤ 36                  |
| Flammpunkt (°C)  | > 101                            | > 55                 | ≥ 220                 |
| Heizwert <sup>2)</sup>                                 |                                  |                      |                       |
| massebezogen<br>(MJ/kg)                                | 37,6                             | 43,0                 | 37,6                  |
| volumetrisch (MJ/l)                                    | 33,1                             | 36,2                 | 34,6                  |
| 1) kinematische Viskosität                             |                                  | 2) Literaturwerte    |                       |

Abgesehen vom Energieaufwand für den Anbau und die Ernte sowie für die Weiterverarbeitung zu Rapsmethylester verursacht der Rohstoff keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Rapsöl ist im Gegensatz zu den konventionellen Kraftstoffen biologisch gut abbaubar. Ein großer Vorteil besteht deshalb auch in der einfachen Handhabung. Rapsöl gilt nicht als Gefahrgut, d. h. Rapsöl ist nicht wassergefährdend. Das bei der Ölherstellung in den Ölmöhlen anfallende Abfallprodukt, der »Rapsextraktionsschrot« gelangt in ländlichen Gegenden über den Futterhandel direkt in den Kreislauf zurück. Ansonsten lässt sich der Rapsschrot auch als Brennmaterial weiter verwenden.

Gegenüber dem Heizöl sind auch technische Vorteile zu verzeichnen. So fallen die bei den Mineralöltanks vorgeschriebenen Prüfungen der Tankanlage im 5-Jahresrhythmus weg, weil Rapsöl in die Wassergefährdungsklasse 0 eingestuft ist.

Die Grenzwerte für die Stickoxide und Chlorwasserstoffe sind für Heizöl EL in der TA-Luft vorgegeben. Was nicht in der TA-Luft vorgegeben wird, aber für Heizöl über die Rußzahl bestimmt wird, ist der Anteil der staubförmigen Stoffe, des Rußes in der Luft. Bei einem Vergleich zwischen Heizöl und Rapsöl zeigt es sich, dass beim Rapsöl ein geringfügig erhöhter Aschegehalt freigesetzt wird. Ein weiterer, überaus sinnvoller Einsatz liegt auch darin begründet, dass das Rapsöl als Rohstoff für Hydrauliköle, Schmierstoffe, etc. verwendet werden kann und zudem diese Stoffe sehr viel schneller abbaubar sind. Unter besonderen topographischen Umständen bei denen z. B. in Naturschutz-, Wasserschutzgebieten oder in besonderen Hochlagen, etc. ein erhöhter Anspruch auf die Lager- und Transportsicherheit gelegt wird treffen die o. a. Randbedingungen jedoch nicht mehr zu.

### Besonderheiten bei der Pflanzenöllagerung

Die Verwendung von Pflanzenöl stellt nicht nur an die Hersteller der Pflanzenöl-BHKW besondere Anforderungen, sondern ebenfalls auch an die Lagerungsbedingungen. Zur Lagerung von Pflanzenöl sollten nachfolgend aufgeführte Gesichtspunkte beachtet werden.

Die Pflanzenöle sollten weder direkter Sonneneinstrahlung noch Frostgraden ausgesetzt werden. Reines Pflanzenöl wird ohne Dieselbeimischung bei ca. 0 °C fest und somit auch nicht mehr pumpfähig. Zu empfehlen sind Erdtanks, die unter Vermeidung von Temperaturschwankungen in einem frostfreien Raum mit kühlen Lagertemperaturen aufgestellt wer-

den. Da die Vorgänge der Fettoxidation bei Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) nicht vorhersehbar sind, sollte der Raum gasdicht ausgeführt sein, d. h. Lichteinfall, Sauerstoff- und Wasserzutritt müssen vermieden werden. Die Lagerbehälter müssen darüber hinaus vollständig entleerbar und gut zu reinigen sein.

Die besonderen Vorteile liegen innerhalb der physikalischen und chemischen Besonderheiten. Bei einer hohen Energiedichte von Pflanzenöl droht aufgrund der geringen Abdampfrate weder bei Transport noch bei der Lagerung eine Explosionsgefahr. Die Wassergefährdungsklasse ist gleich Null.

Bei Pflanzenöl-BHKW sollten die Erlöse aus Strom und Wärme den Brennstoff- und Betriebskosten des BHKW gegenübergestellt werden. Aufgrund der im Vergleich zu Heizöl hohen Brennstoffkosten ist eine Wirtschaftlichkeit selbst, mit einer erhöhten Netz-Einspeisevergütung von derzeit 8 Ct/kWh nur schwer zu erreichen.

Unter besonderen topographischen Umständen bei denen z. B. in Naturschutz-, Wasserschutzgebieten oder in besonderen Hochlagen, etc. ein erhöhter Anspruch auf die Lager- und Transportsicherheit gelegt wird, treffen die o. a. Randbedingungen jedoch nicht mehr zu.

Zum Einsatzbereiche von Pflanzenöl-BHKW zählen u. a. auch Gebäude, bei denen eine Versorgung mit Mineralöl wegen der Gefährdung der Umwelt, z. B. der Verunreinigung des Grundwassers in Wasserschutzgebieten, ausscheiden.

## Referenzprojekte

**Tab. 3-14:** Referenzprojekte Klein-BHKW-Anlagen mit Pflanzenöl (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt   | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
| Mercedes. Benz-Autohaus Roßbach in Hamburg  | PowerTherm-KWK;<br>Leistungen: $43 \text{ kW}_{\text{th}}$ ; $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ ;<br>Wärme-/Kältepufferspeicher je 4000 Liter Inhalt   | KWK-Abwärme wird zum Antrieb der Absorptionskältemaschine genutzt, Kälteleistung 15 kW   |
| Priener-Hütte Chiemgauer Alpen  | Pflanzenöl-KWK mit einer Leistung von 22 kVA (auf Referenzhöhe ca. $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) und $35 \text{ kW}_{\text{them}}$ (auf Referenzhöhe ca. $31 \text{ kW}_{\text{them}}$ ). | Zusatzheizung Scheitholz-Wärmeerzeuger mit einer Leistung von $60 \text{ kW}_{\text{them}}$ Photovoltaikanlage   |
| Schiestl-Schutzhütte am Hochschwab, Steiermark/A; Treberspurg & Partner Architekten, Wien | Passivhaustechnologie auf 2154 m ü. N.N.; Pflanzenöl-KWK mit Rapsöl   | $62 \text{ m}^2$ fassadenintegrierte Solarthermiekollektoren;<br>$68 \text{ m}^2$ Photovoltaikmodule an der Terrassenbrüstung;<br>$5,6 \text{ m}^2$ Photovoltaikmodule an den Balkontüroberlichtern. |

## Kombinationen (Hybridanlagen von Pflanzenöl, Holz und Solartechnologie)

Im gesamten Voralpenland erfüllen derzeit etliche Pflanzenöl-BHKW-Anlagensysteme sämtliche Ansprüche einer dezentralen Energieversorgung. Neben den privaten Objekten verfolgt beispielhaft auch der Deutsche Alpenverein das Ziel, seine Alpenvereinshöhlen auf den Einsatz regenerativer Energien und rationeller Energieanwendungen umzustellen. Die jeweili-



gen Energietechniken werden in Abhängigkeit von der Hüttengröße, dem Standort (Verschattung) und dem Betrieb bereits optimal umgesetzt.

### **Priener Hütte, Chiemgauer Alpen**

In der Priener Hütte in 1410 m Höhe im Naturschutzgebiet Geigelstein versorgt beispielsweise ein Pflanzenöl-BHKW mit einer Leistung von  $18 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $35 \text{ kW}_{\text{th}}$  die Hütte mit Strom und Wärme.

Da die Hütte in Südrichtung orientiert wurde, können die installierten Photovoltaikmodule einen optimalen Zusatzstrom ernten. Zu Tageszeiten mit geringerem Strombedarf und für einen Verbrennungsmotor ungünstigen Teillastbetrieb von  $< 35\%$  übernimmt eine  $3 \text{ kW}$ -Wasserkraft die Grundversorgung. Bei längerer Trockenheit und Ausfall der Wasserkraft steht zusätzlich ein Pflanzenöl-BHKW mit einer Leistung von  $6 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $13 \text{ kW}_{\text{th}}$  zur Verfügung. Da es sich um eine ganzjährig betriebene Hütte handelt und die BHKW-Abwärme im Winter nicht ausreichend wäre, wurde zusätzlich ein Wärmeerzeuger für Scheitholz ( $1,0 \text{ m}$  Länge) mit einer Leistung von  $60 \text{ kW}_{\text{th}}$  installiert. Bei einer geringeren Personenfrequenz reicht zur Kernzonenbeheizung ein Kachelofen aus.

### **Kloster Benediktbeuern und Zentrum für Umwelt und Kultur**

Der gesamte Klosterkomplex und das Zentrum für Umwelt und Kultur haben einen Wärmebedarf von ca.  $4300 \text{ MWh}$  pro Jahr. Zu fast  $90\%$  wird der Wärmebedarf durch regenerative Energiequellen gedeckt. Diese Größenordnung entspricht im Vergleich dem Jahresbedarf von ca.  $190$  Privathaushalten. Die gesamte Wärmebereitstellung für das Kloster Benediktbeuern erfolgt in einer Kombination, bestehend aus zwei Heizöl-Wärmeerzeugern mit  $1,7 \text{ MW}$  sowie einem Pflanzenöl-BHKW, einem Hackschnitzelwärmeerzeuger, einer Solarthermieanlage und zwei Luft/Wasser-Wärmepumpen.

Das Pflanzenöl-BHKW und der Hackschnitzelwärmeerzeuger decken hierbei die Wärmebedarfs-Grundlast. Durch die Begrenzung auf den Grundlastbetrieb können diese beiden Systeme auch wirtschaftlich betrieben werden. Die beiden Heizöl-Wärmeerzeuger werden für die Spitzenlasten und für den Reservefall in Reihe aufgeschaltet. Die rationelle Energieanwendung erfolgt mittels:

- Pflanzenöl-BHKW mit  $34 \text{ kW}_{\text{th}}/20 \text{ kW}_{\text{el}}$ , einem 4-Takt-Reihenmotor und Synchron-generator, mit naturbelassenem Rapsöl (Rapsölbedarf: ca.  $51.500 \text{ l/a}$ )
- Hackschnitzelwärmeerzeuger  $900 \text{ kW}$ ; Biomasse-Brennstoff: naturbelassene (Holz-) Hackschnitzel; ca.  $1200 \text{ t/a}$  bzw.  $4700 \text{ m}^3/\text{a}$
- Wärmepumpe,  $8 \text{ kW}$ .

Das Pflanzenöl-BHKW erreicht einen Wirkungsgrad von  $90\%$ . Wärmeenergie  $53\%$ , elektrische Energie  $35\%$ , Abgasverluste  $12\%$ . Neben der Eigenstromerzeugung durch das Pflanzenöl-BHKW wird die Eigenstromerzeugung mittels zweier Wasserkraftanlagen sowie über die Photovoltaikanlage erzeugt. Der Stromverbrauch für die Klosteranlage Benediktbeuern beträgt im Jahr ca.  $850 \text{ MWh}$ . Davon werden ca.  $70\%$  durch den Einsatz der regenerativen Energiequellen abgedeckt. Die Stromleistung wird zu  $3/4$  von der Wasserkraftanlage erzeugt und zu  $1/4$  vom Pflanzenöl-BHKW sowie zu  $1\%$  von der Photovoltaikanlage erbracht. Ferner wird auf der Basis des Energie-Einspeise-Gesetzes (EEG) der erzeugte Strom über einen se-



paraten Zähler in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Für die Photovoltaikanlage wurden 100 m<sup>2</sup> CIS-Solarzellen (Mischung von Kupfer, Indium und Selen) verwendet. Die Spitzenleistung beträgt hierbei 9 kW.

Der Heizöl- und Rapsöltank besteht aus einer Kombination, mit einer Trennwand unterteiltem Stahltank. Inhalt 23.000 l Heizöl und 9500 l Rapsöl. Dieses entspricht einer Heizölbevorratung von 1/3 des Jahresbedarfs und einer Pflanzenölbevorratung von rund 1/5 des Jahresbedarfs.

**Tab. 3-15:** Referenzprojekte für Anlagen mit BHKW-Abwärmenutzung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
| Neubau der Hauptverwaltung Gelsenwasser AG   | Abwärme des BHKW zur sorptionsunterstützte Klimatechnik (SGK)  | Erdwärmesonden, reversible Wärmepumpe/Photovoltaikanlage/Gebäudeleitetchnik  |
| Landesvertretung Nordrhein-Westfalen, Berlin Petzinka Pink Architekten, Düsseldorf | Absorptionskältemaschine mit Antriebsenergie aus der Abwärme der BHKWs. Brennstoffzellen-BHKW zur Abdeckung der elektrischen und thermischen Grundlast des Gebäudes.   | Das Kühlpotenzial für die Kühldecken der Sonderbereiche wird über die Absorptionskältemaschine bereitgestellt. Die Luft für das Heiz-/Kühlsystem des Atriums wird über einen 175 m langen Erdluftkanal rund um das Gebäude vorkonditioniert.<br>Fernwärme (für thermische Spitzenlast);<br>100 m <sup>2</sup> große Photovoltaikanlage auf den Flachdächern der Büroriegel.  |
| Stihl-Kettenfabrik AG Will/Schweiz   | Für die neue Produktionshalle mit einer Grundfläche von 3700 m <sup>2</sup> und einer Nutzungsfläche von 11.000 m <sup>2</sup> wurden zwei Blockheizkraftwerke (BHKW) – eines mit 8-Zylindergasmotor und 280 kW <sub>el</sub> /368 kW <sub>th</sub> und eines mit 12-Zylindergasmotor und 469 kW <sub>el</sub> /615 kW <sub>th</sub> – installiert. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels BHKW und Absorptionskältemaschine (AKM) installiert. Die BHKW arbeiten prinzipiell wärmegeführt, da sie aber mit ihrer Wärme über den Absorber weitgehend Prozesskälte erzeugen, stellt im Normalfall im Grunde der Kältebedarf die wichtigste Führungsgröße dar. | Die erzeugte Wärme mit 85 °C wird zwei Wärmespeichern mit je 8000-Liter Inhalt zugeführt. Die 1000 kW Abwärmeanteil der BHKW wird in einem Absorber mit 700 kW, Aufgrund dieser großen Speichervolumen, erreichen die beiden Aggregate rund 7700 Betriebsstunden im Jahr. Der von den BHKW erzeugte elektrische Strom wird gänzlich im Produktionswerk verwendet, wobei der gesamte Strombezug um 22 % entlastet wird. |

### 3.4.3.2 Stirling-BHKW

Das Potenzial eines Stirlingmotors stellt gemessen an den derzeit auf dem Markt angebotenen Klein-KWK-Aggregate mit Verbrennungsmotoren eine Alternative dar, die erheblich weniger Betriebskosten erfordert. Der Einsatz von Stirlingmotor-Kleinst-KWK-Aggregate hat zudem gegenüber dem gekauften Strom noch immaterielle Vorteile, wie

- eine dezentrale, autarke Erzeugung von Strom und Wärme
- bis zu 45 % weniger Primärenergieverbrauch gegenüber konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungen
- Reduktion des Kohlendioxidausstoßes bis zu 65 %
- Reduktion des Schadstoffausstoßes bis zu 90 %
- Kohlendioxidneutralität beim Einsatz von regenerativen Brennstoffen.

*Objektbeispiel:* Schulzentrum München-Pasing

Das Schulzentrum in München-Pasing besteht aus einer Grund- und Hauptschule, ein Gymnasium, Sporthallen und eine Schwimmanlage. Die Wärmeversorgung der Grundschule und des Hallenbades erfolgt über die Fernheizung mit konstanter Vorlauftemperatur. Die Leistungsabgabe der Wärmeerzeuger wird über die Drehzahlveränderung der Umwälzpumpen geregelt. Während des Schulbetriebs wird die gesamte Wärmeerzeugung der Kraft-Wärme-Kopplung im Heizungssystem für die Gebäudeheizung und für die Warmwasserbereitung verwendet. Aufgrund des Schwimmbadbetriebes wird eine konstante Strom- und Wärmeabnahme auch außerhalb der Heizperiode garantiert. Die elektrische Leistung des Stirling-KWK-Aggregats mit dem Arbeitsgas Helium beträgt 40 kW und die Wärmeleistung 88 kW.

Die Kraft-Wärme-Kopplungseinheit besteht aus einem 1-Zylinder-Stirlingmotor mit integriertem Asynchrongenerator ( $\eta = 92\%$ ) zur Stromerzeugung. Für den Fall, dass die Wärmeerzeugung des Stirlingaggregats nicht ausreichen sollte, wird die Leistung mittels einem bzw. zweier konventionellen Gas-Wärmeerzeugern angehoben. Aus energetischen Gründen, d. h. zur Erhöhung des Wirkungsgrades, wurde dem Grundlastwärmeerzeuger ein Abgaswärmeübertrager nachgeschaltet. Um Unregelmäßigkeiten bei der Energieabnahme ausgleichen zu können, wurde ein Pufferspeicher integriert.

### 3.4.3.3 Organic Rankine Cycle-BHKW

Das Kürzel ORC steht für Organic Rankine Cycle (organischer Kreisprozess nach Rankine), benannt nach dem schottischen Ingenieur William John MacQuorn Rankine (1820–1872), der diesen thermodynamischen Prozess bereits 1850 entwickelt hat. Die ORC-Wärmekraftanlagen mit organischem Fluid als Arbeitsmittel eignen sich zur Umwandlung der Wärme in mechanische Arbeit mit niedriger Temperatur. Als mögliche Wärmequelle bieten sich hierzu Abwärme, Abgase, Abdampf, Biomasse (Holz) aber auch geothermische Energie oder Solarenergie an.

Bei vielen industriellen Prozessen fällt Abwärme an, die sich z. B. zur Heizungsunterstützung, zum Betrieb von Absorptionskältemaschinen und zur Stromerzeugung in ORC-Turbinen mit leicht siedendem organischem Arbeitsmedium nutzen lässt. Das Wasser verdampft unter atmosphärischen Bedingungen bei 100 °C. Damit kann Wärmeenergie mit einem niedrigeren Temperaturniveau, wie z. B. industrielle Abwärme oder Erdwärme, in der Regel nicht zur Stromerzeugung genutzt werden.

Demgegenüber können auch organische Medien mit niedrigeren Siedetemperaturen verwendet werden, mit denen dann Niedertemperaturdampf erzeugt wird, der in einer dafür konzipierten Dampfturbine entspannt wird und den Generator zur Stromerzeugung antreibt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, große Wärmeenergiepotenziale mit niedrigen Temperaturen für die Stromerzeugung zu erschließen. Insofern können für ein Biomasseheizkraftwerk thermische Parameter erreicht werden, die sich im Bereich von rund 300 °C und 10 bar bewegen. Nach der Verstromung kann aus dem ORC-Prozess Wärme mit einer Vorlauftemperatur von max. 90 °C ausgekoppelt und über die Nahwärmeschiene in die einzelnen Unterstationen eingespeist werden.

Der mit Biomasse befeuerte ORC-Prozess ermöglicht einen wirtschaftlichen, technisch und ökologisch optimalen Betrieb über das gesamte Jahr. Bei der Wärmeübertragung vom Biomassewärmeerzeuger auf den Dampfkreislauf mittels Thermoöl findet eine Trennung der Kreisläufe zwischen der Wärme- und Stromerzeugungseinheit statt.

Beim ORC-Prozess kommt anstelle des Arbeitsmediums Wasser, wie beim Dampfprozess, ein organisches Arbeitsmittel (Ammoniak, Isobutan, Toluol oder Silikonöl) zum Einsatz. Da organische Medien bei einer tieferen Temperatur siedend, sind niedrige Temperaturen und Drücke bei gleichzeitig höherem Wirkungsgrad möglich. Daraus ergeben sich eine Fülle von Vorteilen, wie z. B. eine hohe Verfügbarkeit, eine einfachere Betriebsweise und Anlagenüberwachung, geringere Unterhaltskosten sowie ein problemloser Teillastbetrieb. Außerdem entfallen durch den Einsatz eines flüssigen Thermoöls im Wärmeerzeuger und der Trennung zwischen Verbrennungsanlage und Stromerzeugungseinheit die hohen Kosten und Betriebsaufwendungen eines Dampfwärmeerzeugers. Für den Fall, dass im Betrieb eine Auslastung von rund 5000 Betriebsstunden pro Jahr erreicht werden soll und die Stromproduktion aus regenerativen Energieträgern gefördert wird, stellt sich der Einsatz von ORC-Anlagen in jedem Fall als eine wirtschaftlich interessante Lösung zur Kraft-Wärme-Kopplung mittels Biomasse dar.

Es besteht ein wachsendes Interesse an BHKW mit Organic Rankine Cycle-Technologie, da im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung zunehmend Holz als Energieträger genutzt wird. Der mit Biomasse befeuerte ORC-Prozess ermöglicht einen wirtschaftlichen, technisch und ökologisch optimalen Betrieb über das gesamte Jahr. Bei der Wärmeübertragung vom Biomassewärmeerzeuger auf den Dampfkreislauf mittels Thermoöl findet eine Trennung der Kreisläufe zwischen der Wärme- und Stromerzeugungseinheit statt.

Bei der hydrothermalen Stromerzeugung sind Wassertemperaturen von mindestens 100 °C notwendig. Dagegen können die hydrothermalen Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 150 °C direkt zum Antrieb einer Turbine genutzt werden.

In Deutschland liegen dagegen die üblichen Temperaturen geologischer Warmwasservorkommen niedriger. Aus diesem Grund wurde das Thermalwasser über einen langen Zeitraum ausschließlich zur Wärmeversorgung im Gebäudebereich genutzt.

Die neu entwickelten Organic Rankine Cycle-Anlagen ermöglichen dagegen auch eine Nutzung von Temperaturen ab 80 °C zur Stromerzeugung. Diese Systemtechnologie arbeitet mit einem organischen Medium, das bei relativ geringen Temperaturen verdampft, wobei die Dampfergie über eine Turbine in mechanische Energie umgewandelt wird und letztlich durch den Generator elektrischen Strom erzeugt.

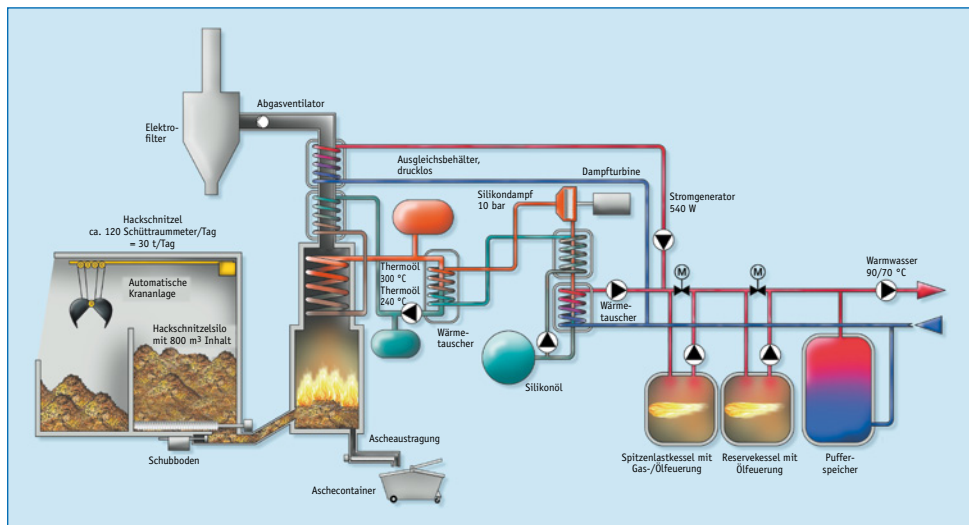
### Objektbeispiel:

#### Biomasse-ORC-Heizkraftwerk in Mainkofen/Niederbayern

Das Bezirksklinikum Mainkofen umfasst auf einem Areal von ca. 40 ha mehr als 90 Gebäude mit Krankenstationen, Verwaltung, Wirtschaftstrakte, Wohnungen für Angestellte und Kindergarten. Der Kern der ringförmigen Pavillonanlage wurde 1909 bis 1911 im Jugendstil errichtet.

#### Energiekonzept und Gebäudetechnik

Die Zielsetzung des Energiekonzeptes war es möglichst über den gesamten Jahresverlauf einen wirtschaftlichen, technisch und ökologisch optimalen Betrieb des mit Biomasse befeuerten ORC-Prozesses zu gewährleisten. Die Holzfeuerungsanlage mit einer Leistung von 3,5 MW wandelt täglich ca. 70 m<sup>3</sup> Hackschnitzel in Strom und Wärme um. Hierzu wurde der Brennstoffvorrat für mindestens sechs Tage im Volllastbetrieb ausgelegt.



**Abb. 3-37:** Funktionsschema ORC-Kraftwerk Mainkofen (Quelle: Hofbauer-IP-Deggendorf)

Der Wärmeabsatz von Biomasseanlagen wird insbesondere in den Sommermonaten naturgemäß stark gemindert und nur noch zur Warmwasserbereitung bereitgestellt. Aus diesem Grund müssen die Biomassewärmeerzeuger im Teillastbetrieb gefahren bzw. ganz abgeschaltet werden. Letztendlich fordert gerade diese Problematik zu Innovationen auf, die Biomasseanlagen technologisch zur Kühlung und Raumklimatisierung zu verwenden.

Das Zukunftsziel wird es sein, bei der energetischen Nutzung von Biomasse auch die Möglichkeiten zur Auskopplung von Kälte umzusetzen und somit die Chancen und Grenzen einer energetischen Gesamtnutzung, d. h. gleichzeitigen Nutzung von Strom, Wärme, Dampf und Kälte zu ermöglichen. Die abschnittsweise kontrollierte Verbrennung soll sicherstellen, dass das regenerative Brennmaterial nach Möglichkeit rückstandslos und mit sehr geringen

Schadstoffemissionen belastetes Abgas umgewandelt wird. Damit die energetische Energienutzung noch optimaler genutzt wird, wurde im Abgasstrom des Biomassewärmereizers ein Rauchgaseconomiser integriert. Mit dieser Brennwertnutzung wird indirekt die Rauchgasenthalpie ausgenutzt, wobei eine zusätzliche Wärme von 500 kW zur Verfügung steht.

Das Biomasseheizkraftwerk versorgt das gesamte Klinikum mit Energie und deckt einen Wärmebedarf von mehr als 20 Mio. kWh pro Jahr durch die Energienutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Zudem ist es die erste Anlage der öffentlichen Hand in Deutschland, deren nachgeschaltete Turbine Strom aus Biomasse erzeugt. Die Verstromung aus Biomasse erfolgt nach dem sogenannten ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle), das auf dem Grundprinzip einer Dampfkraftanlage mit Wasser basiert. Beim ORC-Verfahren wird jedoch anstelle von Wasser ein organisches Medium, z. B. Silikonöl, verwendet, das bei einer tieferen Temperatur siedet. So können für das Biomasseheizkraftwerk thermische Parameter erreicht werden, die sich im Bereich von rund 300 °C und 10 bar bewegen. Durch den Einsatz eines flüssigen Thermoöls im Wärmereizer und der Trennung zwischen Verbrennungsanlage und Stromerzeugungseinheit entfallen die hohen Kosten und Betriebsaufwendungen eines Dampfwärmereizers. Die Vorteile dieser Systemlösung bestehen in der hohen Verfügbarkeit, einer unüberwachten Betriebsweise, geringen Unterhaltskosten sowie einem problemlosen Teillastbetrieb.

**Tab. 3-16:** Referenzprojekte mit ORC-BHKW (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt                      | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|--|---|--|
| Stadtwerke Oerlinghausen bei Bielefeld | <p>ORC-Holzheizkraftwerk (HHKW) mit Silikonöl (synthetische Thermoöl »Therminol 66«) als Arbeitsmedium wird das Wasser auf Temperaturen von 280 bis 300 °C erhitzt.</p> <p>Die ORC-BHKW-Anlage hat eine thermische Leistung von 3300 kW und eine elektrische Leistung von 550 kW und besteht aus einem vollautomatisch mit Holz betriebenen Wärmereizer mit Vorschubrostfeuerung.</p> <p>Der elektrische Wirkungsgrad des Asynchrongenerators beträgt 16,7 % bei einer Leistung von 650 kW<sub>el</sub>. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 71,7 %. Der Nutzungsgrad der Gesamtanlage (thermisch und elektrisch) liegt bei ca. 86 %.</p> | <p>Der Dampfdruck beträgt lediglich ca. 1 bar und der Siedepunkt liegt bei 359 °C. Innerhalb des Organic Rankine-Kreislaufs treibt der Dampf des Silikonöls (Octamethyltrisilixan) bei Temperaturen von ca. 240 °C und einem Druck von ca. 8 bar eine einstufige Axialturbine mit 3000 min<sup>-1</sup> an. Durch die Mehrfachnutzung der Energie- und Massenströme erreicht das Holzheizkraftwerk (HHKW) eine thermische Leistung von 3300 kW<sub>th</sub>.</p> |

Fortsetzung Tab. 3-16

| Projekt/Architekt                  | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten  |
|------------------------------------|--|---|
| Biomasse-Fernheizkraftwerk Lienz/A | Kraft-Wärme-Kopplung auf ORC-Basis. Mit der Biomasse (Rinde, Sägespäne, Hackgut) und dem Einsatz von Solartechnologie werden 60.000 MWh/a Wärme und 7200 MWh/a Strom erzeugt. Die Gesamtlänge des Fernheiznetzes liegt bei 37 km und versorgt ca. 900 Verbraucher mit Wärme. | Mit dem neuen ORC-BHKW wurden bis zu 900 umweltbelastende Einzelheizungen stillgelegt und daher eine Primärenergieeinsparung von 7.800.000 Liter Heizöl/Heizperiode erreicht. |

### 3.4.3.4 Kalina-Technologie

Beim Kalina-Verfahren, das von dem russischen Ingenieur Alex Kalina in den 1970er Jahren entwickelt wurde, handelt es sich um ein Alternativverfahren zur ORC-Technologie, bei dem zur Energiegewinnung als Wärmeübertragungsverfahren ein niedrig siedendes Medium (Dampf) erzeugt wird. Hierbei kann als Arbeitsmittel z. B. das Zweistoffgemisch Ammoniak und Wasser verwendet werden.

Kalina entwickelte einen Kreislauf, bei dem die Wärme des aus der Tiefe geförderten Wassers an ein Ammoniak-Wasser-Gemisch übertragen wird. Der jetzt schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen entstehende Dampf wird dann, analog zum ORC-Prozess, zum Antrieb einer Turbine genutzt. Im Unterschied zum ORC-Prozess erfolgt die Wärmeübertragung nicht durch ein einziges Arbeitsmittel, sondern durch ein Zweistoffgemisch aus Ammoniak und Wasser. Im Gegensatz zu reinen Arbeitsmedien wie Wasser oder organische Medien siedet das Ammoniak-Wasser-Gemisch über einen Temperaturbereich mit vorgegebenem Druck.

Es kann aus diesem Grund beim Durchströmen der Wärmeübertrager mehr Energie übertragen als dieses mit reinen Arbeitsmedien der Fall wäre. Dementsprechend liegt auch der Wirkungsgrad eines Erdwärmekraftwerks mit Kalina-Technologie deutlich höher als beim ORC-Prozess und ermöglicht auch bereits bei niedrigen Temperaturen gute Wirkungsgrade. Zudem deckt das Kalina-Verfahren die unteren Temperaturbereiche noch besser ab als der ORC-Prozess. Dadurch kann schon bei geringeren Bohrtiefen ein Erdwärmekraftwerk betrieben werden.

Für Anlagen im kleineren Leistungsbereich, d. h. < 200 kW ist auch der Einsatz von motorischen Antrieben wie Stirlingmotoren denkbar.

### 3.4.3.5 Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke

Unzweifelhaft ist, dass die neuen umweltfreundlichen Brennstoffzellen-BHKW bevorzugt in Kliniken und Industriebetrieben eingesetzt werden. Neben der Energieeffizienz wird die geräuscharme Brennstoffzelle auch als Notstromaggregat anstatt eines Diesel-Verbrennungsmotors eingesetzt.

## 1. PEM-Brennstoffzellen-BHKW

### *Objektbeispiel:*

Heizwerk Berlin-Treptow mit 250 kW-PEM-Technologie (Gemeinschaftsprojekt eines Konsortiums der Energieversorger Bewag AG & Co. KG Hamburgische Elektrizitäts-Werke AG, Electricité de France, PreussenElektra AG und VEAG Vereinigte Energiewerke Aktiengesellschaft), Produkthersteller: Alstrom und Ballard.

Im Innovationspark »Brennstoffzelle« der Bewag AG & Co. KG, wurde auf dem Gelände des Berliner Heizwerkes Treptow eine Demonstrationsanlage eines 250 kW PEM-Brennstoffzellen-BHKW in Betrieb genommen, die ihren Probetrieb über eine Laufzeit von 36 Monate absolviert hat.

Bei diesem Brennstoffzellen-BHKW handelt es sich um eine stationäre Anlage mit protonenleitender Membrane, d. h. um die PEM-Technologie, die gleichzeitig Strom und Wärme mit einer installierten elektrischen Leistung von bis zu 250 kW und einer Wärmeleistung von ca. 230 kW erzeugt. Die Demonstrationsanlage im Heizwerk Treptow hat optimale Voraussetzungen für einen ganzjährigen Betrieb angeboten, um über einen mehrjährigen Probelauf Erkenntnisse über den wirtschaftlichen Einsatz dieser Technologie zu gewinnen. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus den Komponenten:

- Gasprozesssystem mit Reformer
- Shift-Konverter mit zweistufiger CO-Konvertierung
- PEM-Brennstoffzelle zur Erzeugung von Strom und Wärme
- Wechselrichter (Inverter) zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom
- Kontrolleinheit zur Steuerung der Anlage.

Der Betriebsdruck von bis zu 4 bar ermöglicht eine kompakte Bauweise mit geringen Abmessungen und minimalem Gewicht. Für die Brennstoffzellenstapel (Stacks) resultieren gegenüber dem drucklosen Betrieb eine größere Leistung und ein höherer Wirkungsgrad. Nachteilig wirken sich neben dem trockenlaufenden Erdgasverdichter auch der ölgeschmierte Turbolader und die komplexe Prozessführung aus.

Zusätzlich wird in der PEM-Brennstoffzellenanlage noch »solarer« Wasserstoff verwertet, der mit einer Photovoltaikanlage und einem zugehörigen Elektrolyseurzeugt wird. Für den Elektrolyseur wurde eine auf dem Dach des Heizwerkes Treptow installierte Solarthermieanlage mit einer Leistung von 10 kW installiert.

Als Prototyp erfüllt die 250 kW PEM-Brennstoffzellenanlage den Anspruch an einen wasserautarken Betrieb nur eingeschränkt. Zur Deckung des Bedarfs im Teillastbetrieb ist der Einsatz von Zusatzwasser (Deionat) erforderlich. Der integrierte Wärmeübertrager ermöglicht die Auskopplung von Heizwärme in den Rücklauf des angeschlossenen Fernwärmenetzes. Bei fehlendem Wärmebedarf stellt ein Notkühler die Rückkühlung des Systems sicher.

Einschließlich der Testphase wurde im Probetrieb über die Laufzeit von 36 Monate mit rund 6200 Betriebsstunden 639 MWh an elektrischem Strom und 621 MWh an Wärme erzeugt.

Bei Volllast hat die Anlage eine Wärmeleistung von 250 kW und einen Nettowirkungsgrad von 35,2 % erreicht. Der Anlagenwirkungsgrad hat über ca. 50 % des Leistungsspektrums einen nahezu konstanten Verlauf ergeben. Der als das Verhältnis von erzeugter Ener-



gie (elektrischer Strom und Wärme) zur zugeführten Energie definierte Nutzungsgrad beträgt bei Volllast 75,2 %. Dieser Nutzungsgrad nimmt bis 50 % der Nennleistung annähernd linear ab, primär beeinflusst durch eine sinkende Wärmeerzeugung. Analog dazu entwickelt sich die Stromkennziffer, d. h. das Verhältnis von Strom- zu Wärmeerzeugung und erreicht bei Werten von ca. 1,1 ihr Maximum.

Nach Ansicht der Betreiber erfüllen die Messdaten die Erwartungen dieser innovativen Technologie.

## 2. MCFC- oder SOFC-Brennstoffzellen-BHKW

Die alternativen Brennstoffzellentypen wie etwa die Schmelzkarbonat- oder Festoxid-Brennstoffzelle haben eine rasante technische Entwicklung erfahren und werden konsequent auf die Serienfertigung vorbereitet. Insofern stellt sich auch für die phosphorsaure Brennstoffzelle die Frage, ob sie in naher Zukunft noch eine echte Marktreife erreichen kann oder ob sie von den konkurrierenden Technologien verdrängt wird.

Die Integration von Brennstoffzellen in Fernwärmenetze hängt primär von der auskoppelbaren Temperatur ab. MCFC- oder SOFC-Anlagen können wegen der Betriebs- und Ablufttemperatur problemlos auf die Primärseite des Heizwassernetzes aufgeschaltet werden. Demgegenüber sind die PEMFC-Brennstoffzellenanlagen wegen des niedrigen Temperaturgefälles nicht in die Kunden-Heizungsanlage zu integrieren. Gerade aus diesem Grund wird für Einzellösung der Einsatz von PEMFC-Brennstoffzellen-Heizgeräten der Vorzug gegeben.

*Objektbeispiel:* 250 kW-PEM-Brennstoffzellen im Pariser Vorort Chelles

Die französischen Energieversorger Gaz de France und Électricité de France haben im Pariser Vorort Chelles eine erdgasbetriebene ›HotModule‹-Brennstoffzelle von MTU CFC-Solutions GmbH installiert und in Betrieb genommen. Die 283 Wohnungen der französischen Wohnungsbaugesellschaft OPAC (Office Public d'Aménagement et de Construction) wurden mit Wärme versorgt. Die von der Stadt geförderte Wohnanlage liegt in der Rue Brançion, in der Nähe des Port de Versailles.

Im Gegensatz zu dem aus drei Wärmeerzeugern bestehenden Heizwerk liefert das HotModule als Kraft-Wärme-Kopplungsanlage nicht nur 180 kW thermische Energie, sondern auch bis zu 200 kW elektrischen Strom. Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) überzeugt zudem mit einem vergleichsweise hohen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 47 %. Die Wärme wird in den Wohnungen genutzt, der Strom gelangt in das Netz der EDF (Électricité de France) und wird von dem Unternehmen vergütet.

Der Betrieb des HotModules wird, entsprechend der französischen Bestimmungen für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, jeweils von November bis März erfolgen. Dennoch zahlt es sich aus, denn seitens der OPEC wird eine Senkung der Energiekosten um ca. 15 % prognostiziert. Da die elektrochemischen Wandler im Gegensatz zu den Blockheizkraftwerken mit Verbrennungsmotoren oder Turbinen nahezu keine Geräusche entwickeln, ist deren Einsatz im Wohnungsbau besonders vorteilhaft.

Zudem ist mit der HotModule-Brennstoffzelle auch ein weiteres Plus beim innerstädtischen Einsatz in der Form zu verzeichnen, dass die erdgasbetriebene Brennstoffzelle im Vergleich zu den Gasmotoren aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades weniger Kohlendioxid und praktisch keine Schadstoffemissionen produziert. Aus diesem Grund kann hier auch eine Abluftbelastung und nicht eine Abgasbelastung definiert werden.



## Biogas und Brennstoffzellen

Die Brennstoffzellen benötigen zur Wärme- und Stromproduktion Wasserstoff. Da Wasserstoff in der Natur in Reinform nicht vorkommt, wird dieser aus anderen Energieträgern gewonnen, z. B. aus Erdgas oder auch aus Biogas. Da Biogas durch Vergärung von feuchtem organischem Material entsteht, bilden sich beim Zersetzungsprozess die Hauptbestandteile Wasser, Kohlendioxid und Methan. Wenn das Biogas nun vom Kohlendioxid und Wasser gereinigt wird, kann es ins Erdgasnetz eingespeist werden.

Insofern wurde das Bioerdgas erzeugt. Die Brennstoffzelle wiederum nutzt den Wasserstoff, der im Methan gebunden ist. Auf diese Weise lässt sich Biogas auch in Brennstoffzellen nutzen, z. B. für die Vorhaltung der Gebäudewärme und den elektrischen Stromanteil. Derzeit steckt der technologische Prozess zur großflächigen Nutzung von Biogas in der Kombination mit Brennstoffzellen noch im Prototypenstand.

## MCFC-Brennstoffzellen-BHKW mit Klärgas

Klärgas entsteht bei der Zersetzung von organischem Klärschlamm. Die im Gasgemisch aus Kohlendioxid und Methan enthaltene Energie wird bisher in der Regel nur zum Teil zur Stromerzeugung genutzt. Wenn jedoch die Brennstoffzellentechnologie ins Spiel kommt, wird Strom aus Klärgas zu 100 % regenerativ und mit hohen Wirkungsgraden herstellbar.

Klärgas enthält in Spuren Schwefel, Halogene, leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe und Siloxane, die bereits in geringsten Konzentrationen die Brennstoffzelle zerstören können und daher entfernt werden müssen. Bevor das Klärgas in die Brennstoffzelle eingespeist werden kann, muss es gereinigt, befeuchtet, auf ca. 650 °C erhitzt und in Kohlendioxid und Wasserstoff umgewandelt werden.

Die Hochtemperatur-MCFC-Brennstoffzelle als HotModule ist wie geschaffen für die Anwendung von Bio-, Klär- oder Synthesegas. Die konventionellen Kläranlagen zeichnen sich derzeit noch als Energieverbraucher aus; mit der MCFC-Brennstoffzelle werden diese Anlagen jedoch zu Energieerzeugern. Ein MCFC-Brennstoffzellen-BHKW mit seiner gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung stellt sich aus diesem Grund für den Einsatz im Klärwerkbereich als ideale Systemlösung dar. Die im Prozess erzeugte Wärme kann zudem für den Prozess der Klärgasentstehung rückgeführt und genutzt werden. Dieses betrifft insbesondere die Beheizung der Faulgasbehälter, die auf eine ständige Zufuhr großer Wärmemengen angewiesen sind. Die Restwärme dient zur Beheizung der auf dem Betriebsgelände befindlichen Büro- und Nebengebäude. Die Stromproduktion deckt zudem in der Regel rund 50 % des in der Kläranlage anfallenden Bedarfs.

Derzeit laufen die MCFC-Brennstoffzellen direkt mit Erdgas. Ein technischer Fortschritt zeichnet sich jedoch erst dann ab, wenn auch eine effektive Nutzung der Sekundärgase erfolgt. Die Sekundärgase enthalten bei der Nutzung von Bio-, Klär- oder Synthesegasen noch unangenehme Bestandteile wie Schwefel und Chlor sowie bis zu 30 % unverbrennbare Komponenten (Inertgase), die auch noch aufgeheizt werden müssen. Hierdurch wird einerseits der Brennwert herabgesetzt und andererseits die Anwendung komplizierter. Anders verhält es sich bei der Hochtemperatur-Brennstoffzelle, der die hohen Inertgasanteile nichts ausmachen, weil diese zur Kühlung der Brennstoffzelle beitragen. Mit Arbeitstemperatur von 650 °C ist die Hochtemperatur-Brennstoffzelle auch wie geschaffen für die Anwendung

von Biogas. Allerdings müssen auch hier die Schwefel- und Chlorbestandteile vorher mittels einer vierstufigen Gasreinigungsanlage herausgefiltert werden.

Für Deponie- und Klärgas gilt das gleiche. Der Müll müsste nicht wie heute üblich mit einem geringen Nutzeffekt verbrannt werden, sondern die entstehenden Gase können in der Kraft-Wärme-Kopplung mittels Hochtemperatur-Brennstoffzellen effektiv zu hochwertiger Nutzenergie umgewandelt werden. Die interne Reformierung, also das Abspalten des Wasserstoffes von Erdgas und Wasser funktioniert nur bei Temperaturen von mehreren hundert Grad.

*Objektbeispiel:* Biogas und Brennstoffzelle in der Vergärungsanlage im Kompostwerk in Leonberg.

In der Vergärungsanlage Leonberg dient das Biogas aus Haushaltsabfällen eine Karbonatschmelze-Hochtemperatur-Brennstoffzelle vom Typ HotModule als Brennstoff. Das Biogas wird aus sämtlichen Bioabfällen erzeugt, die von den Einwohnern des Landkreises in die grüne Tonne (Biotonne) entsorgt werden. Das bei der Vergärung erzeugte Biogas dient dem Betrieb von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). Der Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist und mit ca. 15 Ct/kWh vergütet. Die Wärme wird zur Faulturmheizung und zum Trocknen der Gärreste verwendet.

Zur Biogaserzeugung wird der Abfall zunächst zerkleinert und gesiebt sowie von eventuellen Metallstücken befreit. Dann wird der so entstandene Brei mit dem Inhalt des Fermenters gemischt. Dort verweilt er im Durchschnitt drei Wochen, bevor er den Faulturm als Gärrest verlässt. Der wird getrocknet und zu Kompost weiterverarbeitet. Die thermophile Vergärung der Biomasse erfolgt bei 50 bis 55 °C in einem ca. 25 m hohen Stahlfermenter, der mit Abwärme aus der Stromerzeugung beheizt wird. Das erzeugte Gasgemisch besteht in etwa zu 45 bis 65 % aus energiereichem Methan (CH<sub>4</sub>) und zu 35 bis 55 % aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Ein 780 m<sup>3</sup> großer Speicher puffert das Biogas und gleicht Schwankungen zwischen Verbrauch und Erzeugung aus.

Im August 2006 ging die Hochtemperatur-Brennstoffzelle in den Probetrieb und nahm im Oktober des gleichen Jahres den regulären Betrieb auf. Bis Jahresende 2006 lief die Brennstoffzelle mit wechselnder Last im Bereich von ca. 60 bis 100 % und erzeugte dabei etwa 250.000 kWh Strom. Vom 2. Oktober 2006 bis Mitte 2007 war diese Brennstoffzelle etwa mit 5000 Stunden in Betrieb und speiste bis dahin etwa 625 MWh elektrischer Energie ins öffentliche Stromnetz.

Das HotModule ist für eine elektrische Leistung von 240 kW und eine thermische Leistung von 170 kW ausgelegt. Die auf einem Temperaturniveau von ca. 400 °C anfallende Wärme wird zum Trocknen der Gärreste verwendet.

### **MCFC-Brennstoffzelle als Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung**

Ein weiter durchdachtes Anwendungspotenzial der MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) zeigt sich in der Form, dass die Brennstoffzellen keine isolierten Energiewandler sind, sondern auch als Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung vor allem in Kliniken eingesetzt werden können. Aufgrund einer mehrstufigen Ausnutzung der Hochtemperaturwärme kann das Wärmeverhältnis (COP-Zahl) von 0,65, was typisch für konventionelle Absorptionskältemaschinen ist, auf 1,15 gesteigert werden. Ein enormes Potenzial, denn die gleiche Wärmeleistung ermöglicht eine um rund 65 % höhere Kälteerzeugung.



**Abb. 3-38:** Gebäudeaussenansicht Festo-Werke St. Ingbert/Saarland (Quelle: Festo Werke)

#### *Objektbeispiel:*

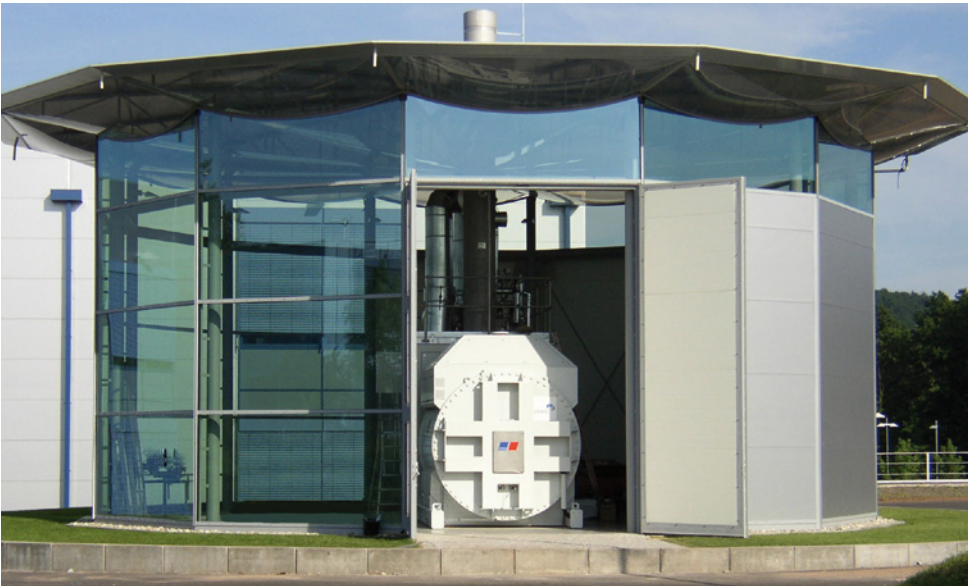
Festo AG & Co. KG in St. Ingbert/Saarland.

Im deutschen Festo Werk St. Ingbert sorgt ein innovatives Energiesystem aus Brennstoffzellenblock, Blockheizkraftwerk und Photovoltaikanlage für Energieeffizienz und für eine gleichzeitige CO<sub>2</sub>-Schadstoffreduzierung. Die unterschiedlichen innovativen Technologien versorgen im Zusammenspiel am eine 29.000 m<sup>2</sup> große Produktionshalle mit Druckluft, Strom, Wärme und Kälte, wobei sich die autarke Energieversorgung automatisch dem aktuellen Energiebedarf anpasst. Die Adsorptionskältemaschine kann die Abwärme der Brennstoffzelle in Kälte umwandeln und diese zum Klimatisieren bereitstellen. Desweiteren wird die Wärme des HotModules zum Beheizen der Produktionsstätte und Büroräume verwendet.

Die RWE Fuel Cells GmbH, Essen, und die Festo AG in St. Ingbert/Saarland haben 2005 eine HotModule-Brennstoffzelle in Betrieb genommen. Damit kam weltweit zum ersten Mal eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC-Molten Carbonate Fuel Cell) in der Automatisierungsindustrie zum Einsatz. Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle produziert Strom und Wärme und dient gleichzeitig zur Beheizung der Büroräume und der Produktionsstätte. Über einen Wärmeübertrager können Brauchwarmwasser und Heizwasser erwärmt werden. Zudem kann die Abwärme der Brennstoffzelle mittels einer Adsorptionskälteanlage auch in Kälte umgewandelt und zur Klimatisierung genutzt werden.

Die 8 m lange und 3 m hohe Hochtemperaturbrennstoffzelle erwirtschaftet eine elektrische Leistung von 225 kW und eine thermische Leistung von 180 kW. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei ca. 80 % und der elektrische Wirkungsgrad bei 47 %.

Aufgrund seines hohen Wirkungsgrades und seiner äußerst niedrigen Schadstoffemissionen ermöglicht das HotModule eine hocheffiziente und gleichzeitig umweltfreundliche Energienutzung. Verglichen mit den konventionellen Verbrennungsmotoren emittiert das



**Abb. 3-39:** HotModule-Zentralgebäude Festo Werke St. Ingbert/Saarland (Quelle: Festo AG)



**Abb. 3-40:** HotModule-Brennstoffzelle  
(Quelle: MTU Onsite Energy GmbH; Fuel Cell Systems-München)

HotModule rund 30 % weniger CO<sub>2</sub>. Die Brennstoffzelle eignet sich für die Energieversorgung von Gewerbe- und Industrieunternehmen und stellt die Energie dezentral genau dort bereit, wo sie benötigt wird. Aufgrund dieser Konzeption werden die energetischen Transportverluste vermieden.

**Tab. 3-17:** Referenzprojekte für Anlagen mit HotModule-Brennstoffzellen

(Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|--|---|--|
| HCH HafenCity Hamburg GmbH                                 | HotModule-Brennstoffzellenanlage mit 170 kW thermische und 245 kW elektrische Leistung, MTU CFC Solutions GmbH, Ottobrunn                                 | Der zukunftsweisende, ökologische Technologiemix besteht aus der Wärmeversorgung, der Fernwärme, motorischen Blockheizkraftwerken (BHKW), solarthermischen Anlagen und dem HotModule |
| MTU Friedrichshafen GmbH                                   | HotModule-Brennstoffzellenanlage mit 180 kW thermische und 250 kW elektrische Leistung, MTU CFC Solutions GmbH, Ottobrunn                                 |  |
| Rechenzentrum der T-Systems im EURO-Industriepark, München | HotModule-Brennstoffzellenanlage mit 150 kW thermischer und 245 kW elektrischer Leistung. Zum ersten Mal mit Biomethan; MTU CFC Solutions GmbH, Ottobrunn | Zusammen mit einer Absorptionskältemaschine wird Wärme, Strom und Klimakälte bereitgestellt.   |

### Highlight: KWKK-System mit HotModule

Die MTU-Brennstoffzelle HotModule kann idealerweise auch zum Problemlöser für Rechenzentren und Sendeanlagen (Basic- und Multi-Switchingstationen oder Fernmeldetechnik) in Form der Energieversorgung (KWKK) und als Notstromaggregat sowie zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) eingesetzt werden. Hierbei wird die Klimakälte über einen Absorber erzeugt.

### 3.4.4 Förderungen und normative Rahmenbedingungen

Die gesetzliche Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung soll dazu beitragen, die Klimaschutzziele zu erreichen. Das KWK-Gesetz tritt daher auch für die Förderung von Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplung ein. Die durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK-Gesetz) vom 19. März 2002 geschaffenen Anreize reichen jedoch kurz- und mittelfristig nicht aus, um zukünftige Technologien wie Brennstoffzellen breit in den Markt einzuführen, oder die Entwicklungskosten wenigstens bis hin zur Marktreife zu decken. Durch den Einsatz einer Kleinst-KWK-Anlage kann der Betreiber seine Kosten um bis zu 50 % reduzieren, weil der Strom aus der eigenen KWK-Anlage preiswerter ist als der fremdeingespeiste Strom vom



Energieversorger. Die Stromeigenerzeugerkosten liegen bei 6 bis 10 Ct/kWh. Zudem erhält der Betreiber vom Netzbetreiber für den Strom, den er in das öffentliche Netz einspeist, pro kWh eine marktübliche Einspeisevergütung und nach dem KWK-Gesetz für die Dauer von zehn Jahren zudem einen Bonus von 5,11 Ct/kWh. Insofern handelt es sich um insgesamt zwischen 7 und 10 Ct/kWh. Letztlich wird auch noch die Mineralölsteuer und Ökosteuern für den Brennstoff vollständig zurückerstattet und der selbsterzeugte Strom ist von der Stromsteuer ausgenommen.

### **Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)**

Nach dem EEG erhalten sämtliche KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 150 kW eine Grundvergütung von derzeit 10,99 Ct./kWh eingespeistem Strom. Hinzu kommen bei Nutzung der abgegebenen Wärme ein KWK-Bonus sowie ein Technologiebonus für die Nutzung der innovativen Stirlingtechnologie in Höhe von jeweils 2 Ct./kWh. Aus diesem Grund können für die Wirtschaftlichkeitsberechnung derzeit eine Vergütung für holz-befeuerte Klein-KWK-Anlagen mit 14,99 Ct./kWh zum Ansatz gebracht werden. Auch die Stromerzeugung mittels Solarthermie (Sonne) wird bei der Einspeisung in das öffentliche Netz mit Höchstsätzen vergütet. In beiden genannten Fällen ist das über 20 Jahre (zuzüglich des verbleibenden Rests des Inbetriebnahmejahres) vom Netzbetreiber gewährleistet.

Seit Juni 2001 gibt es als Ergänzung zum EEG die Biomasseverordnung, die festlegt, welche Stoffe als Biomasse gelten und gefördert werden. Die Einspeisevergütung erfolgt je nach Größe, Anlagentyp und Art der Biomasse sowie über einen Vergütungszeitraum von 20 Jahren.

Die Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung trat am 1. Januar 2010 in Kraft und regelt, welche Bedingungen die flüssige Biomasse erfüllen muss, um eine EEG-Vergütung zu erhalten.

### **Förderungen und Zuschüsse nach dem KWK-Gesetz**

Das neue KWK-Gesetz regelt die Abnahme und Vergütung von Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, weil diese Technologie als umweltfreundlich gilt und weil aus der zugeführten Primärenergie in einem Umwandlungsprozess hohe Wirkungsgrade und zwei unmittelbar nutzbare Energiearten entstehen. Seit April 2002 erhalten daher die Betreiber von KWK-Anlagen einen gesetzlich definierten Zuschlag für den Strom, den der Generator in das Netz der öffentlichen Elektrizitätsversorgung einspeist. Nach § 5 des KWK-Gesetzes sind die Elektrizitätsversorgungsunternehmen zum Anschluss und zur Abnahme verpflichtet.

Die Preisregelung besteht hierbei aus einem variablen Element und einem gesetzlich fixierten Anteil. Während der Zuschlag ein fester Betrag ist, muss der Preis für die eigentliche Stromvergütung zwischen Anlagen- und Netzbetreiber vereinbart werden.

Im Wohnungsbau wird die Gesamtenergieeffizienz primär über das CO<sub>2</sub>-Gebäude-sanierungspogramm gefördert. Hier werden zunächst die bauphysikalischen Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs gefördert. Mit der Reduzierung des Energiebedarfs verringert sich als Folge auch die Heizlast. Dies hat wiederum den Vorteil, dass die Heizungsanlage im Leistungsbereich kleiner dimensioniert werden kann. Auf dieser Basis liegt hier auch der Vorteil des Einsatzbereiches der Kleinst-KWK-Aggregate, die mit Biomasse betrieben werden, oder der monovalent betriebenen Wärmepumpen. Zudem besteht hier auch noch ne-

ben der Wärmeerzeugung der Vorteil einer gesicherten Einspeisevergütung für den erzeugten Strom. Letztlich können auf diese Art und Weise dem Nutzer im Falle einer Sanierung umfangreiche Fördermöglichkeiten angeboten werden.

Sollte bei der Kraft-Wärme-Kopplung Biomasse zum Einsatz kommen, dann wird hier primär die hohe Einspeisevergütung interessant. Bei der Biomasse im Sinne des Gesetzes kann es sich, insbesondere für den kleineren Leistungsbereich, um gasförmige Biomasse wie Erdgas, aber auch Bio-, Gruben-, Klär- und Deponiegas oder Flüssiggas (Propan) handeln oder auch um flüssige, wie Heizöl, Pflanzenöl (Rapsöl), oder feste Biomasse, wie Holz.

### **KWK-Bonus für Kleinanlagen**

KWK-Bonus für Kleinanlagen bis 50 kW beträgt exakt 5,11 Cent zzgl. Entgelt für dezentrale Netzeinspeisung, je nach Netzbetreiber zwischen 0,04 bis 2 Cent, Pflanzenöl betriebene Kleinst-KWK-Systemvarianten erhalten zusätzlich einen NawaRo-Zuschlag von 6 Ct./kWh.

Wenn zur Befeuerung der Biomasse-KWK mittels Stirlingmotor nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) nach den Bestimmungen des EEG eingesetzt werden, wie z. B. Waldrestholz, dann erhält der Nutzer einen zusätzlichen Bonus in Höhe von 6 Ct./kWh, sodass daraus eine maximale Stromvergütung von 20,99 Ct./kWh resultiert.

Hinweis: Die NawaRo-Pellets sind um ca. 3 Ct./kg teurer.

Die effiziente Erzeugung mit einer Kleinst-KWK wird aufgrund ihrer Bedeutung für den Umwelt- und Ressourcenschutz im Rahmen der ökologischen Steuerreform gefördert. Während konventionell erzeugte Energie verteuert wurde, erhalten die Betreiber von Kleinst-KWK-Anlagen beträchtliche steuerliche Vorteile. Der Erlös (Stand 2010), den der Betreiber aus dem Betrieb einer Kleinst-KWK-Anlage erzielen kann, setzt sich aus nachfolgenden Einzelpositionen zusammen:

- eingesparte Stromkosten (ca. 15 bis 20 Ct./kWh)
- Befreiung von der Stromsteuer (2,05 Ct./kWh)
- Vergütung für die Stromeinspeisung (ca. 2 bis 5 Ct./kWh plus 5,11 Ct./kWh als KWK-Bonus)
- Erstattung der Energiesteuer (Erdgas: 0,55 Ct./kWh; Flüssiggas: 60,60 €/1000 kg).

Darüber hinaus wird die Investition einer Kleinst-KWK-Anlage mit zinsgünstigen Krediten und Investitionszuschüssen im Rahmen des CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) gefördert. Hinzu kommen die Förderprogramme der Länder sowie die regionale Initiativen der Energieversorger.

### **Impulsprogramm**

Das Impulsprogramm ist Bestandteil der nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums, mit der die großen Potenziale zur CO<sub>2</sub>-Einsparung in der Breite erschlossen werden sollen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Maßnahmen, die sich durch geringere Energiekosten für die Verbraucher lohnen. Der Zuschuss für Kleinst-BHKW setzt sich aus einer Basisförderung und einem Umweltbonus für einen besonders geringen Schadstoffausstoß zusammen. Die genaue Förderhöhe wird dabei gestaffelt in Abhängigkeit von der Stromproduktion ermittelt.

Die Höhe der Förderung macht das Bundesumweltministerium darüber hinaus von der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Minderung abhängig. Je länger das Kleinst-KWK-Aggregat im Jahr in Betrieb ist, desto höher sind die Stromproduktion und damit auch die Einsparungen. Um den gesamten Zuschuss zu erhalten, müssen wenigstens 5000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr erreicht werden. Ist die Auslastung geringer, wird der Fördersatz anteilig im Verhältnis zur Zielvorgabe gewährt. Eine Anlage mit 4000 Vollbenutzungsstunden erhält also immer noch 80 % der maximalen Förderung.

Diese lineare Förderung orientiert sich an den breiten Einsatzmöglichkeiten der Kleinst-KWK-Anlagen. Strom und Wärme können hier in großen Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Wohngebäuden bis hin zu Gewerbebetrieben, Schulen und Altenheimen kostensparend erzeugt werden. Der Wärmebedarf im Gebäude bestimmt die Laufzeit des Kleinst-KWKs und damit auch die Höhe der Förderung. Optimale Voraussetzungen können vor allem im Gewerbebereich erzielt werden. In Hotels und Fitnessstudios z. B. läuft ein Kleinst-KWK in der Regel deutlich länger als die geforderten 5000 Stunden. Aber auch Besitzer von Einfamilienhäusern können durch die lineare Förderung immer noch mit einem beträchtlichen Zuschuss rechnen.

Als zukunftsfähige Energietechnologie werden Kleinst-KWKs aber auch über den neuen Zuschuss hinaus gefördert. So erhalten die Betreiber für jede erzeugte Kilowattstunde Strom einen ›KWK-Bonus‹ von 5,11 Cent. Bisher wurde dieser nur für den ins Netz eingespeisten Strom gezahlt. Weiterhin wird die Energiesteuer für den verbrauchten Brennstoff erstattet. Dies sind z. B. bei Erdgas 0,55 Ct/kWh, was etwa 10 bis 15 % des Gaspreises entspricht! Darüber hinaus stehen im Rahmen des CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zinsgünstigen Kredite und weitere Investitionszuschüsse zur Verfügung.

Die Amortisationszeit hängt von der Betriebsdauer, den öffentlichen Fördergeldern und der Rüchspreisevergütung ab.

Die am 6. Juni 2008 vom Deutschen Bundestag verabschiedete KWK-Novelle räumt kleinen Blockheizkraftwerken für den häuslichen und gewerblichen Bereich erweiterte Chancen ein. Ziel ist es, das der Anteil des ökoverträglich produzierten elektrischen Stroms an der gesamten Elektrizitätsproduktion bis 2020 von derzeit 12 auf ca. 25 % verdoppelt wird. Das KWK-Gesetz, das zum 1. Januar 2009 in Kraft trat, fördert dann u. a. den Eigenbedarf und separat den Neuau von Nah- und Fernwärmenetzen. In der Vergangenheit musste der kommunale Netzbetreiber nur den Überschuss an den BHKW-Betreiber, nach Abzug dessen Eigenverbrauchs, vergüten.

Seit 2009 steht den dezentralen Strom-Wärme-Produzenten sowohl der Grundpreis als auch der KWK-Bonus für jede erzeugte Kilowattstunde zu. Einzig der Zählerstand am Stromzähler des BHKW entscheidet über die Höhe der Unterstützung. Ob der Strom jedoch in die eigene Waschmaschine fließt oder an die Allgemeinheit geht, spielt hier keine Rolle mehr.

Insofern verbessert sich die Wirtschaftlichkeit für den Investor erheblich. Zudem sind die bestehenden Anlagen, die ab der Gültigkeit des KWK-Gesetzes 2002 in Betrieb gegangen sind, sind praktisch mit neuen Anlagen gleichgesetzt. Damit dürfen auch diese Anlagen seit 1. Januar 2009 für den Eigenverbrauch die Zahlungen in Anspruch nehmen. Ein Investor, der z. B. im Jahr 2005 ans eigene Netz ging, darf seit 2009 noch für einen KWK-Zuschuss von sechs Jahren einplanen.



Die Verstromung aus Biomasse wird in der Regel mit der Bereitstellung der Wärme kombiniert. Hierbei handelt es sich für die Anwendung in Ein- und Mehrfamilienhäusern oder im Kleingewerbebereich um die Kleinst-BHKW, die zur Wärmeerzeugung dienen und gleichzeitig Strom ins Netz speisen.

### **Kombination der Förderprogramme**

Im Bereich der Kleinst-KWK wird insbesondere bei der Verstromung in Kombination mit Pellets die Technologie des Stirlingmotors umgesetzt. Darüber hinaus kommen im Pflanzenölbereich Verbrennungsmaschinen auf Basis von Dieselmotoren für Einspeisung in das Stromnetz zum Einsatz.

Die Gesamteffizienz im Wohnungsbau wird primär mit dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm gefördert, wobei hier zunächst bauphysikalische Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs gefördert werden. Mit der Reduzierung des Energiebedarfs verringert sich auch die Heizlast. Dieses hat in Folge den Vorteil, dass eine Heizungsanlage mit kleinen Leistungen zum Einsatz kommen kann. Was auch zur Folge hat, dass in diesem Sektor bevorzugt Wärmepumpen, etc. verwendet werden können, die monovalent betrieben werden können. Zudem können auch Kleinst-KWK-Aggregate eingesetzt werden, die sich mit Biomasse betreiben lassen. Hier bietet sich der Vorteil an, dass neben der Wärme- und Stromerzeugung auch eine gesicherte Einspeisevergütung erfolgt.

Dem Endkunden kann so insbesondere im Falle von Sanierungsmaßnahmen eine Palette an Fördermöglichkeiten angeboten werden.

Ein Vorteil für pelletsbefeuerte Stirling-KWK-Aggregate besteht darin, dass diese Konzipierung nicht unter das KWK-Gesetz, sondern unter das EEG fällt. Für Biomassestrom im kleinsten Leistungsbereich ist die Vergütung seit 2009 auf bis zu 22,67 Ct/kWh gestiegen, zumal die Stirlinggeräte auch noch den Technologiebonus erhalten. Ein Problem ergibt sich allerdings auch bei den Holzpresslingen: Als nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) und damit NawaRo-Bonus-fähige Pellets gelten nur solche, die von Holz stammen, das nicht anderwertig verarbeitet wird, wie Holz aus Durchforstungen, Sturm- und Käferholz. Da praktisch kein Unterschied zu den Pellets aus Spänen von Restholz besteht, kann der Hersteller für die NawaRo-Pellets einen buchungstechnischen Mengenausgleich geltend machen.

### **Kraft-Wärme-Kopplung im Ein- und Zweifamilienhaus**

Mit dem novellierten KWK-Gesetz und dem BMU-Impulsprogramm »Mini-KWK-Anlagen« wird nun auch zur Investition von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen eine Starthilfe geleistet.

Am 18. Juni 2008 hat die Bundesregierung zusätzliche »Richtlinien für die Förderung von Mini-KWK-Anlagen« mit einer elektrischen Leistung bis 50 kW erlassen. Wird das Klein-KWK-Aggregat ausschließlich mit regenerativen Brennstoffen angetrieben, dann wird der eingespeiste Strom nach dem EEG mit 10,23 Cent/kWh für Strom aus Biomasse vergütet.

Die neue attraktive Förderung gibt es zusätzlich zum Bonus nach dem KWK-Gesetz, das neuerdings auch den eigengenutzten Strom aus dem eigenen Kleinkraftwerk mit 6 Ct/kWh honoriert.

### 3.4.5 Wirtschaftlichkeit

#### 3.4.5.1 Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks (BHKW)

Die Ökonomie eines BHKW ist nur dann gegeben, wenn bei der Verstromung auch die thermische Energie genutzt wird. Zur Erstellung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist die Angabe der elektrischen Nettoleistung ( $P_{el}$ ) entscheidend, die definiert, wie viel Energie tatsächlich vom BHKW in das Stromnetz eingespeist wird. Die im Inneren des BHKW, d. h. direkt am Generator anfallende Leistung ist in der Regel höher, weil damit die Hilfsaggregate, wie Umwälzpumpen, Gebläse, etc., und die geräteeigene Steuerung versorgt werden. Definitionsgemäß trägt die elektrische Leistung ein negatives Vorzeichen, um zu verdeutlichen, dass dieser Energiestrom vom BHKW abgegeben wird. In der Praxis wird jedoch aus Gründen der Einfachheit der abgegebene Energiestrom stets positiv gezählt. Die Angabe der elektrischen Leistung erfolgt in der Einheit Watt oder in kW. Am Stromzähler wird jedoch nicht die Leistung, sondern die elektrische Arbeit in kWh gezählt und angezeigt. Dieser Wert entsteht durch die Multiplikation der Leistung mit der Zeit. Die elektrische Arbeit bildet die Grundlage zur Vergütung, wodurch an dieser Stelle ersichtlich wird, dass für die Wirtschaftlichkeit eines BHKW neben der Nettoleistung die Betriebszeit von entscheidender Bedeutung ist.

#### 3.4.5.2 Wirtschaftlichkeit einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Vorteilhaft und Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Kraft-Wärme-Kopplung sind möglichst:

- gleichmäßiger Wärmebedarf
- gleichzeitiger Bedarf an Strom und Wärme
- hohe jährliche Vollbenutzungsstunden (5000 bis 6000 h)
- günstige Brennstoffpreise im Verhältnis zum Strompreis.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der Einsatz einer KWK-Anlage insbesondere dann interessant, wenn sie im Betrieb auch die Funktion der Notstromversorgung übernehmen kann und damit die Investition in ein separates Notstromaggregat eingespart wird. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Betriebes einer KWK-Anlage werden durch die Investitions-, Brennstoff-, Wartungs- und Stromkosten sowie durch die Vollbenutzungsstunden bestimmt. Bei den gegenwärtigen Energiepreisen sind die Spielräume für die wirtschaftliche Betriebsweise einer KWK-Anlage erfahrungsgemäß eng. Zusätzlich bereitet die Sicherung der geplanten Vollbenutzungsstunden in ausgeführten Anlagen in der Regel Probleme. Die Wärmeabnahme muss während der gesamten Benutzungszeit gesichert sein. Aber genau an dieser Stelle gewinnt die zusätzliche Wärmeabnahme, auch über die Sommermonate, durch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung eine besondere Bedeutung.

Die Wirtschaftlichkeit einer KWK-Anlage wird neben den Kapitalkosten stets durch die konkurrierenden Kosten für den Brennstoffbezug und den Erlösen für Strom und Wärme bestimmt. Hierbei sind zusätzlich noch die gesetzlichen Vorgaben und Förderungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Gerade bei den innovativen Anlagensystemen sind die finanziellen Aufwendungen für die Beschaffung und Installation der Aggregate sowie für Wartung und In-

standhaltung als wesentliche Kostenpositionen kennzeichnend. Die ökologischen Vorteile gegenüber der reinen Heizwärme- oder Stromerzeugung sind eindeutig, denn der thermische Wirkungsgrad zwischen 50 bis 60 %, d. h. je nach Anlagentyp und Anlagengröße, addiert sich zu dem elektrischen Wirkungsgrad mit 30 bis 35 %.

Die naturgegebene Grenze für den Betrieb einer KWK-Anlage von Wohnungen liegt für den Heizwärmebedarf bei Vollbenutzungsstunden zwischen 1600 von 2000 Stunden im Jahr. Längere Benutzungszeiten werden in gewerblichen und industriellen Anwendungen erreicht, wobei hier eine Wirtschaftlichkeit erst zwischen 4000 bis 5000 Vollbenutzungsstunden veranschlagt wird.

### 3.4.5.3 Wirtschaftlichkeit von Kleinst-KWK-Anlagen

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Kleinst-KWK-Anlage ist auch die Bewertung des erzeugten Stroms ausschlaggebend. Bei der Eigennutzung ergibt sich diese Bewertung aus den vermiedenen Strombezugskosten und hängt somit indirekt vom bisher zu bezahlenden Strompreis ab. Wird der in der Kleinst-KWK-Anlage erzeugte Strom ins Netz eingespeist, dann richtet sich der Erlös nach der Einspeisevergütung. Nach VDI 2067 Blatt 7 ergeben sich die Jahreskosten einer Kleinst-KWK-Anlage aus der Summe der kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten.

Die kapitalgebundenen Kosten leiten sich hierbei aus den erforderlichen Investitionen für die gesamte KWK-Anlage ab. Unter die verbrauchsgebundenen Kosten fallen die Brennstoffkosten und die Hilfenenergiekosten. Als betriebsgebundene Kosten sind die Instandhaltungskosten und gegebenenfalls auch Personalkosten einzukalkulieren. Die Instandhaltungskosten liegen derzeit zwischen 2 bis 2,5 Cent/kWh<sub>el</sub>.

Der größte Anteil an den Gesamtkosten besteht in der Regel mit 40 % aus den verbrauchsgebundenen Kosten, gefolgt von den Kapitalkosten mit ca. 30 %. Die Investitionen amortisieren sich in der Regel in ca. 3,5 Jahren.

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen gilt generell: Je höher der ganzjährige Strom- und Wärmebedarf eines Gebäudes übers gesamte Jahr insgesamt ist, desto wirtschaftlicher arbeitet eine Kleinst-KWK-Anlage. Weil die Stromüberschüsse ins öffentliche Netz eingespeist werden, bestimmt der Jahresverlauf des Wärmebedarfs die Betriebsstundenzahl, d. h. je kürzer die Betriebsstundenzahl wird, desto kürzer fällt die Amortisationszeit aus. Im Prinzip gilt zudem, dass auf die auf ein bestimmtes Gebäude Kleinst-KWK-Anlage im Leistungsbe- reich bis 10 kW<sub>el</sub> realistisch betrachtet eine Refinanzierungszeit von 8 bis 14 Jahren aufweist. Daher sollten sämtliche Wirtschaftlichkeitsprognosen, die diesen Zeithorizont deutlich unterschreiten kritisch hinterfragt werden.

Als Basis für Wirtschaftlichkeitsberechnung sowie zur Bestimmung der Anlagenrentabilität kann für Kleinst-KWK-Anlagen bei einer möglichst gleichmäßigen Wärmeabnahme eine jährliche Laufzeit von 4500 Betriebsstunden veranschlagt werden. Die gleichmäßige Wärmeabnahme fällt aber für Geräte mit einer Leistungsmodulation nicht so stark ins Gewicht, weil im Teillastbetrieb nur soviel Wärme wie erforderlich erzeugt wird, dafür aber mehr Strom erzeugt wird. Dieser Strombetrag fällt um bis zu 60 % höher aus als bei Anlagen mit konstanter Drehzahl. Aus diesem Grund muss für einen energieeffizienten und wirtschaftlichen Betrieb die Wärmeabnahme über den Jahresverlauf betrachtet nicht mehr zwingend kons-

tant sein. Die Wirtschaftlichkeit des Systems wird durch die Teillastfähigkeit der Kleinst-KWK-Anlage gesteigert.

Die Wirtschaftlichkeit der Kleinst-KWK-Anlagen lässt sich somit durch lange Anlagenlaufzeiten und den hierdurch verminderten Strombezug darstellen. Eine Netzeinspeisung ist allerdings unter den aktuellen Rahmenbedingungen unattraktiv. Ein Kleinst-KWK-Aggregate kann sich aber auch unter der Voraussetzung, dass es sich um ein sehr gut gedämmtes Gebäude handelt und der überwiegende Anteil des produzierten Stroms selbst verbraucht wird, schon bei Betriebsstunden von 2000 bis 2500 im Jahr refinanzieren, weil der so eingesparte Endverbraucherpreis pro kWh derzeit deutlich über dem Einspeisetarif liegt. Andererseits ist der Strombedarf in den meisten Einfamilienhäusern mit durchschnittlich 4000 kWh/anno für die Rentabilität zu niedrig. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten sollte für ein Ein- bis Zweifamilienhaushalt ein Grundstrombedarf von mindestens 5000 kWh/anno gerechnet werden.

Die Ergebnisse in der Praxis zeigen deutlich, dass eine Wirtschaftlichkeit mit den derzeit vertriebenen Kleinst-KWK-Systemvarianten beim Einsatz in Einfamilienhäusern nur schwer erreichbar ist.

Um die erreichbaren jährlichen Laufzeiten von Kleinst-KWK-Anlagen in Einfamilienhäusern ermitteln zu können und um zur Rentabilität möglichst qualifizierte Aussagen treffen zu können, sollte die VDI 4655 »Referenzlastprofil von Ein- und Zweifamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen« berücksichtigt werden, in der Referenzlastprofile für Ein- und Mehrfamilienhäuser aufgeführt sind. Neben der Angabe der reinen jährlichen Laufzeit sollten auch Aussagen zu der erforderlichen Speichergröße, den Grenzen für einen monovalenten Betrieb und dem Anteil der zur direkten Nutzung einsetzbaren Strommenge getroffen werden.

Die Energiekosteneinsparungen durch den Einsatz einer Kleinst-KWK-Anlage resultieren aus der eigenen Stromproduktion und der staatlichen Förderung.

So zahlt der Staat für jede selbst erzeugte Kilowattstunde Strom einen »KWK-Bonus« von 5,11 Cent. Zudem ist der verbrauchte Brennstoff von der Energiesteuer befreit. Hauseigentümer bekommen hier z. B. bei Erdgas 0,55 Ct/kWh – also etwa 10 bis 15 % des Gaspreises, zurückerstattet. Mit dem seit Anfang September 2008 geltenden Impulsprogramm für kleine Kraft-Wärme-Kopplung können die Gebäudeeigner einen Investitionszuschuss zwischen 3000 und 5000 € erhalten.

Ob die Investition einer Kleinst-KWK-Anlage wirtschaftlich wird, muss für jedes Objekt unter Berücksichtigung der Randbedingungen individuell errechnet werden. Die Berechnung erfolgt hierbei nach der VDI 2067, wobei die rechnerische Nutzungsdauer mit 15 Jahren angesetzt wird. Nach dieser Richtlinie betragen zudem die Aufwendungen für die Instandhaltung 6 % der Investitionskosten und 2 % werden für die Wartungskosten angesetzt. Aufgrund dieser Basis beträgt die Amortisationszeit für eine Kleinst-KWK-Anlage durchschnittlich vier bis fünf Jahre. Nach Ablauf dieser Zeit sollte sich die Investition durch die eingesparten Energiekosten bereits finanziert haben. Bei einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren rechnet sich aufgrund der erwirtschafteten Überschüsse auf jedem Fall der Einsatz dieser Technologie.

Zudem arbeitet eine Kleinst-KWK-Anlage in den Fällen besonders wirtschaftlich, in denen kontinuierlich große Mengen Warmwasser verbraucht werden. Wenn der Strom einge-

speist wird, setzt sich die Vergütung aus drei Elementen zusammen. Da ist zunächst der am durchschnittlichen Preis für Baseload-Strom (Grundlast) an der Strombörse in Leipzig orientierte Grundpreis. Dieser ist ca. 3 Cent im ersten Quartal beim Heizöl z. B. rund 60 €/1000 Liter.

### **Wirtschaftlichkeit eines Brennstoffzelle-Heizgerätes**

Die Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzelle wird von vielen Faktoren bestimmt. Dazu gehören die erforderlichen Investitionen, Strom- und Gaspreise, Betriebsstunden, Wartungskosten, Lebensdauer, Einspeisevergütungen. Für einen wirtschaftlichen Durchbruch muss die Amortisationszeit unterhalb der Lebensdauer liegen. Wesentlichen Einfluss hat neben den Energiepreisen auch die gewählte Betriebsstrategie (wärme- oder stromgeführter Betrieb, Mischbetrieb aus beidem, Einbindung in ein Dezentrales Energiemanagement-System).

## **3.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)**

### **3.5.1 Grundlagen**

Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) erweitert die Verwendungsmöglichkeit der Abwärmenutzung der BHKW, Brennstoffzellen oder aus Produktionsprozesse sowie die Nutzung der Sonnenwärme. Die Wärme wird dient also nicht nur Gebäudeheizung während der Wintermonate, sondern auch als Antriebsenergie zur Erzeugung von technischer Kälte. Als Wärmesenke, insbesondere in der heizfreien Sommerzeit, stellt sich das Angebot dieser technischen Kälte als eine ideale und energetisch optimale Ergänzung dar.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme von Turbinen oder Motoren u. a. in Fernwärmenetzen genutzt. Durch den Einsatz thermisch angetriebener Kältemaschinen kann die Auslastung dieser Netze im Sommer und insofern die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage erhöht werden. Damit können im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte höhere Jahresnutzungsgrade erreicht werden. Wenn ein Bedarf an Raum- oder Prozesskälte besteht, kann die Effektivität einer KWK-Anlage dadurch gesteigert werden, dass die mittels der KWK erzeugte Wärme auch zum Betrieb von Ab- oder Adsorptionskälteanlagen verwendet wird. Insbesondere in den Sommermonaten, in denen weniger Wärme, aber vermehrt Klimakälteenergie benötigt wird, kann die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) zum energetischen Betriebskosteneinsatz beitragen.

In den Sommermonaten sind die Wärmenetze von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) schwach ausgelastet. Dagegen wird im gleichen Zeitraum in vielen Zweckbauten Kälte für Klimatisierungsaufgaben sowie in der Industrie für Kälteprozesse benötigt. Mit dem Einsatz thermisch angetriebener Kältemaschinen kann die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sowohl im dezentralen Verbund mit Blockheizkraftwerken, einer Brennstoffzellen-KWK und Gasturbinen als auch angebunden an Nah- bzw. Fernheizwerke mit Heizkraftwerken bzw. Abwärmenutzung (Fernwärme-Kälte-Kopplung) optimiert werden.

Der Fachplaner von KWKK-Anlagen muss entscheiden, mit welchem Verfahren der Kältebedarf gedeckt wird. Kriterien sind der wirtschaftliche und der primärenergetische Effekt im gesamten System der KWKK. Elektroenergie, Abwärme aus der KWK oder Gas stehen als Antriebsenergie zur Kälteerzeugung zur Verfügung. Voraussetzung für die Planung ist die Information über die Energieeffektivität der unterschiedlichen Kälteverfahren. Wichtige Randbedingungen sind die Heiztemperaturen, Umgebungstemperaturen (Rückkühlbedingungen) und die Nutztemperatur der Kälte. Ferner spielen die Konstruktionsmerkmale der Kältemaschinen insbesondere die Leistungsgröße eine Rolle. Der Auswahlprozess muss die Kälteerzeugung, aber auch das Gesamtsystem der KWKK berücksichtigen. Variable Größen sind Wirkungsgrad der Elektroenergieerzeugung, Leistungszahl des Kälteverfahrens und Heizzahl des Absorptionsverfahrens. In letzter Zeit stellt sich für Investoren zunehmend auch die Umsetzung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, vor allem im Bereich von Kliniken, Rechenzentren, etc., als besonderer technologischer und wirtschaftlicher Anreiz dar.

### 3.5.2 Objektbeispiel

#### *Objektbeispiel:*

Mobile Life Campus in Wolfsburg, Architekten: Henn Architekten, München, Berlin. Der Gebäudekomplex des MobileLifeCampus entsteht auf einem 15 ha großen Areal und weist im ersten Bauabschnitt eine Gebäudekubatur von 165 m Länge, 54 m Breite und einer Höhe von 23 m mit einer Bruttogeschossfläche von 25.000 m<sup>2</sup> auf. Es ist das erste von fünf vorgesehenen Bauten, die an einer zentralen Achse entstehen sollen. Entsprechend wurden die fünf geplanten Campus-Gebäude entlang einer zentralen Achse aufgereiht, die in eine Agora mit einem Kommunikationsforum mündet. Um den Anforderungen nach flexiblen Nutzungsmöglichkeiten gerecht zu werden und die Wege möglichst kurz zu halten, entwickelten die Architekten Raumstrukturen, die die einzelnen Wissensbereiche vernetzten. Freie Bereiche wie Atrien und Innenhöfe wechseln sich mit den Büroräumen ab. Das Innere ist durch ein gebäudehohes glasüberspanntes Atrium geprägt, in dem die Erschließung durch offene Treppenläufe und rundum laufende Erschließungsgänge sichtbar gemacht wird. Die verglasten Besprechungsräume ragen in den Luftraum.

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik*

Fernwärmeanschluss, Blockheizkraftwerk und thermische Solaranlagen liefern Energie für das Campusgebäude. Die Energieversorgung des Mobile Life Campus erfolgt zum größten Teil autark wobei die Versorgungsanlage aus Komponenten der Stromgewinnung aus Sonne und KWK sowie zur Wärme- und Kälteproduktion besteht und zusätzlich mit Wärme-/Kälte-Rückgewinnungskomponenten kombiniert wurde. Zusätzlich wird das Gebäude von außen mit Fernwärme versorgt. Das gebäudeeigene Blockheizkraftwerk wird mit Rapsöl betrieben und produziert 380 kW Wärme, die für Heizung und Warmwasserbereitung sowie für eine Absorptionskältemaschine im Sommer verwendet wird, die die BHKW-Abwärme zur Klimakälteanwendung nutzt.

Der Großteil des Heizenergiebedarfs wird jedoch über einen Fernwärmeanschluss mit 1200 kW gedeckt. Die elektrische Leistung beträgt 330 kW. Die Brennstoffbevorratung er-





**Abb. 3-41:** Mobile Life Campus in Wolfsburg (Quelle: H.G. Esch, Hennef-Stadt Blankenberg)

folgt über einen Erdtank mit 40.000 Litern und einen in der Heizzentrale integrierten Ta-gestank mit 1800 Litern.

Durch die erhöhte Vergütung von Strom nach dem EEG amortisiert sich das BHKW bereits nach drei Jahren, obwohl es in der Investition zunächst teurer ist als ein konventionelles Dieselnoststromaggregat. Der zusätzliche Strom wird durch die auf dem Dach des Mobile Life Campus integrierte Photovoltaikanlage produziert.

**Tab. 3-18:** Referenzprojekte über Anlagen mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung  
(Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt                | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|----------------------------------|--|--|
| Canon Gießen GmbH                | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels BHKW und Absorptionskältemaschine (AKM)   |  |
| Hacker-Pschorr-Arena in Bad Tölz | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels Pflanzenöl-BHKW und Absorptionskältemaschine (AKM) Pflanzenöl-BHKW und einer Absorptionskältemaschine nachgerüstet. | Aufgrund der Nachrüstung werden nicht nur die Betriebskosten an Strom und Erdgas gesenkt, sondern es wird auch die Effizienz der Kälteerzeugung zum Betrieb der beiden Kunsteisbahnen reduziert. |

Fortsetzung Tab. 3-18

| Projekt/Architekt                         | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|---|--|--|
| Kreiskrankenhaus Wolgast in Ostvorpommern | Im Heizkraftwerk wurden zwei rapsölbetriebene BHKW-Module mit einer Leistung von $240 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $310 \text{ kW}_{\text{th}}$ installiert. Der Großteil der durch die BHKW erzeugten Abwärme (Wärme des Motorkühlwassers mit ca. $90^\circ\text{C}$ und heiße Motorabgase mit ca. $480^\circ\text{C}$ ) wird einer Absorptionskälteanlage als Antriebsenergie zugeleitet. Das BHKW produzierte Strom bis $330 \text{ kW}$ wird größtenteils in das städtische Netz eingespeist und stellt aber auch mit einem Stromanteil die Notstromversorgung sicher. Die RMS-BHKW dienen nicht nur zur Strom- und Wärmeerzeugung, sondern es wird über die angekoppelte Absorptionskältemaschine auch noch Kälte mit $260 \text{ kW}$ bereitgestellt. | Das Kühlwasser für die RLT-Klimakälte über die Absorptionskältemaschine bezogen, wobei die Energieeffizienz zusätzlich durch den Einsatz eines Hybridkühlers mit einer Leistung von $1700 \text{ kW}$ erhöht wird. Für den Betrieb mit Rapsöl ist ein spezieller Brenner erforderlich, weil Bioöle aggressiver sind. Der Wärmeeerzeuger Vitoplex 300 als Dreizugkessel mit einer Leistung von $1120 \text{ kW}$ Der Norm-Nutzungsgrad liegt bei $96\%$ , durch den Einsatz des Edelstahl-Abgas/Wasser-Wärmeübertragers Vitotrans lässt er sich noch um bis zu $12\%$ steigern. |

### 3.5.3 Kleinst-KWKK-Anlagen

*Objektbeispiel:* Mercedes-Benz-Autohaus Roßbach, Hamburg.

Das Mercedes-Benz-Autohaus Roßbach in Hamburg erweiterte 2005 seine Ausstellungsfläche um einen  $330 \text{ m}^2$  großen Ausstellungsraum auf insgesamt  $980 \text{ m}^2$ . Im Zuge der Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen wurde seitens der Hamburger Energieconsulting »Das Netzwerk« ein neues Energieversorgungskonzept für die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung entwickelt.

Installiert wurde ein erdgasbefeuertes PowerTherm Blockheizkraftwerk (BHKW) mit max.  $43 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Gesamtwirkungsgrad beträgt nach Herstellerangaben bis zu  $96\%$ , wobei der elektrische Wirkungsgrad über den gesamten Regelbereich konstant bleibt. Leistungsabgabe erfolgt mittels angepasster Drehzahlvariation bei min.  $10 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $5 \text{ kW}_{\text{el}}$  Leistung.

Die Abwärme des BHKW PowerTherm von Spilling wird zu Heizzwecken und zum Betrieb einer Absorptionskälteanlage von EAV-Energieanlagenbau, Typ Wegracal SE 15 mit einer Kälteleistung von  $15 \text{ kW}$  genutzt. Bei der Wärme und Kälte werden die kleinen Lastspitzen über Pufferspeicher mit einem Inhalt von je  $4000 \text{ Liter}$  ausgeglichen. Aufgrund der Leistungsmodulation ist ein kontinuierlicher Betrieb und somit eine permanente Stromerzeugung möglich. Hierdurch konnte eine deutliche Verringerung des Fremdstrombezugs realisiert werden. Der überschüssige Stromanteil wird in das öffentliche Netz eingespeist.



### 3.5.4 Förderprogramme

Das neue KWK-Gesetz regelt die Abnahme und Vergütung von Strom aus KWK-Anlagen, weil diese Technologie als umweltfreundlich gilt und weil aus der zugeführten Primärenergie in einem Umwandlungsprozess hohe Wirkungsgrade und zwei unmittelbar nutzbare Energiearten entstehen. Seit April 2002 erhalten daher die Betreiber von KWK-Anlagen einen gesetzlich definierten Zuschlag für den Strom, den der Generator in das Netz der öffentlichen Elektrizitätsversorgung einspeist. Nach § 5 des KWK-Gesetzes sind die Elektrizitätsversorgungsunternehmen zum Anschluss und zur Abnahme verpflichtet.

Die Preisregelung besteht hierbei aus einem variablen Element und einem gesetzlich fixierten Anteil. Während der Zuschlag ein fester Betrag ist, muss der Preis für die eigentliche Stromvergütung zwischen Anlagen- und Netzbetreiber vereinbart werden.

Gebäudeeigner und gewerbliche Investoren profitieren von den niedrigen Amortisationszeiten und der Vergütung für den eingespeisten Strom. Die Amortisationszeit hängt allerdings von der Betriebsdauer, den öffentlichen Fördergeldern und der Rückspeisevergütung ab.

## 4.0 Energetische Potenziale in der Sanitärtechnik

### 4.1 Abwasserwärmerückgewinnung

Bei den Wärmerückgewinnungsmaßnahmen aus Abwasser (natürliche Energieressourcen im Abwasser) ist nicht nur die Relation der Energiekosteneinsparung zu den erforderlichen Investitionen von Bedeutung. Insbesondere verdienen hier Fragen der Wartung kritische Beachtung. An ungelösten Wartungsproblemen sind schon manche Systeme gescheitert. Technisch ist die Rückgewinnung von Abwärme aus dem Abwasser ohne Weiteres möglich und energetisch überall dort sinnvoll, wo entsprechende Mengen warmen Abwassers anfallen (Sportstätten, Therapiezentren, Hallenbäder etc.).

Im Jahresverlauf bewegt sich die Abwassertemperatur in der Regel zwischen 10 und 20 °C. Somit ist das Abwasser in den Wintermonaten deutlich wärmer als die Außenluft; in den Sommermonaten ist das Abwasser dagegen kälter als die Außenluft. Aus diesem Grund kann das Abwasser im Winter Wärme abgeben und im Umkehrschluss im Sommer Kälte, d. h. das Abwasser kann wertvolle Heiz- bzw. Kühlenergien liefern.

Eine Nutzung der Abwasserwärme aus der öffentlichen Kanalisation ist für die Warmwasserbereitung und Beheizung von Gebäuden wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll.

Die Wärmerückgewinnung von Abwasser bleibt in Deutschland jedoch, außer im industriellen Bereich, weitgehend ungenutzt. In der Schweiz wird schon seit einigen Jahren aus dem zumeist gereinigten Abwasser Wärme durch installierte Wärmepumpen genutzt. Ein Wärmeentzug ungereinigten Abwassers existiert jedoch bisher nur in Modellprojekten. Die Studie zeigt, dass die im ungereinigten Abwasser enthaltene Wärmemenge der öffentlichen Kanalisation beträchtlich ist. Voraussetzung für die Nutzung ist allerdings der Einsatz einer effizienteren Wärmepumpentechnik. Das mögliche Anwendungsspektrum reicht dabei von der Beheizung von Schwimmbädern, öffentlichen Gebäuden bis hin zu Privathaushalten. Zudem können im Vergleich zu konventionellen Heizungsanlagen besonders die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Mittel abgesenkt werden. Im Abwasser steckt ein großes Wärmeenergiepotenzial, das mittels moderner Wärmepumpentechnologie zur Beheizung von Gebäuden genutzt werden kann. Aufgrund der steigenden Energiepreise und des technischen Fortschritts im Bereich der Wärmepumpen und Wärmeübertrager wird die Abwasserwärmenutzung zunehmend wirtschaftlich interessant. Entsprechende Rahmenbedingungen vorausgesetzt, sind Anlagen zur Abwasserwärmenutzung im Vergleich zu fossilen Heizungsanlagen schon heute betriebswirtschaftlich wettbewerbsfähig. Bei der fachgerechten Planung und Ausführung entstehen weder für das Entwässerungssystem noch für die Abwasserreinigung Nachteile.

Im Merkblatt DWA-M 114 sind die Aspekte der Energiegewinnung aus Abwasseranlagen bezüglich der Planung, Bau und Unterhalt beschrieben. Der Schwerpunkt wird auf die Wärmerückgewinnung aus Abwasserleitungen und -kanälen gelegt. Dies kann im angepassten Sinne auch auf die Lageenergie übertragen werden. Ein weiterer Schwerpunkt wird auf die Auswirkungen von Energierückgewinnungsanlagen auf die dem Entwässerungssystem nachgeschaltete Kläranlage gelegt. Ein Kapitel des Merkblattes beschäftigt sich mit der Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen.

Die Verfahren zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft/Fortluft der RLT- und Klimaanlage, aber auch der industriellen Prozessabluft haben aufgrund der einfachen technischen Lösungen und der hohen Rentabilität seit Jahren eine ständige Verbreitung gefunden. Demgegenüber sind Wärmerückgewinnungsanlagen aus Abwasser in Deutschland derzeit noch wenig verbreitet, obwohl das Wasser durch die hohe Wärmekapazität und niedrige Zähigkeit gute physikalische Eigenschaften hat. Die Abwasserwärmerückgewinnung bleibt, außer im industriellen Bereich, weitgehend ungenutzt. In der Schweiz wird bereits seit einigen Jahren die Wärme aus dem zumeist gereinigten Abwasser durch Wärmepumpen genutzt. Ein Wärmeentzug ungereinigten Abwassers existiert jedoch bisher nur in Modellprojekten. Die Studie zeigt, dass die im ungereinigten Abwasser enthaltene Wärmemenge der öffentlichen Kanalisation beträchtlich ist. Voraussetzung für die Nutzung ist allerdings der Einsatz effizienter Wärmepumpentechnik. Das mögliche Anwendungsspektrum reicht dabei von der Beheizung von Schwimmbädern, öffentlichen Gebäuden bis hin zu Privathaushalten. Im Vergleich zu konventionellen Heizungsanlagen können besonders die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Mittel abgesenkt werden.

### **Innovatives Energieversorgungskonzept mit CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen**

Die neuartigen Wärmepumpen werden zum Einsatz der Abwasserwärmerückgewinnung mit dem ökologisch und sicherheitstechnisch idealen Kohlendioxid als Kältemittel betrieben. Die Abwärme aus industriellen Abwässern wird bisher kaum genutzt, weil diese Abwärme in der Regel nicht ganzjährig zur Verfügung steht und das Wasser zudem aggressiv verschmutzt ist. Es gibt jedoch industrielle Abwässer, die das ganze Jahr über zur Verfügung stehen und zudem Temperaturen von 25 bis 30 °C beinhalten. Dieses Abwasser kann nun für die Energieversorgung genutzt werden, wobei eine Wärmepumpenanlage von ca. 125 kW Heizleistung installiert wurde, die über ein Diesel-Blockheizkraftwerk angetrieben wird.

Interessant wäre es nun, wenn für diese Wärmepumpe Kohlendioxid eingesetzt werden könnte. Die Leistung derartiger Wärmepumpen ist um 10 % höher als die der herkömmlichen Systeme. Die ökologischen und sicherheitstechnischen Vorteile dieses Kältemittels liegen auf der Hand. Kohlendioxid ist weder giftig noch brennbar, besitzt kein Ozonabbaupotenzial, ist chemisch inaktiv und preisgünstig. Die innovative Kernkomponente ist hierbei ein neuartiger Kohlendioxidverdichter. Die Pumpe wird über eine Rohrleitung und einen Wärmeübertrager an die Abwasserleitung angeschlossen. Die Wärmeverteilung erfolgt dann über das vorhandene Heizungsnetz.

## **4.1.1 Referenzprojekte**

### *Objektbeispiel:*

Neubau der Schulsporthalle Leibniz-Gymnasium, Berlin-Kreuzberg

Zum ersten Mal wird in Berlin das Wärmepotenzial des Abwassers zur Energienutzung eingesetzt.

Beteiligte: Vattenfall Europe Berlin; Stadtverwaltung des Bezirks Friedrichshain-Kreuzberg; Ingenieurbüro ECO.S, Berlin.

**Tab. 4-1:** Referenzprojekte mit Abwasser-WRG-Anlagen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt                                    | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|--|--|--|
| Kantonschule Limmattal (KSL)/CH                      | Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser der WCs ,PPs und Duschen mittels Wärmepumpen in Kombination mit Mehrfach-nutzung der Regenwasseranlage | Energieoptimierungs-Maßnahme: Kombination mit Regenwasserauf-fangtank, Feka-Tank 8000 Liter                  |
| Sporthalle des Leibnitz-Gymnasiums, Berlin-Kreuzberg | Das Abwasser-Wärmepotenzial wird mittels Abwasserwärme-pumpenanlage Beheizung der Schulsporthalle verwendet                                | Stadtverwaltung des Bezirks Friedrichshain-Kreuzberg und Vattenfall Europe Berlin; Ingenieurbüro ECO, Berlin |
| Altersheim, Lyss-Busswil/CH                          | Contractingmodell der Abwasser-Wärmenutzungsanlage   | BKW FMB Energie AG, Bern   |

#### Objektbeispiel:

Briefsortierzentrum Mülligen der Schweizer Post

Nach einer Komplettsanierung verfügt das Briefsortierzentrum Mülligen über eine innovative Wärme-Kälte-Kopplung, die den hohen Wärme- und Kühlbedarf mit einer Ammoniak-Wärmepumpenanlage abdeckt. Das Abwasser des in ca. 1 km entfernt befindlichen Klärwerks Werdhölzli dient als Energiequelle mit einem Potenzial von jährlich 266 Mio. kWh an Nieder-temperaturwärme, das zum Heizen als auch zum Kühlen genutzt werden kann.

Die neue Energiezentrale enthält eine der größten Ammoniak-Wärmepumpen in Europa mit einer Kälteleistung von 4300 kW. Die NH<sub>3</sub>-Wärmepumpenanlage, die für eine Heizleistung von 5600 kW ausgelegt wurde, liefert am Verflüssiger Vorlauftemperaturen von bis zu 62 °C. Rund 50 % der Energie zum Heizen werden dem gereinigten Abwasser des Klärwerks entzogen und weitere 30 % stammen aus der Abwärme der Gebäudeklimatisierung des Briefsortierzentrums. Wenn kein Raumwärmebedarf angefordert wird, nutzt die neue Wärme-Kälte-Kopplung des Postzentrums das Abwasser zur Rückkühlung der Abwärme aus der Kälteproduktion. Dieses ist insbesondere während der Sommermonate der Fall, wenn die automatisierten Anlagen zur Briefsortierung eine Kühllast von 4900 kW anfordern. Drei Sabroe-Kolbenverdichter bilden im Temperaturbereich von 5 bis 30 °C die Grundstufe im Wärmepumpenbetrieb oder können auch als reine Kälteanlage, d. h. ohne Abwärmenutzung betrieben werden. Im Wärmepumpenbetrieb verdichten fünf Sabroe-Hochdruckkolbenverdichter das NH<sub>3</sub>-(R717)Kältemittel von 30 auf 65 °C. Die Hochdruckflüssigkeit wird nach Möglichkeit unterkühlt und zweistufig über einen Zwischendruckbehälter expandiert. Hierbei beträgt die Wärmeleistungsziffer ohne Unterkühlung 3,97. Aufgrund der innovativen Systemlösung der sinnvollen Nutzung der standortgebundenen Abwärmequelle wird der Verbrauch von fossilen Brennstoffen reduziert und die CO<sub>2</sub>-Schadstoffemission erheblich gesenkt.

#### Objektbeispiel:

Seniorenzentrum »Serata« in Thalwil (CH)

Das Abwasser wird über ein System von einem 1,3 km umfassenden Leitungsnetz innerhalb

des bewohnten Gebiets zur nahe gelegten Abwasserreinigungsanlage geleitet. Die Zentraleinheit besteht aus Wärmeübertrager, die dem Abwasser die Abwärme entzieht sowie die Wärmepumpen, die diese Abwärme zur Beheizung der drei Gebäude des Seniorenzentrums transportiert (Wärmepumpenleistung: 900 kW, Energieproduktion: 2678 Mio. kWh/a).

## 4.2 Druckluftwärmerückgewinnungsanlagen

Aus energetischen Gründen bzw. zum Nutzen einer effizienten Energienutzung ist es sinnvoll, die thermisch gespeicherte Energie in der Druckluft zu nutzen. Für die Neuerrichtung, wie auch für die Nachrüstung von Druckluftanlagen sollten den Betreibern aus Gründen einer wirtschaftlichen Energienutzung die zugeordneten Systemvorschläge zur Druckluftabwärmenutzung mittels einer Wärmerückgewinnungsanlage unterbreitet werden. In jedem Fall lohnt sich bei größeren Kolben- und Schraubenkompressoren eine Bestandsaufnahme und Analyse inwieweit die Investition einer Druckluftwärmerückgewinnung wirtschaftlich zu vertreten ist. Eine wesentliche Rolle zur Berechnung und Auslegung der Wärmerückgewinnungsanlage spielt die Ausnutzung des Kompressors, d. h. ob die Kompressorstation im Volllast- oder im Teillastbetrieb arbeitet.

Gekapselte Schraubenkompressoren eignen sich zur Wärmerückgewinnung genau so wie Kolbenkompressoren. Während bei zweistufigen Kolbenkompressoren die Hauptwärmemenge je zur Hälfte an Zwischen- und Nachkühler anfällt, wird bei Schraubenkompressoren ca. 72 % der aufgenommenen Energie allein am Ölkühler abgeführt. Über einen Sicherheitswärmeübertrager (Thermokoppler) kann mit dem Ölstrom eines Schraubenkompressors ohne Qualitätseinbuße das Brauchwasser erwärmt werden.

### Wärmebilanz einer Kompressorstation

Wenn im gewerblichen und industriellen Bereich Druckluft erzeugt wird, steigt die Temperatur während des Verdichtungs Vorganges der Luft an. Die Höhe der Endtemperatur ist hierbei von der Konstruktion des Kompressors, der Ansaugtemperatur und dem Enddruck abhängig. Um einen Kompressor wirtschaftlich betreiben zu können und um eine qualitativ hochwertige, d. h. kühle Druckluft zu erreichen, muss die Maschine bereits während der Verdichtung gekühlt werden. Durch eine intensive Kühlung wird nicht nur die Druckluft entfeuchtet, sondern auch der Wirkungsgrad des Kompressors erhöht. Die hierfür erforderliche Kühlluft wird entweder aus dem Kompressorraum oder noch vorteilhafter von außen angesaugt.

Die Energie, die in der erwärmten Kühlluft enthalten ist, sollte sinnvoll genutzt werden. Die Energiemenge beinhaltet ca. 95 % der dem Kompressor zugeführten elektrischen Energie. Nur ca. 4 % verbleiben als Restwärme innerhalb der Druckluft und werden abgeführt. Die restlichen ca. 1 % gehen an die Umgebungsluft als Wärme verloren.

Zur Aufstellung einer Wärmebilanz darf nicht nur die vom Motor abgegebene Leistung zugrunde gelegt werden, sondern es muss auch berücksichtigt werden, dass der Antriebsmotor elektrische Energie in Wärme umwandelt. Das bedeutet, dass bei der Wärmerückgewinnung zusätzlich auch die vom Motor aufgenommene Leistung berücksichtigt werden muss. Das Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung wird durch den Motor-

wirkungsgrad definiert, der in der Praxis zwischen 85 und 92 % angegeben wird. Bei einem Motor von z. B. 45 kW mit einem Wirkungsgrad von 90 % beträgt die Wärmeabgabe daher noch zusätzlich 5 kW.

Um die in der Kühlluft enthaltene Wärme ausnutzen zu können, werden bauliche Maßnahmen erforderlich, die vom Aufwand her je nach den örtlichen Gegebenheiten unterschiedlich ausfallen können. Es ist ferner zu berücksichtigen, dass der Kühlluftstrom gezielt über den Kompressor geleitet und im Anschluss daran über ein Luftkanalsystem weitergeführt wird. Hierzu bietet sich u. a. eine Schalldämmhaube an, die zudem noch den Vorteil hat, dass gleichzeitig auch der Geräuschpegel wesentlich gesenkt wird. Es besteht auch die Möglichkeit, an die Zu- und Abluftöffnungen Luftkanäle anzuschließen, wobei hierdurch im Winter untergeordnete Raumbereiche, wie Lagerräume, Werkstätten, etc. raumluftechnisch durchspült werden können. Im Sommerbetrieb wird die Raumabluft mittels einer Umschaltung im Kanalsystem als Fortluft ins Freie geführt.

Für Verbrauchszwecke kann Kaltwasser je nach Bedarf von ca. 10 °C auf ca. 40 bis 50 °C erhitzt werden. Mittels einer Umwälzpumpe wird das im Sicherheitswärmeübertrager erwärmte Wasser in den Warmwasserspeicher transportiert. Hier stellt sich bereits nach kurzer Zeit automatisch eine Temperaturschichtung ein, sodass im oberen Speicherbereich das erwärmte Wasser und im unteren Bereich noch lange Zeit kaltes Wasser zur Kompressorkühlung zur Verfügung steht. Ohne Probleme lassen sich auch noch Wärmeübertrager in den Abluftkanal integrieren, mit deren Hilfe sich Wasser für ein Zentralheizungssystem zusätzlich, z. B. im Niedertemperatursystem, oder auch Brauchwasser auf ca. 40 °C erwärmen lässt.

### Berechnung der Energieeinsparung

Bei der Ermittlung der einzusparenden Kosten sollte stets berücksichtigt werden, dass die Abwärmeausnutzung von der Vollastlaufzeit des Kompressors abhängig ist, da nur in diesem Fall genügend verwertbare Abwärme entsteht. Die Wärmemenge, die in der Kühlluft enthalten ist, lässt sich nach den bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten berechnen:

$$Q = m_{KL} \cdot c_p \cdot \Delta t_{KL} \text{ (kJ/h)}$$

$$Q = 0,95 \cdot 3600 : P_{\text{mot.}} : \frac{1}{\eta_{\text{Mot}}}$$

Für die Praxis sind aus Tab. 4-2 die Warmluftmengen als Anhaltswerte zu entnehmen, die sich im Dauerbetrieb von Schraubenkompressoren ergeben.

**Tab. 4-2:** Abwärme von Schraubenkompressoren im Dauerbetrieb (Quelle: IB-THEISS, München)

| Antriebsleistung<br>kW | Abgeführte<br>Leistung<br>kW | Wärmemenge<br>kJ/h | Warmluftmenge<br>m³/h | Äquivalente<br>Heizölmenge<br>l/h *) |
|------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 11                     | 12,29                        | 44259              | 1640                  | 1,23                                 |
| 15                     | 16,29                        | 58629              | 2600                  | 1,63                                 |
| 18,5                   | 19,86                        | 71492              | 3760                  | 1,99                                 |
| 22                     | 23,35                        | 84067              | 4930                  | 2,34                                 |
| 30                     | 31,84                        | 114637             | 6560                  | 3,18                                 |

Fortsetzung Tab. 4-2

| Antriebsleistung<br>kW          | Abgeführte<br>Leistung<br>kW | Wärmemenge<br>kJ/h | Warmluftmenge<br>m <sup>3</sup> /h | Äquivalente<br>Heizölmenge<br>l/h *) |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 37                              | 39,27                        | 141385             | 8690                               | 3,93                                 |
| 45                              | 47,77                        | 171955             | 11250                              | 4,78                                 |
| 55                              | 57,73                        | 207845             | 11910                              | 5,77                                 |
| 65                              | 68,23                        | 245635             | 14500                              | 6,82                                 |
| 75 + 7,5                        | 86,69                        | 312093             | 16100                              | 8,67                                 |
| 90 + 7,5                        | 102,78                       | 370006             | 16850                              | 10,28                                |
| 110 + 11                        | 125,91                       | 453291             | 20200                              | 12,59                                |
| *) Unterer Heizwert = 36.000 kJ |                              |                    |                                    |                                      |

Zum Vergleich sind ferner die diesen Wärmemengen äquivalenten Heizölmengen angeführt, ohne Berücksichtigung des Heizungsanlagenwirkungsgrades. Bei einem in der Praxis üblichen Heizungswirkungsgrad von 75 % (also kein Brennwert-Wärmeerzeuger, etc.), erhöhen sich die Heizölmengen um den Faktor 1,3. Hieraus lassen sich leicht die Einsparungsmöglichkeiten errechnen. Einerseits aus der Wärmebedarfsberechnung und andererseits aus der Einschaltdauer bzw. dem Ausnutzungsgrad der Kompressorstation ergibt sich, ob die Warmluft nur Zusatzheizung sein kann, oder ob sie sogar den Primärbedarf deckt.

*Beispiel:* Eine Schraubenkompressoranlage mit einer Antriebsleistung von 45 kW arbeitet im Dauerbetrieb 8 Stunden pro Tag an 250 Arbeitstagen pro Jahr. Ziel ist es, dass die anfallende Abwärme das ganze Jahr über kontinuierlich genutzt werden soll. Während der sechs Wintermonate wird die geförderte Warmluftmenge zur Raumheizung genutzt. In den verbleibenden sechs Monaten soll Brauchwasser einen installierten Wärmeübertrager erwärmt werden.

Aus der Tab. 4-2 ist für dieses Beispiel eine äquivalente Heizölmenge von 4,78 l/h, das entspricht 38,24 l/d, zu entnehmen. Bei 250 Arbeitstagen pro Jahr und einem angenommenen Öl-Bezugspreis von 0,95 € pro Liter, ergibt sich ein Gesamtbetrag in Höhe von 9082 €, der sich um den Faktor 1,3 (angenommener realistischer Heizungsanlagenwirkungsgrad von 75 %), auf 11.806,60 € erhöht. Bei einer zu erwartenden weiteren Energiepreisteigerung für Heizöl lässt sich die Einsparung aufgrund der Abwärmenutzung durchaus rechnen.

Um die effektiv eingesparten Kosten zu ermitteln, müssen natürlich die Investitionskosten bzw. deren Abschreibungen gegenübergestellt werden.

## 4.2.1 Objektbeispiel

### *Objektbeispiel:*

Festo AG & Co. KG in Esslingen-Berkheim.

Im Firmenstammsitz der Festo AG & Co. KG in Esslingen-Berkheim wurde die derzeit größte Anlage Europas zur Kühlung und Beheizung des Bürogebäudes errichtet. Die drei Mycom

Adsorptionskältemaschinen wurden bereits vor einigen Jahren aufgestellt, um die Abwärme der Druckluftkompressoren aus dem Technologiezentrum zu nutzen und damit die Büros und das Rechenzentrum zu kühlen.

### **Abwärmeverwertung über Brauchwassererwärmung**

Für Verbrauchszwecke kann Kaltwasser je nach Bedarf von ca. 10 °C auf ca. 40 bis 50 °C erhitzt werden. Mittels einer Umwälzpumpe wird das im Sicherheitswärmeübertrager erwärmte Wasser in den Warmwasserspeicher transportiert. Hier stellt sich bereits nach kurzer Zeit automatisch eine Temperaturschichtung ein, sodass im oberen Speicherbereich das erwärmte Wasser und im unteren Bereich noch lange Zeit kaltes Wasser zur Kompressorkühlung zur Verfügung steht. Ohne Probleme lassen sich auch noch Wärmeübertrager in den Abluftkanal integrieren, mit deren Hilfe Wasser für ein Zentralheizungssystem zusätzlich, z. B. im Niedertemperatursystem, oder Brauchwasser auf ca. 40 °C erwärmen.

Für den Fall, dass die Wärme noch besser genutzt werden soll bzw. dass die Abwärme über größere Entfernungen übertragen oder zur Gewinnung einer höheren Brauchwassertemperatur von 60 bis 70 °C ausgenutzt werden soll, bietet sich der Einsatz eines Duotherm-Plus-Systems (Kombination von zwei Wärmeübertragern) an. Dieses System besteht u. a. aus einem geschlossenen autarken Kühlwasserkreislauf, der wiederum vom Brauchwasserkreislauf getrennt ist. Das Kühlwasser dient hier als Wärmeträger und verbraucht sich nicht. Es ist eine einmalige Füllung erforderlich. Hierdurch wird garantiert, dass keine Verunreinigungen, wie z. B. Öl, ins Brauchwasser gelangen können. Innerhalb des Duotherm-Plus-Systems sorgt eine Pumpe für den notwendigen Kreislauf des erwärmten Kühlwassers, der durch ein Ausdehnungsgefäß und ein Sicherheitsventil abgesichert wird.

Das Duotherm-Plus-System, dass bei öleingespritzten Schraubenkompressoren eingesetzt werden kann, arbeitet unabhängig von der Art des Kühlsystems, da lediglich ein Vorkühler dem als Luft- oder Wasserkühler ausgebildeten Ölkühler vorgeschaltet wird. Somit wird der Ölkreislauf des Schraubenkompressors quasi angezapft. Das Öl wird im Vorkühler des Duotherm-Plus-Systems von ca. 85 auf 75 °C abgekühlt, wobei sich gleichzeitig das als Wärmeträger dienende Wasser des Duotherm-Plus-Systems erwärmt. Durch den ständigen Kreislauf des Wassers wird im zweiten Kühler des Duotherm-Plus-Systems das eigentliche Brauchwarmwasser auf ca. 60 bis 70 °C erwärmt. Dem Duotherm-Plus-System ist in der Regel ein Warmwasserspeicher nachgeschaltet, der das erwärmte Brauchwarmwasser aufnimmt. Andererseits werden auf dem Markt auch Speicher angeboten, in denen bereits ein Wärmeübertrager integriert ist. Dieser Wärmeübertrager kann den Wärmeübertrager des Duotherm-Plus-Systems ersetzen, d. h. also, dass alternativ nun ein Duotherm-Plus-System mit nur einem Wärmeübertrager installiert wird.

Der Ausnutzungsgrad des Kühlwassers ist natürlich unterschiedlich, da die Abwärme zu sehr von jedem einzelnen Anwendungsfall abhängt. Hierbei spielt auch die Einschaltdauer des Kompressors sowie die Frage eine Rolle, ob mit der Abwärme der Primär- oder Sekundärbedarf abgedeckt werden soll. Daraus folgt, dass zur Entscheidung und Systemfindung sinnvoller Weise stets eine Analyse des anstehenden Anwendungsfalles erfolgen sollte.



## 4.3 Förderungen

### KfW-Umweltprogramm (Förderung für Unternehmen)

Für Investitionen in den Umweltschutz steht den Unternehmen das KfW-Umweltprogramm zur Verfügung. Voraussetzung ist jedoch, dass mit den Investitionen die Umweltsituation eindeutig verbessert wird.

*Beispiel:* Abwasser-Recycling-Systeme zur Wärmerückgewinnung.

Grundsätzlich werden in- und ausländische Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft gefördert. Hierzu gehört das produzierende Gewerbe, Handwerk, Handel, sonstiges Dienstleistungsgewerbe, freiberuflich Tätige, Public Private Partnerships und Unternehmen, an denen die öffentliche Hand, Kirchen oder karitative Organisationen beteiligt sind. Der Kredit steht auch außerhalb Deutschlands zur Verfügung, wenn die Maßnahme die Umweltsituation in Deutschland verbessert bzw. es sich um Deutsche Unternehmen handelt. In beiden Fällen werden bis zu 75 % der Investitionskosten und max. 10 Mio. € pro Vorhaben finanziert.

## 4.4 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit derartiger Wärmerückgewinnungsmaßnahmen hängt aber von der Höhe der Investitionen, der Wärmerückgewinnung (Energiepotenzial) und den Wartungskosten ab.

Der Erfolg einer jeden energieeinsparenden Maßnahme hängt letztendlich von ihrer Wirtschaftlichkeit, d. h. von der Relation der Kosteneinsparung zu den erforderlichen Investitionen, ab. Zur Ermittlung der Kosteneinsparung sind zunächst die Betriebskosten der zu vergleichenden Anlagen zu ermitteln. Die Betriebskosten einer Wärmeerzeugungs- bzw. einer Wärmerückgewinnungsanlage setzen sich zusammen aus Energiekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie Kapitalkosten (Tilgung und Verzinsung).

## 5.0 Wärmepumpentechnologie

### 5.1 Grundlagen

Neben den bekannten Systemen zur besseren Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie verzeichnen zunehmend auch die Verfahren eine steigende Nachfrage, die auf der rationellen Umformung basieren und nur einen geringen Primärenergieaufwand benötigen. Neben der Nutzung der thermischen Solarenergie bleibt hier als Alternative allerdings fast nur noch die Wärmepumpe übrig. Für den Anwendungsbereich der Wärmepumpe ist vor allem die richtige Einordnung der Wärmequelle und Wärmesenke in den Kältekreislauf ausschlaggebend, um günstige Bedingungen für die Leistungszahl zu erreichen. So sollte z. B. beachtet werden, dass eine Veränderung von 5 Kelvin Temperaturdifferenz eine Leistungsminderung von ca. 12% bewirkt. Hierdurch wird ersichtlich, dass die richtige Auslegung der Wärmeübertrager hinsichtlich der Vorlauftemperatur eine große Bedeutung hat.

#### 5.1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die EnEV bietet die Möglichkeit, baulichen Wärmeschutz (Dichtigkeit des Gebäudes, Fenster, Isolierung) und Anlagentechnik (Heizung, Brauchwarmwassererzeugung, Lüftung) gemeinsam zu planen, weil das Haus in seiner Gesamtheit betrachtet wird. Wenn eine Wärmepumpe installiert wird, können bei anderen Energieeinsparmaßnahmen Abstriche gemacht werden. Eine Sole-/Wasser-Wärmepumpe, die das Erdreich als Wärmequelle nutzt, erfüllt z. B. bei einem dürftigen Mindestwärmeschutz sogar die Anforderungen der EnEV und versorgt dennoch das Gebäude zuverlässig mit Wärme. Dies bedeutet, dass der Primärenergiebedarf in einem nicht so gut gedämmten Haus unter dem zulässigen Grenzwert gehalten werden kann, wenn eine hoch effiziente Anlagentechnik eingebaut wird. Umgekehrt ist es möglich, in einem sehr gut wärmedämmenden Haus durch Einsatz nicht so aufwendiger Heiztechnik das gleiche Ergebnis zu erreichen. Damit andererseits der Einsatz einer besonders guten Anlagentechnik nicht zu Lasten der Bauphysik geht, wurde der spezifische Wärmeverlust der Gebäudehülle begrenzt. Aus diesem Grund ist bei der Wärmedämmung ein Mindeststandard vorgegeben. Aufgrund der ständigen Verbesserung der Wärmedämmung steigen die Bedeutung und der relative Anteil des Lüftungswärmeverlustes am Gesamtheizenergiebedarf. Die Grundlage der drastischen Senkung des Heizenergiebedarfs basiert auf eine bessere Wärmedämmung, die die Transmissionswärmeverluste, die durch Wärmeleitung über die Gebäudehülle abgegeben werden verringert. Zu diesen Verlusten kommen noch die Lüftungswärmeverluste hinzu. Da gut gedämmte Gebäude ohnehin einen erhöhten Lüftungsbedarf haben, ist hier bereits der Ansatz für den Einsatz z. B. für eine Elektrowärmepumpe gegeben.

Durch den zusätzlichen Einsatz einer Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung werden diese Lüftungswärmeverluste zudem als gebäudeinterne Wärmequelle nutzbar gemacht. Diese Anlagentechnik wird zudem noch dadurch optimiert, dass die Warmwasserbereitung ebenfalls in den Kreislauf von Heizung und Lüftung mit einbezogen wird. Der Hauptanteil der Jahresheizenergie liegt zwar stets bei der Raumwärmeversorgung, der Investitionsaufwand für die Warmwasserbereitung ist jedoch bemessen am Jahresheizenergiebedarf relativ

hoch. Dieses erhöht andererseits den Anteil der Warmwasserbereitung an den Gesamtkosten und somit auch die Notwendigkeit, Einsparungen durch eine optimale Anlagentechnik zu erreichen.

Der Kompressorantriebsmotor einer Wärmepumpe für die Heizung eines Einfamilienhauses nimmt in der Regel ca. 7 kW Leistung auf. Die Lieferung dieser an sich nicht hohen Leistung durch den Verteilungsnetzbetreiber (VNB) ist jedoch deswegen problematisch, weil der Wärmepumpen-Antriebsmotor (Drehstromasynchronmotor) beim Anlauf ein Vielfaches des normalen Betriebsstromes zieht. Dieses führt zu einem Spannungseinbruch, das Licht flackert. Zudem läuft der Motor der Wärmepumpe in der Regel fast analog so häufig, wie der Brenner eines Wärmeerzeugers.

Durch besondere Anlaufschaltungen für einen »Sanftanlauf« wird nun der Spannungseinbruch verringert. Besonders unangenehm machen sich die Anlauf-Stoßbelastungen während der Spitzenbelastung des Netzes bemerkbar. Daher darf die Wärmepumpe nur in Absprache mit dem Verteilungsnetzbetreiber (VNB) durchlaufen oder nur außerhalb der Spitzenbelastung eingeschaltet werden. Die Stromunterbrechung erfolgt durch Steuerkommandos für nicht mehr als jeweils zwei Stunden, insgesamt jedoch für nicht mehr als sechs Stunden. Der freizügige Betrieb der Wärmepumpe, erfasst vom Zähler für den allgemeinen Verbrauch, verursacht erhöhte Betriebskosten, da hier der Pflichttarif mit einem hohem Arbeitspreis verbunden ist und somit der Leistungspreis steigt.

Aus volkswirtschaftlichen Aspekten weist die Bundestarifordnung Elektrizität (BTOElt) für den Betrieb von Wärmepumpen günstigere Bedingungen aus. Wenn der Verbrauch der Wärmepumpe von einem gesonderten Zähler erfasst wird und die Versorgung der Wärmepumpe in Spitzen- und Starkzeiten vom Versorgungsnetzbetreiber (VNB) unterbrochen werden kann, darf nach der BTOElt der Stromverbrauch nicht zur Ermittlung des Leistungspreises berücksichtigt werden. Bei einem zeitlich eingeschränkten Elektrizitätsbezug darf die Versorgung nicht länger als

- 960 Stunden im Jahr für Wärmepumpen in bivalenten, alternativ betriebenen Heizungsanlagen bestehen
- 2 Stunden oder insgesamt nicht länger als 6 Stunden innerhalb von 24 Stunden unterbrochen werden, für Wärmepumpen, die den Jahreswärmebedarf allein decken, d. h. monovalenter Betrieb, oder für Wärmepumpen in bivalent-parallel betriebenen Heizungsanlagen unterbrochen werden. Die Betriebszeit zwischen zwei Sperrzeiten darf jedoch nicht kürzer als die vorangegangene Sperrzeit sein.

Wenn vorausgesetzt wird, dass die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe über 2,8 liegt, ergibt sich in dem Fall ein Vorteil der regenerativen Energienutzung durch eine Elektrowärmepumpe gegenüber der Brennwerttechnologie, weil hier eine deutliche Primärenergieeinsparung zu verzeichnen ist. Die neue Sole-/Wasser-Wärmepumpe von Johnson Controls arbeitet im Leistungsbereich von 11 bis 30 kW mit leistungsgeregelter Digital Scroll Technologie für den Betrieb mit Erdreichwärmeübertragern und erreicht eine Gesamtleistungszahl (COP) von bis zu 5.

## 5.1.2 EnEV und Wärmepumpeneinsatz bei Sanierungen

Gegenüber modernen Wärmeerzeugern ist eine Wärmepumpe in der Lage

- den Primärenergiebedarf um 20 bis 40 % zu senken
- die Energiekosten dadurch um rund 50 % zu verringern
- die Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> erheblich zu reduzieren.

Neben den guten Effizienzdaten erwiesen sich die Systeme im Feldversuch auch als betriebssicher und wartungsarm. Im Detail zeigt sich, dass eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpen mit zunehmendem Wärmedämmstandard eine komfortable und wirtschaftlich günstige Heizungslösung ist. Dies resultiert, aus der Tatsache, dass der größte Teil der Heizenergie aus erneuerbaren Energien stammt, die aus dem Erdreich oder der Luft gewonnen werden sowie aus dem Umstand, dass für den geringen Strombedarf keine zusätzliche Infrastruktur geschaffen werden muss. Weil mit der EnEV sowohl der Zustand der Gebäudehülle als auch die Effizienz der eingesetzten Anlagentechnik gemeinsam betrachtet werden muss, bietet diese Verordnung ein großes wirtschaftliches und ökologisches Potenzial zur Energieeinsparung und zur Schonung der Umwelt.

Darüber hinaus wird eine Primärenergiebilanz erstellt, die eine qualitative Unterscheidung der verschiedenen Energieträger ermöglicht. Die EnEV schreibt für Gebäude einen maximalen Primärenergiebedarf vor. Wie der Bauherr diesen Grenzwert unterschreitet, kann er selbst entscheiden bzw. durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung belegen. Da die EnEV das Gebäude bzw. die Gebäudehülle und die Anlagentechnik (Heizungs- und Warmwasserbereitung) gemeinsam betrachtet, hat der Betreiber zur Entscheidungsfindung zwei Möglichkeiten: Entweder investiert er mehr in die Gebäudehülle, also durch eine verbesserte Bauphysik (Dämmung), oder er integriert eine effizient arbeitende Anlagentechnik. Andererseits darf der Bauherr aber auch bei einer besonders guten Anlagentechnik die Gebäudehülle nicht beliebig schlecht ausführen lassen. Aus diesem Grund wird seitens der EnEV auch der spezifische Wärmeverlust der Gebäudehülle begrenzt.

### Primärenergiebedarf

Da die EnEV den maximalen Primärenergiebedarf eines Gebäudes begrenzt, müssen auch die Energieverluste berücksichtigt werden, die bei der Gewinnung, Veredelung, dem Transport, der Umwandlung und dem Einsatz des Energieträgers entstehen. Zudem sind hier auch die Hilfsenergien, die für den elektrischen Antrieb der Pumpen und des Kompressors erforderlich sind mit einzubeziehen. Der Primärenergiebedarf eines Gebäudes berechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_P = e_P (Q_H + Q_{WW})$$

Hierbei bedeuten:

$Q_P$ : Primärenergiebedarf

$e_P$ : Anlagenaufwandszahl

$Q_H$ : Heizwärmebedarf

$Q_{WW}$ : Warmwasserwärmebedarf.

Für den Aufwand für den Warmwasserwärmebedarf gibt die EnEV einen spezifischen Wert mit  $Q_{tW} = 12,5 \cdot \text{kW/m}^2\text{a}$  vor.

Um einen möglichst geringen Primärenergiebedarf  $Q_p$  zu erreichen, sind daher zwei Varianten möglich:

- Reduzierung des Heizwärmebedarfs ( $Q_h$ ), d. h. also eine möglichst gute Gebäudedämmung erreichen
- Reduzierung der Anlagenaufwandszahl ( $e_p$ ), d. h. eine möglichst effiziente Anlagentechnik installieren.

Zur Ermittlung und Gegenüberstellung dieser beiden Größen liefert die EnEV zwei Berechnungsvorschriften. Hierbei wird der Jahresheizwärmebedarf nach der DIN V 4108 Teil 6 bestimmt und die Anlagenaufwandszahl errechnet sich aus der DIN V 4701 Teil 10. Die Anlagenaufwandszahl beschreibt hierbei das Verhältnis der von der Anlagentechnik aufgenommenen Primärenergie zu der von ihr abgegebenen Nutzwärme für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung.

Der Primärbedarf wird grundsätzlich mit dem Bilanzverfahren berechnet.

Für Wohngebäude mit einem Fensterflächenanteil bis 30 % lässt sich wahlweise das vereinfachte Heizperiodenbilanzverfahren oder das ausführliche Monatsbilanzverfahren gemäß DIN V 4108 Teil 6 in Verbindung mit DIN 4701 Teil 10 anwenden. Alle anderen Gebäude müssen nach dem Monatsbilanzverfahren berechnet werden. Zur Ermittlung der Anlagenaufwandszahl werden die auftretenden Verluste durch die Übergabe der Wärme an den Raum, die Verteilung der Wärme im Gebäude, die eventuell stattfindende Speicherung sowie die Hilfsenergien (Antrieb von Pumpen) für die Übergabe und die Verteilung berücksichtigt. Für den Fall, dass der Gebäudeeigner den Einsatz einer Wärmepumpe wählt, bleibt ihm die Erstellung des Primärenergienachweises erspart. Nach der EnEV kann ebenso bei Gebäuden, die mit einem regenerativen Energienanteil von mindestens 70 % versorgt werden, d. h. auch mit einer Wärmepumpe, der Primärenergienachweis entfallen.

Durch den Einsatz einer Wärmepumpe besteht die Möglichkeit die Wärme- bzw. Kühlenergie einer Wärmequelle (Grundwasser, Erdreich, Wasser oder Luft) zu Raumheiz- bzw. Raumkühlzwecken zu nutzen. Die Erdsonden haben auf der Wärmequellenseite aufgrund der hohen Quelltemperatur einen besonderen Vorzug. Bei der Installation der Erdsonden bestehen aber bei einer nicht fachgerechten Ausführung erhebliche Risiken. Diese betreffen primär die richtige wärmetechnische Ankopplung der Sonde an das Erdreich, sodass die im Vorfeld ermittelte Ergiebigkeit der Energiequelle auch tatsächlich genutzt werden kann.

Zu beachten sind hier die hydraulischen Problematiken auf der Warm- und Kaltwasserseite. Die relativ »kalten« Wärmequellen können unter Zuhilfenahme der Wärmepumpe für Heizzwecke, z. B. zur Warmwasserbereitung, Schwimmbaderwärmung, Raumheizung, etc. ausgenutzt werden. Bei einer Wärmepumpe wird mehr Energie als Wärme zu Heizzwecken abgegeben, als die Anlage an mechanischer oder elektrischer Energie aufnimmt. Die Differenz wird aus der kostenlos verfügbaren Energie der Umgebung gedeckt. Die Energiekosten sind daher wesentlich niedriger als dieses bei einer direkten elektrischen Heizung der Fall wäre. Im Vergleich mit brennstoffbeheizten Systemen zur Gebäudeheizung nimmt das Interesse an Wärmepumpen mit steigenden Brennstoffpreisen trotz der höheren Anlagenkosten zu.

### 5.1.3 Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresaufwandszahlen

Als Berechnungsbasis dient die Richtlinie VDI 4650 Blatt 1, 03-2003: »Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresaufwandszahlen von Wärmepumpenanlagen: Elektrowärmepumpen zur Raumheizung«. Zweck dieser Richtlinie ist die einfache Berechnung der Jahresaufwandszahl als Ausgangswert zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Heizkosten von Wärmepumpenanlagen.

Das Blatt 1 befasst sich zunächst mit elektrisch angetriebenen Wärmepumpenanlagen zur Raumheizung in monovalenter Betriebsweise, die die Wärmequellen Grundwasser, Erdreich und Außenluft nutzen. Die Berechnung basiert auf der Leistungszahl einer Wärmepumpe, die auf einem Prüfstand nach DIN EN 255 bestimmt wird. Durch verschiedene Korrekturwerte wird der Einfluss von Vorlauftemperatur, Temperatur der Wärmequelle, abweichenden Temperaturdifferenzen am Verflüssiger bei Messung und beim Betrieb sowie von Sole- bzw. Grundwasserpumpe berücksichtigt. Für Luft als Wärmequelle kann zwischen den Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15 °C sowie verschiedenen Standorten gewählt werden.

#### 5.1.3.1 Gütesiegel

Seit dem 3. Mai 1999 wurde das Gütesiegel (D-A-CH-WP) als Kürzel für Wärmepumpen in Deutschland, Österreich und der Schweiz eingeführt. Beteiligt sind in der Zusammenarbeit die Organisationen Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), Leistungsgemeinschaft Wärmepumpen Österreich (LGW) sowie der Initiativkreis Wärmepumpen e. V., Deutschland (IWP). Die D-A-CH fördert die Nutzung von Umweltwärme mittels serienmäßig hergestellten Qualitätspumpen und Wärmepumpenanlagen. Die Anforderungen für das D-A-CH-Wärmepumpensiegel umfassen:

- Seriengeräte gemäß Anforderungen des Prüfzentrums
- elektrische Sicherheitsprüfung; die Prüfbelege für die elektrische Sicherheit müssen mit der EG-Konformitätserklärung zusammen eingereicht werden
- Einhaltung der VNB-Anschlussbedingungen (Versorgungsnetzbetreiber)
- Leistungsmessungen nach EN 255
- minimaler gemessener COP-Wert
- Einhaltung der Schallemissionswerte
- Planungsunterlagen mit Mindestanforderungen
- vollständige Einbau- und Bedienungsanleitung
- flächendeckendes Kundendienstnetz
- zweijährige Vollgarantie
- zehnjährige Ersatzteilhaftung
- bei Wechsel eines Lieferanten muss ein Gerät (Verdichter und Wärmeübertrager) einer Baureihe neu gemessen werden
- Prüfgerätebeschaffung; es müssen vom Massenmodell drei Geräte mit Seriennummern bezeichnet werden, aus denen das Testzentrum eines auswählt; das zweite Gerät einer Baureihe kann die anmeldende Firma selbst bestimmen.

Um die Wärmepumpen im Wettbewerb miteinander vergleichen zu können, müssen die gleichen Betriebszustände zugrunde gelegt werden. Nach EN 255 wurden dazu folgende Kurz-

bezeichnungen eingeführt:

- W: Wasser (water)
- B: Sole (brine)
- A: Luft (air).

Die Wärmepumpenanlage (WPA) besteht aus der Wärmepumpe (WP) und der Wärmequellenanlage (WQA). Zur Kennzeichnung von Wärmepumpen und Wärmepumpenanlagen nach den verwendeten Übertragungsmedien sind bestimmend an

- 1. Stelle der Wärmeträger der kalten Seite (WP) bzw. die Wärmequelle (WPA)
- 2. Stelle der Wärmeträger der warmen Seite (Heizmedium) bzw. Wärmesenke.

### 5.1.3.2 RAL-Gütesicherung »Geothermische Anlagen«

Mit dem neuen, anerkannten Gütezeichen »Geothermische Anlagen«, zunächst gültig für den Bereich der Erdwärmesonden, bietet das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (RAL) verlässliche und neutrale Qualitätskriterien im Bereich der Erdwärmennutzung.

Die Gütesicherung »Oberflächennahe geothermische Anlagen, Teil: Erdwärmesonden, RAL-GZ 969« legt den Inhalt und Umfang der Güte und der Überwachungsmaßnahmen für die Errichtung des Primärkreislaufes oberflächennaher geothermischer Anlagen fest.

Bei der derzeit festgelegten Gütesicherung handelt es sich zunächst um die Anforderungen an Erdwärmesonden. Hierzu gehören u. a. die Qualifikation der Verantwortlichen und des eingesetzten Fachpersonals, eine gründliche Arbeitsvorbereitung, sorgfältige Ausführung der Bohrarbeiten und Ausbau der Bohrungen mit Erdwärmesonden sowie eine umfassende Dokumentation der Arbeiten. Die Gütesicherung stellt zudem hohe Anforderungen an das Unternehmen, wie Nachweis eines Versicherungsschutzes von mindestens 2 Mio. € gegen Personen- und Sachschäden, ein Beratungsgespräch mit Information des Kunden über die formalen Rahmenbedingungen sowie die Gewährleistung für die Ausführung der Arbeiten von mindestens fünf Jahren.

## 5.1.4 Leistungsbetrachtungen

### 5.1.4.1 Leistungs- und Arbeitszahl

Die Wärmepumpen werden mit mehreren thermodynamischen Kenngrößen beschrieben, u. a. mit dem Verhältnis von Leistungen (die Leistungszahl) und Energie bzw. Arbeit (Arbeitszahl). Mit der Leistungszahl wird das Verhältnis von momentan nutzbarer thermischer Leistung (kW) als Nutzen zur momentan aufgewendeten elektrischen Leistung (kW) als Aufwand definiert. Der englischsprachige Begriff für die Leistungszahl wird als COP-Wert (coefficient of performance) angegeben. Da sich der Betriebspunkt einer Wärmepumpenanlage mit der Heizdauer und mit der Außentemperatur ständig ändert, hat dies auch einen Einfluss auf die Leistungszahl. Die Leistungszahl ( $\beta$ ) oder JAZ wird als eine wesentliche Kenngröße für die Auswahl und den Vergleich von Wärmepumpen herangezogen. Hierbei handelt es sich um keine konstante Größe, weil die Temperaturdifferenz zwischen dem Verdampfer und Verflüssiger unterschiedlich ist. Die Leistungszahl wird umso größer, je gerin-

ger diese Differenz ist, d. h., je höher die Temperatur der Wärmequelle im Vergleich zu der des Verbrauchers ist. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Wärmepumpen für den Heizbetrieb generell mit möglichst geringen Heizwasser-Vorlauftemperaturen in Verbindung mit Niedrigtemperatur Radiatoren oder Fußboden-, bzw. Wandheizungen zu betreiben.

Die Arbeitszahl wird dagegen als Maß zur energetischen Umsetzung über einen bestimmten Zeitraum definiert und aus dem Verhältnis von Nutzwärme (kWh) zur aufgewendeten elektrischen Energie (kWh) gebildet. Mit der Jahresarbeitszahl (JAZ) wird dagegen die Energiemengen über den Zeitraum eines Jahres dargestellt. Die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpenanlage errechnet sich aus dem Quotienten der jährlich gelieferten Wärme zur jährlich aufgenommenen elektrischen Antriebsenergie, bezogen auf den gesamten Anlagenumfang, d. h. Wärmequelle, Wärmeverteilung, Regelung, etc.

Die eingesetzte elektrische Energie ist leicht mit einem separaten kWh-Zähler messbar. Zur Messung der Heizwärme ist ein Wärmemengenzähler in der Wärmenutzungsanlage erforderlich.

Wie effizient Wärmepumpen in der Praxis arbeiten, ist aus der Jahresarbeitszahl (JAZ) ersichtlich und sollte nicht mit der Leistungszahl (COP-Wert) verwechselt werden, die aus den Leistungsangaben der Produkthersteller zu entnehmen sind. Insofern kennzeichnet der COP, wie viel elektrischer Strom benötigt wird, um eine Einheit Wärme für den Heizkreis zu produzieren. Bei diesem Wert handelt es sich aber nur um einen theoretischen Laborwert zur statisch festgelegten Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Nutzwärme im Gebäude. Die COP-Werte streuen bei den einzelnen Wettbewerbsprodukten erheblich. Mit zunehmender Wärmequellentemperatur und abnehmender Temperatur des Wärmeabnehmermediums steigt der COP-Wert.

Demgegenüber wird mit der Jahresarbeitszahl indirekt der Wirkungsgrad der Wärmepumpe im praktischen Betrieb definiert, wobei hier auch die Ergebnisse eines Betriebsjahres nach der Installation enthalten sind. In der Jahresarbeitszahl werden zudem auch der Stromverbrauch von der Pumpe und die Regelung berücksichtigt. Die Jahresarbeitszahl sollte zwischen 3,5 und 4 liegen und ist nicht zu verwechseln mit der Leistungszahl.

Die Arbeitszahl ist auf die Endenergie bezogen, hier elektrischer Strom, für einen Bezug auf die Primärenergie muss die Arbeitszahl durch den Primärenergiefaktor von Strom (nach GEMIS: 3) dividiert werden. Demgegenüber dient die Jahresaufwandszahl dem Fachplaner, Energieberater, Produkthersteller, Investor und Betreiber als Ausgangswert zur Ermittlung des zu erwartenden Energieverbrauchs und der Betriebskosten einer Wärmepumpenanlage.

Der derzeitige Stand der Wärmepumpentechnologie für den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern: Praxisnahe Erfassung der Leistungsdaten im Vergleich der Wärmepumpensystemvarianten stellt sich wie folgt dar:

- Wärmepumpen mit Fußbodenheizung erreichen im Mittel Jahresarbeitszahlen von 3,4.
- Grundwasserwärmepumpen schneiden im Mittel bei Jahresarbeitszahlen von 3,2 etwas schlechter ab. Die Gründe hierfür sind zu kleine Bohrlöcher, eine zu hohe Nennleistung der Grundwasserpumpe und verstopfte Wasserfilter. Jahresarbeitszahlen mit Spitzenwerten von 4,0 sind realistisch.

Die Luft-/Wasser-Wärmepumpen bilden das Schlusslicht. Eine Fußbodenheizung erreicht im Mittel Jahresarbeitszahlen nicht mehr als 2,6. Noch schlechter steht es im Sanierungsfall



im Verbund mit statischen Heizflächen (Radiatoren, Plattenheizkörper). Hier kommt im Mittel die erreichte Jahresarbeitszahl nicht über 2,0.

Während von einer Kälteanlage der aus den Räumen aufgenommene Wärmeüberschuss (innere und äußere Kühltlast) an die Umgebung (Luft, Wasser) abgeführt wird, ist bei der Wärmepumpenheizung in Umkehr hierzu die Zuführung der aufgenommenen Umweltwärme, aus Luft, Wasser oder Erdreich in die Räume (Raumheizung) kennzeichnend. Der Betriebspunkt wird nach DIN EN 14511 bestimmt und definiert den Zustand der Wärmepumpe, bei dem die Leistungszahl (COP-Wert) gemessen wird. Bei einer Soletemperatur von 0 °C und Heizungsvorlauftemperatur von 35 °C wird der Betriebspunkt mit »B0/W35« definiert.

- Luft/Wasser: 3,0 (A2/W35)
- Sole/Wasser: 4,0 (B0/W35)
- Wasser/Wasser: 4,5 (W10/W35).

*Software-Tools:* Berechnung der Jahresarbeitszahlen im Kurzverfahren.

Unter Verwendung der Richtlinie VDI 4650 Blatt 1; Ausgabe: 09-2009 lässt sich auf einfache Art die Jahresarbeitszahl von Elektrowärmepumpen berechnen, die den Ausgangswert zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Heizkosten von Wärmepumpenanlagen bildet. Das Berechnungsverfahren basiert auf in der Praxis ausgeführte Anlagen. Die Richtlinie behandelt monovalente, monoenergetische und bivalente Elektrowärmepumpen, die zur Raumheizung und Warmwasserbereitung dienen und die Wärmequellen Grundwasser, Erdreich und Außenluft nutzen. Die Berechnung basiert auf den Leistungszahlen von Wärmepumpen, die auf Prüfständen nach DIN EN 14511 bzw. DIN EN 255 gemessen werden. Durch verschiedene Korrekturwerte lässt sich der Einfluss der Temperaturdifferenzen am Verflüssiger berücksichtigen, die beim Messen im Betrieb je nach Temperatur der Wärmequelle, der Sole- oder Grundwasserpumpe und der Vorlauftemperatur des Wärmeverteilsystems auftreten. Für Luft als Wärmequelle kann der Nutzer der Richtlinie zwischen den Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15 °C und den unterschiedlichsten Normaußentemperaturen wählen.

#### 5.1.4.2 Leistungsmessungen und Normbetriebspunkte nach DIN EN 255

Der Vergleich der Leistungszahlen verschiedener Wärmepumpen ist daher nur unter genormten Bedingungen möglich, die die Wärmequellentemperatur und Heizwassertemperatur berücksichtigen. Die Angaben erfolgen hierbei z. B. in der Form:

- Wasser/Wasser-Wärmepumpe: W10/W35, d. h. Wasserquellentemperatur 10 °C, Heizwassertemperatur 35 °C
- Sole/Wasser-Wärmepumpe: (B0)S0/W35, d. h. Soletemperatur 0 °C, Heizwassertemperatur 35 °C
- Luft/Wasser-Wärmepumpe: (L2)A2/W35, d. h. Lufttemperatur 2 °C, Heizwassertemperatur 35 °C

bzw. nach genormten Messbedingungen.

### Beispiele für genormte Betriebsbedingungen (Messbedingungen)

|        |                                  |   |
|--------|----------------------------------|---|
| A2/W35 | Wärmequelle Luft                 | Temperatur 2 °C,<br>relative Feuchte 93 % |
|        | Medium<br>Wärmeabnahme<br>Wasser | Vorlauftemperatur 35 °C                   |
| B5/W50 | Wärmequelle Sole                 | Temperatur 5 °C                           |
|        | Medium<br>Wärmeabnahme<br>Wasser | Vorlauftemperatur 50 °C                   |

Die in einem Kälteprozess freiwerdende Wärme (Anergie = nicht nutzbare Energie gegenüber der Umgebung) kann mittels der Wärmepumpe, unter Aufwendung von Arbeit, aus der Umgebung entzogen werden. Diese Wärme kann dann auf einem höheren Temperaturniveau zu Heizungszwecken verwendet werden.

Eine Vergleichsmöglichkeit für verschiedene Wärmepumpenfabrikate bietet die Leistungszahl  $\epsilon_{WP}$

$$\epsilon_{WP} = \frac{Q_o + P_V}{P_{WP}} = \frac{Q_{WP}}{P_{WP}}$$

Hier bedeutet:

$Q_o$ : Kälteleistung, Leistung der Wärmequellenanlage (kW)

$P_{WP}$ : Leistungsaufnahme des Verdichters, der Pumpen und Ventilatoren

$Q_{WP}$ : Heizleistung, thermische Leistung an der Wärmenutzungsanlage.

Da sich der Betriebspunkt einer Wärmepumpenanlage mit der Heizdauer und mit der Außentemperatur ständig ändert, hat dies auch einen Einfluss auf die Leistungszahl  $\epsilon$ . Eine Betrachtung über die gesamte Heizperiode ist mit der Arbeitszahl  $\beta$  möglich.

$$\beta_{WP} = \frac{Q_{WP}}{P_{WP}}$$

Hier bedeutet:

$Q_N$ : Nutzwärme (kWh)

$W_{WP}$ : elektrische Energieaufnahme in einem bestimmten Zeitabschnitt.

#### 5.1.4.3 Wärmequellenanlage

Die Betriebseigenschaften sowie die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpenheizungsanlage sind im hohen Maß von der Art der genutzten Wärmequelle abhängig und werden vom zur Verfügung stehenden Temperaturniveau mitbestimmt. Grundvoraussetzungen für einen wirtschaftlichen Wärmepumpenbetrieb wird erreicht durch:

- geringe Temperaturdifferenzen zwischen der Wärmenutzungs- und Wärmequellenseite
- möglichst hohe und weitgehend konstante Wärmequellentemperatur.

## Vor- und Nachteile der Wärmequellen

### *Außenluft*

Die Außenluft steht überall problemlos zur Verfügung. Sie ist die am häufigsten genutzte Wärmequelle, hat aber den schlechtesten Wirkungsgrad, besonders bei kalten Außentemperaturen.

Die Außenluft kann überall in unbegrenztem Umfang mit einem geringen Erschließungsaufwand genutzt werden. Bei niedrigen Außentemperaturen fällt jedoch die Leistungszahl ( $\epsilon_{WP}$ ) stark ab. Nachteile sind ferner: bei höchstem Wärmebedarf niedrigste Lufttemperaturen; bei Verdampfertemperaturen um 0 °C bildet sich Eis, daher ist die Außenluft nur bis 2 °C nutzbar. Zusätzlich wird die Wirtschaftlichkeit des Heizbetriebes durch die erforderliche zyklische Abtaugung des Luftkühlers (Reifbildung ab ca. 2 °C) beeinträchtigt. Ferner sind hier große Luftvolumina nötig, da die spezifische Wärmekapazität von Luft geringer als die von Wasser ist ( $c = 0,36 \text{ Wh/m}^3\text{K}$  im Vergleich zu Wasser  $c = 1,16 \text{ Wh/kgK}$ ).

Wegen der Luftverschmutzung muss der Verdampfer gereinigt werden und kann korrodieren. Der luftgekühlte Kondensator entwickelt hohe Geräusche.

### *Grundwasser*

Das Grundwasser bietet ganzjährig ein gleichmäßiges Temperaturniveau und damit eine günstige Jahresarbeitszahl. Es erfordert jedoch höhere Investitionskosten und ist nicht überall einsatzfähig. Die Verfügbarkeit ist hierbei nicht überall sichergestellt. Ferner sind beachtliche Erschließungskosten für die Brunnenanlagen (Förder- und Schluckbrunnen) sowie zusätzliche Betriebskosten für die Wasserförderung, Unterhaltung und den Korrosionsschutz aufzuwenden. Das zur Verfügung stehende konstante Temperaturniveau von ca. 7 bis 12 °C (in Tiefen ab 15 m, sind es ca. 9 °C) ist daher sehr ungünstig. Zusätzlich müssen zur Errichtung der Brunnenanlagen Genehmigungsverfahren eingehalten werden.

### *Oberflächenwasser*

Das Oberflächenwasser als Wärmequelle steht nur in Ausnahmefällen zur Verfügung. Das Temperaturniveau schwankt zwischen 15 bis 2 °C und ist darunter nicht mehr verfügbar. Die Anlagen- und Betriebskosten sind im Vergleich zur Grundwassernutzung gering. Ferner werden evtl. Wasserreinigung und Korrosionsschutzmaßnahmen notwendig.

### *Stadtwasser*

Die Verfügbarkeit des Stadtwassers als Wärmequelle ist in der Regel durch die örtlichen Vorschriften stark eingeschränkt und eine Nutzungsgenehmigung nur noch in Ausnahmefällen zu erwarten. Das zur Verfügung stehende Temperaturniveau liegt im Jahreszyklus zwischen 5 und 15 °C. Den relativ geringen Anlagenkosten stehen jedoch hohe Betriebskosten (Wasser-/Abwasserpreis) gegenüber.

### *Erdreich*

Die Verwendung des Erdreichs als Wärmequelle kommt aufgrund der Erdarbeiten im Allgemeinen nur bei Neubauten in Frage. Eine wichtige Rolle spielen Bodenbeschaffenheit und der Feuchtegehalt. Die Temperaturschichtung ist in entsprechender Tiefe unter Terrain fast gleichmäßig.

### *Prozessabwärme*

Die Prozessabwärme aus industriellen Anlagen, z. B. Kühlwasser von Kraftwerken, Abwärme von Kühl- und Klimaanlage, Abluft aus Wohnungen, Hallenbädern, Ställen und dergleichen haben den Vorteil meist relativ hoher Temperaturen. In der Regel wird hier aber der Einsatz einer Kühlung unumgänglich sein.

### *Sonnenenergie*

Die Sonnenenergie kann, bei generell freier Verfügbarkeit, als direkte Strahlung in unseren Breitengraden mit einer mittleren Sonnenscheindauer von 1400 bis 1900 h/a, nur zeitweise genutzt werden. Das zur Verfügung stehende Energieniveau ist zudem tages- und jahreszeitenabhängig, stark schwankend von 0 bis 800 W/m<sup>2</sup> und dazu noch gegensätzlich zum Heizwärmebedarf. Für die Erschließung dieser Quelle sind hohe Investitionskosten (Absorberdach, Kollektoren), für die Nutzung dagegen geringe Kosten aufzuwenden.

## **5.1.4.4 Wärmepumpenfunktionsprinzip**

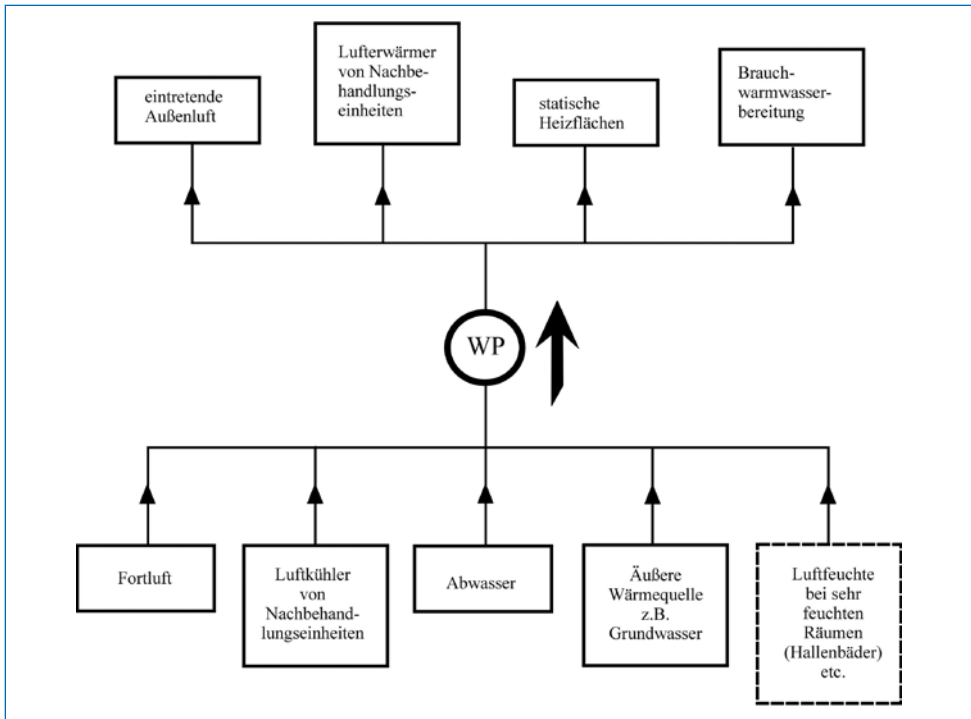
Der Kältemittelkreis einer Wärmepumpe funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie ein Kühlschrank, nur umgekehrt. Die Wärmepumpe entzieht der Umwelt (Erdbreich, Wasser oder Luft) die Wärme und führt sie dem Heizsystem zu.

Beispiel Erdsonde: Das Kältemittel verdampft aufgrund der Energiezufuhr. Der Dampf wird zur Wärmepumpe transportiert und dort mithilfe eines Kompressors auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau verdichtet. Über einen zweiten Wärmeübertrager (Verflüssiger) wird die Wärme nun an das Heizsystem abgegeben. Der immer noch hohe Druck wird über ein Expansionsventil entspannt. Nun gelangt das flüssige Kältemittel wieder zur Erdsonde und der Kreislauf ist geschlossen.

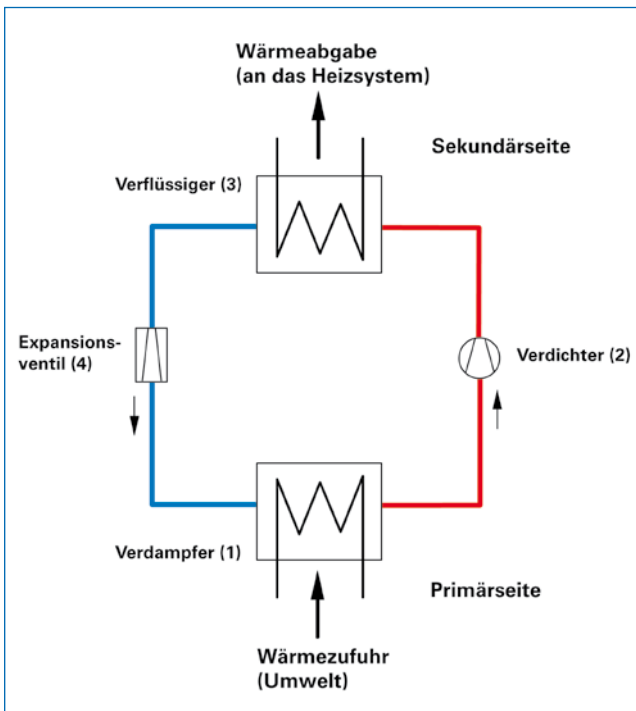
Die Zentralkomponente der Wärmepumpe bildet der Kompressor. In modernen Wärmepumpen werden zwei Verdichterprinzipien angewandt: zum einen der Hubkolbenkompressor und zum anderen der Scrollkompressor (Spiralverdichter). Sobald der Kompressor anspringt, saugt es das Kältemittel durch die Rohre und verdichtet es.

Der Druck erhöht sich wobei die Temperatur ansteigt. Über die Kühlrippen auf der Geräterückseite wird die Wärme an die Raumluft abgegeben. Hierbei verflüssigt sich der Kältemitteldampf und es entsteht Kondensationswärme. Innerhalb des Kältemittelkreislaufs sorgt anschließend ein Drosselventil bei konstanter Enthalpie ( $h = \text{const.}$ ) für die Abkühlung. Generell ist aber auch zu beachten, dass je energieeffizienter eine Wärmepumpe arbeitet, umso weniger ihr Stromverbrauch die Umwelt belastet. Eine Möglichkeit, die Umweltverträglichkeit zu optimieren, besteht in dem Anschluss der Solarthermieanlage, z. B. mittels Solarspeicher. Die Energieeffizienz der Wärmepumpe lässt sich als Hybridsystem mit Nutzung der Solarthermie zur Warmwasserbereitung erheblich verbessern.

Die Sorptionswärmepumpen arbeiten ebenfalls mit einem geschlossenen Kreislauf. Die Wärmeübertragung beruht hier jedoch auf einem physikalisch-chemischen Prozess in einem Lösungsmittelkreislauf, wobei die für die Temperatur- und Druckerhöhung notwendige Energiezufuhr durch eine Wärmequelle erfolgt.



**Abb. 5-1:** Wärmequelle/Wärmesenke beim Wärmepumpeneinsatz (Quelle: IB-THEISS, München)



**Abb. 5-2:** Kreisprozess einer konventionellen Wärmepumpe (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

Der Wärmepumpenprozess erfolgt als geschlossener Prozess in vier Stufen:

**1. Verdampfer**

Die Umweltenergie aus der Luft, der Erde oder dem Wasser (z. B. 10 °C) bringt das in der Wärmepumpe zirkulierende, FCKW-freie Medium (z. B. R 407 c), das einen sehr tiefen Siedepunkt aufweist, zum Verdampfen.

**2. Verdichter/Kompressor**

In der Regel handelt es sich um elektrisch angetriebene Kompressoren, die das verdampfte Medium auf hohen Druck und ein hohes Temperaturniveau anheben.

**3. Kondensator (Verflüssiger)**

Die Energie – nun auf einem hohen Temperaturniveau – wird an das Heizungsmedium abgegeben. Das gasförmige Medium (Arbeitsmittel/Kältemittel) wird wieder flüssig.

**4. Expansionsventil**

Mithilfe des Expansionsventils wird der Druck abgebaut, wobei der Enthalpiewert konstant bleibt.

### **5.1.4.5 Scrollverdichter**

Der Scrollverdichter wurde 1905 von Léon Creux erfunden. Der Scrollverdichter oder Scrollkompressor (engl. scroll »Getriebeschnecke«) wird zur Gasverdichtung (z. B. Luft oder Kältemittel) genutzt und in der Gebäudetechnik, z. B. in Wärmepumpen oder Kältemaschinen, eingesetzt. Dieses Verdichtsystem besteht aus zwei ineinander verschachtelten Spiralen, von denen eine stationär ist und die andere kreisförmig in der ersten bewegt wird. Dabei berühren sich die Spiralen mehrfach und bilden innerhalb der Windungen mehrere ständig kleiner werdende Kammern. Das zu verdichtende Material gelangt in diesen Kammern bis zum Zentrum, wo es dann seitlich austritt.

### **5.1.4.6 Geräuschemissionen**

Die Integration von Wärmepumpen innerhalb und vor allem außerhalb von Gebäuden kann der abgestrahlte Luftschall zu Problemen führen. Dieses betrifft primär den Einsatz von Luft-/Wasser-Wärmepumpen, da die Lärmquellen in Form der Ventilatoren und Verdichter enthalten sind. Je nach Leistung der Wärmepumpe stellt entweder der Ventilator oder der Verdichter die Hauptschallquelle dar, die auch konstruktionsabhängig ist. Bei innen aufgestellten Wärmepumpenanlagen ist zusätzlich ein Körperschalleintrag in die angrenzenden Räume zu erwarten. Hauptverursacher ist hier primär der Verdichter des Kältemittelkreislaufes, dessen Hauptstörfrequenz in der Regel tieffrequent im Bereich um ca. 50 Hz liegt. Im Gegensatz dazu liegt die Hauptstörfrequenz der Ventilatoren bei ca. 250 Hz.

Verbesserungsvorschläge:

- Bei der Innenaufstellung sollte der Körperschalleinfluss auf die Luftschallabstrahlung durch zusätzliche Entkoppelungsvarianten reduziert werden.
- Körperschallentkoppelung des Verdichters zum Gehäuse
- Verbesserung der Schalldämpfung am Lufteinlass und Luftauslass bei Außenaufstellung

- schalldämmender sowie schalldämpfender Zu- und Abluftkanal (integrierter Schalldämpfer) bei Wärmepumpen für Innenaufstellung
- Körperschallentkopplung bei Luftkanaldurchführungen und Kältemittelleitungen im Wand-/bzw. Deckenbereich
- Ventilatoranpassung an die tatsächlich erforderliche Luftmenge (ggf. Motoren mit Frequenzumformer)
- verbesserte Abdichtung von Fugen und Durchlässen am Gehäuse.

### Einhaltung des Beurteilungspegels nach TA-Lärm

Als allgemeine Verwaltungsvorschrift zum BImSchG muss die technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) beachtet werden. Sie soll die Allgemeinheit und vor allem die Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche (von außen) schützen.

Die Vorgaberichtwerte der BImSchG (TA-Lärm) ist je nach Lärmquellenabstand zum Immissionsort, z.B. Nachbarfenster, zu berechnen, wobei der Beurteilungspegel einerseits nach der Lage (Gebiet) und andererseits als Nachtwert zu berücksichtigen ist.

**Tab. 5-1:** Beurteilungspegel ( $L_f$ ) für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden (Quelle: TA Lärm)

| Aufstellungsort        | tags dB (A) | nachts dB (A) |
|------------------------|-------------|---------------|
| reine Wohngebiete      | 50          | 35            |
| allgemeine Wohngebiete | 55          | 40            |
| Gewerbegebiete         | 65          | 50            |
| Industriegebiete       | 70          | 70            |

Die Grundlage der Berechnung des Beurteilungspegels der TA Lärm wird eine freie halbkugelförmige Ausbreitung des Schalls, bei Windstille und bei einer definierten Außenluftfeuchte berücksichtigt. Zu beachten ist, dass zusätzliche Hindernisse, z.B. bauliche Begebenheiten (Schallschatten) das Ergebnis beeinflussen können.

## 5.1.5 Genehmigung

### 5.1.5.1 Bauliche Aspekte

Die Erdwärme wird entsprechend dem § 3 Abs. 3 Nr. 2 b des Bergbaugesetzes (BergG) den bergfreien Bodenschätzen gleichgestellt. Die Einschränkung besteht in der grundstückübergreifenden Versorgung mit Erdwärme. In der Praxis wird generell wie folgt verfahren:

- Für die Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme im Teufenbereich > 100 m sind die Bestimmungen des BergG anzuwenden.
- Die Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme im Teufenbereich bis 100 m sind vom Geltungsbereich des BergG ausgenommen.

Bei der thermischen Nutzung des Untergrunds stehen Benutzungstatbestände zur Entnahme und Wiedereinleitung im Vordergrund, d. h. hier sind wasserrechtliche Regelungen zu berücksichtigen. Insofern sind hier die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) in Verbindung mit den Wassergesetzen der Länder sowie die hier veröffentlichten Verwaltungsvorschriften zu berücksichtigen. Nach § 3 Abs. 2 WHG sind zur Benutzung u. a. nachfolgend aufgeführte Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt oder geeignet sind
- Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen
- Arbeiten, die dazu dienen, in den Boden einzudringen, bedürfen normalerweise keiner wasserrechtlichen Genehmigung, sind jedoch nach § 35 WHG bei der zuständigen Wasserrechtsbehörde in Verbindung mit den landesgesetzlichen Regelungen zumindest anzuzeigen.

In der Anzeige zur thermischen Nutzung des Untergrunds sollte enthalten sein:

- Antragsteller oder Planer im Auftrag des Bauherrn
- Anlagenbeschreibung mit der angedachten Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
- Herstellererklärung zur Wärmepumpe (Typ, Leistungszahl, verwendetes Kältemittel, etc.)
- Lageplan mit dem eingetragenen Standort für die Nutzungsart des Untergrunds (z. B. Horizontal-, Grabenkollektor, Erdsonden, o. ä.)
- Zertifikate (z. B. Bauartzulassungen) für die verwendeten Materialien bei der Installation des Kollektors oder der Erdsonden
- Datenblätter zum Wärmeträgermedium und zum Verfüllmaterial (z. B. Betonit)
- Zulassungsbescheide vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) für die Bohrunternehmen.

Zudem sollten nachfolgend aufgeführte Kriterien bei der thermischen Nutzung des Untergrunds beachtet werden:

- schonender Umgang mit dem Grundwasser
- wassergefährdende Stoffe dürfen auf keinen Fall in das Grundwasser gelangen
- eine thermische Nutzung des Untergrunds ist in Trinkwasserschutzgebieten ausgeschlossen. Ausnahme: Über eine erweiterbare Zone III muss von Fall zu Fall entschieden werden, d. h. die Versorgung mit Trinkwasser, selbst über einen Hausbrunnen, hat stets Vorrang.

### 5.1.5.2 Wasserrechtliche Aspekte

Die Entnahme und Wiedereinleitung von Grundwasser entspricht immer eine Benutzung nach § 3 WHG.



*Beispiel:* Wärmepumpe mit Grundwasserbrunnen.

Eine Wasser-/Wasser-Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 10 kW und einer Leistungszahl von 5,8 sowie einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1,68 kW benötigt als Verdampfungsenergie einen Wärmestrom von 8,32 kW. Bei einem  $\Delta T$  von 3 K folgt daraus, dass aus dem Entnahmebrunnen ein Volumenstrom von 2,39 m<sup>3</sup>/h zur Verfügung stehen muss.

In diesem Fall sind nachfolgend aufgeführte wasserwirtschaftliche Randbedingungen zu erfüllen:

- Das genutzte Grundwasser muss in den gleichen Grundwasserleiter wieder eingeleitet werden, aus dem es entnommen wurde.
- Es dürfen keine schädlichen Verunreinigungen des Grundwassers entstehen.
- Die Einleitung des abgekühlten oder erwärmten Wassers in den gleichen Grundwasserleiter muss über eine zweite Bohrung sichergestellt werden (Schluckbrunnen).

### 5.1.5.3 Wasserrechtliche Aspekte für oberflächennahe Geothermie

#### Wärmepumpe mit Erdwärmekollektoren

In Ausnahmefällen kann ein erlaubnispflichtiger Tatbestand nach WHG gegeben sein. Aus diesem Grund muss von Fall zu Fall überprüft werden, ob beim Einbau der Erdwärmeflächenkollektoren oder der Erdregister Grundwasser angetroffen wird oder nicht. Eine Anzeige nach § 35 WHG in Abhängigkeit von den örtlich anzuwendenden Landesvorschriften muss hier nicht unbedingt erforderlich sein. In jedem Fall sind hier folgende wasserwirtschaftliche Ziele zu beachten:

- Auch für den Fall, dass in der vorgesehenen Einbautiefe Grundwasser ansteht, kann dem Einbau der Erdwärmeflächenkollektoren zugestimmt werden, wenn ein freier Wasserspiegel vorliegt (keine Verbindung zu anderen Grundwasserleitern).
- Das Wärmeträgermedium muss den Anforderungen der VDI 4640 entsprechen (Antifrogen/Wassergemisch).
- Antifrogen ist als wassergefährdender Stoff eingestuft (Problematik: Korrosionsinhibitoren ca. 1 %).

#### Wärmepumpe mit Erdwärmesonden

Ob für einen Einsatz von Erdwärmesonden eine Genehmigung nach WHG erforderlich wird, muss einerseits von Fall zu Fall untersucht werden und wird andererseits auch von den Behörden unterschiedlich bewertet. Bei Einzelanlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern besteht in der Regel aufgrund der geringfügigen Temperaturveränderung keine Genehmigungspflicht.

Für den Fall, dass im tieferen Untergrund Grundwasser angetroffen wird, ist natürlich aufgrund der ständigen Temperaturveränderung des Grundwassers und somit der physikalischen Veränderung auch ein Genehmigungspflicht verbunden.

**Bohr- und Nutzungsanzeige für Erdwärmesonden**

Zur Erstellung einer Erdwärmesonde darf nur ein Bohrunternehmen mit einem Zertifikat nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 120 oder mit einem Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen beauftragt werden. Der Grund für die hohen qualitativen Anforderungen liegt im möglichen Eingriff in die Wasserfassungen. Bei einer nicht ausreichenden Verpressung des Bohrloches könnte es zur Gefährdung der Wasserfassung kommen.

**Wärmepumpe mit Energiepfählen**

Bei nicht tragfähigem Untergrund für Objekte müssen in der Regel Pfahlgründungen errichtet werden. Wenn in diesem Bereich ein Teil der Pfahlgründungen als Energiepfähle konzipiert innerhalb des Grundwassers ragen, sind diese nach WHG genehmigungspflichtig.

**5.2 Konstruktionsvarianten**

Am häufigsten werden anschlussfertige Wärmepumpen verwendet, bei denen der komplette Kältekreislauf mit den Sicherheits- und Steuerungs-Komponenten fabrikmäßig hergestellt und geprüft wird. Hinsichtlich der Antriebsenergie wird unterschieden:

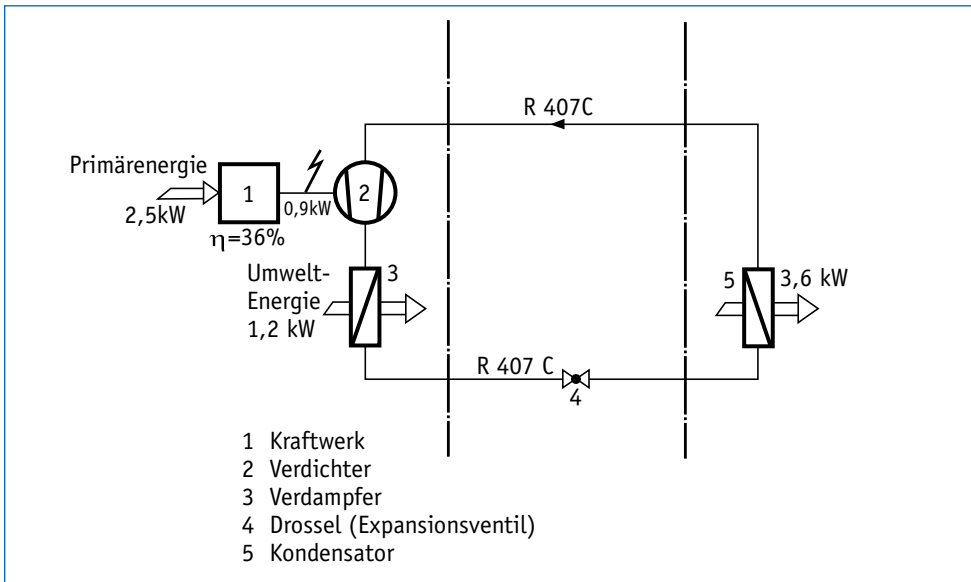
- Kompressorwärmepumpen mit Elektromotorantrieb
- Kompressorwärmepumpen mit (Erd-)Gas- und (Heiz- bzw. Diesel-)Öl-Verbrennungsmotorantrieb
- Absorptionswärmepumpen mit (Erd-)Gas- und (Heiz- bzw. Diesel-)Öl-Feuerung.

**5.2.1 Elektrowärmepumpe**

Für den Einsatz einer Elektrowärmepumpe bietet idealer Weise eine Kombination mit einem Niedertemperaturheizsystem, z. B. einer Fußbodenheizung an. Neben den elektrischen Antrieben können die Kompressionswärmepumpen generell auch mit Erdgas, Dieseldieselfkraftstoff oder Biomasse (Rapsöl, Biogas) betrieben werden, wobei hier ein Verbrennungsmotor (VM) verwendet wird. Ein zusätzlicher Investitionsaufwand besteht natürlich in der Errichtung der Abgasführung und der Installation der Kraftstoffleitungen sowie der Betankung.

**Tab. 5-2:** Elektrowärmepumpensysteme (Quelle: IB-THEISS, München)

| Medium der Wärmequelle                         | Wärmepumpe               | Medium der Wärmesenke (Heizung) |
|--|--------------------------|---------------------------------|
| Luft   | Luft/Wasser-Wärmepumpe   | Wasser                          |
| Erdreich (Flächenkollektoren, Erdsonden, etc.) | Sole/Wasser-Wärmepumpe   | Wasser                          |
| (Grund-)Wasser                                 | Wasser/Wasser-Wärmepumpe | Wasser                          |



**Abb. 5-3:** Funktionsprinzip der konventionellen Elektrowärmepumpe (Kompressionswärmepumpe COP = 4,0) (Quelle: IB-THEISS, München)

**Tab. 5-3:** Vor- und Nachteile der Luft/Wasser-Elektrowärmepumpen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Vorteile  | Nachteile  |
|---|--|
| niedrige Jahresenergiekosten  | hohe Investitionskosten  |
| Investitionskostenzuschüsse durch den Bund                                | hohe Jahresvollkosten  |
| Investitionskostenzuschüsse durch den regionalen Energieversorger möglich | Bei Nutzung der Außenluftenthalpie verhalten sich der Wärmebedarf und das Angebot tendenziell gegenläufig. Folglich wird hier der Einsatz eines Speichers und eine Zusatzheizung erforderlich. |
| ausgereifte Technologie auf sehr hohen Niveau                             |  |
| hoher Komfort   |  |
| automatische Regelung mit kurzen Ansprechzeiten                           |  |
| Einbindung regenerativer Energien   |  |
| geringer Platzbedarf  |  |

Aus der Betrachtung und im Vergleich fällt hierbei die längst etablierte, kombinierbare Nutzung von Erdgas und Umweltwärme zu schnell heraus, z. B. die Brennwerttechnologie in Kombination mit einer Solarthermieranlage. Während die Solarthermieranlage bei der Markteinführung noch individuell zusammengestellt und die einzelnen Komponenten im Gebäude montiert werden mussten, kommen in den letzten Jahren zunehmend Systemlösungen zum Einsatz. Hier sind bereits Brennwertwärmeerzeuger, Warmwasserbereitung und Solarspeicher Solarthermiestation und die Regelung zusammengefasst. Durch die werksseitige Abstimmung ist ein optimales Zusammenwirken der einzelnen Komponenten gewährleistet.

## 5.2.2 Gasmotorische Wärmepumpe

Bei der Gaswärmepumpe wird bei der Anwendung des Kompressionsprinzips der Kältekompressor (Verdichter) durch einen Verbrennungsmotor angetrieben. Neben der durch den Kälteprozess gewonnenen Umweltenergie (ca. 90 %) werden hierbei die Enthalpie der Verbrennungsgase in einem Abgaswärmeübertrager (ca. 50 %) sowie die Motorkühlwärme (ca. 30 % der Nutzwärme) für den Heizprozess genutzt. Im Gegensatz zur Elektrowärmepumpe wird durch diesen direkten Energieeinsatz beim Verbraucher ca. 70 % des Primärenergieeinsatzes dazu gewonnen. Die gesamte Nutzungsenergie beträgt ca. 170 % des Primärenergieeinsatzes.

Der komplexere Aufbau und Betrieb dieser Verbrennungsmotor-Wärmepumpenanlagen sowie das aufwendige Umfeld (Abgasabführung, Immissionsschutz, Geräuschkämmung, Brennstoffzuführung bzw. Brennstofflagerung, erfordert im Vergleich zur Elektrowärmepumpe einen höheren Anlagenkosten- und Betriebsaufwand. Aus diesem Grund werden verbrennungsmotorisch betriebene Wärmepumpen nur bei größeren Anlagen, z. B. in Krankenhäusern, Hallenbädern, Schulen, Verwaltungs- und Versicherungsbauten, Wohnblöcken, etc. eingesetzt.

### Erdgasbetriebene Wärmepumpensysteme

Thermisch aktivierte Wärmepumpen haben den Vorteil der Hochtemperaturantriebsenergie, sie sind deshalb besonders für den Sanierungsmarkt geeignet. Einerseits sind die Investitionskosten für gasgefeuerte Kompressionswärmepumpen derzeit noch höher als die elektrobetriebenen Wärmepumpen, zum anderen haben die Sorptionswärmepumpen einen relativ schlechten Wirkungsgrad zu verzeichnen. Die führenden deutschen Hersteller von Gas-Brennwertwärmeerzeugern fördern aus diesem Grund die Entwicklung von energieeffizienten gasbetriebenen Sorptionswärmepumpen speziell für den Einsatz von Gaswärmeerzeugern in bestehenden Gebäuden.

Tab. 5-4: Gaswärmepumpensysteme (Quelle: IB-THEISS, München)

| Wärmequelle              | Wärmesenke<br>Heizmedium – Wasser | Wärmesenke<br>Heizmedium – Luft |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Luft                     | Luft/Wasser-Wärmepumpe            | Luft/Luft-Wärmepumpe            |
| Wasser                   | Wasser/Wasser-Wärmepumpe          | Wasser/Luft-Wärmepumpe          |
| Erdreich (Solekreislauf) | Sole/Wasser-Wärmepumpe            | Sole/Luft-Wärmepumpe            |

Eine effiziente Alternative bieten Gaswärmepumpen und Absorptionstechniken, die Abwärme nutzen, z. B. bei der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Sie können zum Heizen, Kühlen und Entfeuchten verwendet werden.

Die Gaswärmepumpen nutzen als Wärmequelle analog zu den Elektrowärmepumpen die Umweltwärme aus der Umgebungsluft oder dem Erdreich. In Deutschland werden derzeit Kleinserien vermarktet. Die Hersteller verfolgen unterschiedliche Wärmepumpenkonzepte auf der Basis von Absorptions-, Adsorptions- bzw. abgewandelten Stirling-Konzepten. Gemeinsames Ziel ist es, dass gegenüber der Brennwerttechnologie eine Effizienzsteigerung

von 25 % und eine Nutzungsmöglichkeit der Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung erreicht wird.

In den aktuellen Untersuchungen erreichen Gaswärmepumpen gegenüber den Brennwertwärmeerzeugern die angestrebte Energieeinsparung, woraus sich Jahresarbeitszahlen von ca. 1,3 ergeben. Unter Berücksichtigung der Verluste bei der Stromerzeugung sind Gas- und Elektrowärmepumpen primärenergetisch gleichwertig.

Mit dem Einsatz der neuen Generation von Gaswärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser ist es möglich Jahresnutzungsgrade bis zu 150 % zu erreichen. Als Antriebsenergie, mit deren Hilfe dieses Potenzial erreicht werden kann, wird die Primärenergie Erdgas verwendet. Der energetische Vorteil der Gaswärmepumpe liegt darin begründet, dass sie mehr Wärme abgibt als in dem verbrauchten Gas enthalten ist und zwar deswegen, weil sie zusätzlich die Umgebungswärme ausnutzt. Besonders günstig wirkt sich der Einsatz einer Gaswärmepumpe dort aus, wo geheizt und gleichzeitig auch gekühlt wird, z. B. in

- klimatisierten Bürogebäuden und Kaufhäusern
- Sporthallen (Schwimmbhallen) mit Eisbahnen
- Schlachthöfen mit Kühlräumen.

Die physikalische Erläuterung der Gaswärmepumpe ist etwas differenzierter. Thermodynamisch korrekt sind thermische Prozesse nach dem Temperaturniveau zu bewerten. Je höher die Prozesstemperatur, desto hochwertiger ist die im Prozess enthaltene Energie. Aus diesem Grund wird die Energie aufgeteilt in:

- Exergie – Das ist der jederzeit umwandelbare Anteil der Energie. Er liegt über dem Temperaturniveau der Umgebung und ist daher hochwertig und zugleich auch teuer.
- Anergie – Das ist der nicht mehr umwandelbare Teil der Energie. Er liegt unter dem Temperaturniveau unserer Umgebung, also unter 15 °C. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie gibt es diesen Anteil praktisch in unerschöpflicher Menge.

Hieraus lässt sich ableiten: Die Wärmeenergie setzt sich aus den Anteilen der Exergie und der Anergie zusammen. Für die Verwendung in der Technischen Gebäudeausstattung (TGA) bedeutet dieses:

- Eine Heizungsanlage umfasst generell den Wärmeerzeuger und die Wärmeabnehmer. Bei der Energie der hohen Temperatur der Brennerflamme handelt es sich um reine Exergie. Diese hohe Temperatur wird im Laufe des Prozesses auf 20 °C Raumtemperatur abgebaut.
- Von da an handelt es sich um reine Anergie. Dieser Prozess ist zudem nicht umkehrbar, d.h. ca. 100 % Exergie sind in ca. 70 % Heizenergie (Jahreswirkungsgrad) und 100 % Anergie umgewandelt worden.

Mit der Exergie als Antrieb der Wärmepumpe wird die Anergie aus der Umgebung hochgepumpt, um die Raumtemperatur von 20 °C zu halten. Dieser Prozess ist teilweise umkehrbar. Etwa 50 % Exergie (Gas) werden zu 100 % Heizenergie und 100 % Anergie umgewandelt. Daraus folgt, dass sich gegenüber den konventionellen Wärmeerzeugern ca. 50 % Exergie (Gas) ohne jeglichen Komfortverlust einsparen lassen. Daher sollten sämtliche energetischen Überlegungen stets bei der Primärenergie beginnen.

Beim Einsatz eines Wärmeerzeugers wird reine Exergie in Anergie umgewandelt. Bei der Gaswärmepumpe wird dagegen mithilfe der Exergie Anergie hochgepumpt. Die Heizenergie besteht somit aus der Exergie und der Anergie.

Der wesentliche Vorzug der Gaswärmepumpe liegt darin, dass zum Nutzwärmestrom aus dem Verflüssiger der Wärmepumpe zusätzlich die Abwärme aus dem Antriebsmotor und aus den Abgasen mit hoher Temperatur kommt. Hierdurch können auch Verbraucher angeschlossen werden, die ein höheres Temperaturniveau benötigen. Zusätzliche Heizeinrichtungen werden somit nicht erforderlich. Ferner sind Gasmotor-Wärmepumpen durch die Drehzahlveränderung des Antriebsmotors leistungsregelbar.

*Praktische Hinweise:* Gaswärmepumpen arbeiten zu ca. 80 % ihrer Jahresbetriebszeit im Teillastbereich. Es ist daher besser, die Anlagen eher zu klein als zu groß zu dimensionieren. Die Gaswärmepumpe lässt sich durch eine Drehzahlveränderung lastanpassungsfähiger betreiben. Der Betrieb der Hilfsaggregate und ihr Verbrauch an Hilfsenergie belasten die Betriebskosten nachhaltig. Aus diesem Grund sollte die Regelung sämtliche nicht erforderlichen Hilfsaggregate unmittelbar abschalten.

### 5.2.2.1 Gasmotorisch Kaltdampfanlage bzw. Wärmepumpe (Gas-Heat-Pump)

Seitens der Architektur geht vor allem bei mittleren und größeren Objekten weiterhin der Trend zur Glasarchitektur mit einem großzügigen Fensterflächenanteil über, was andererseits aufgrund der Sonneneinstrahlung zu einer hohen Wärmebelastung der Innenräume führt. Die verschärften Wärmeschutzanforderungen in der EnEV verlangen zudem eine dichte Gebäudehülle, die aber auch im Sommer die Wärme in den aufgeheizten Räumen festhält. In den meisten Gebäuden wird die innere Wärmebelastung noch zusätzlich durch die Beleuchtung, Personen und elektronischen Geräte stark erhöht. Andererseits lassen auch die wachsenden Komfortansprüche die Nachfrage nach climatechnischen Anlagen steigern. In Boutiquen, Hotels und Restaurants, Ladengeschäften, Kundenzentren oder Freizeiteinrichtungen, Praxisräumen, etc. können gleichmäßig temperierte Räume dazu beitragen, dass sich die Kunden und Gäste nicht nur wohlfühlen, sondern dass sich für den Betreiber als Folgerung daraus sicherlich auch eine Verkaufssteigerung feststellen lässt.

Die Gaswärmepumpe (Gas Heat Pump, GHP) ermöglicht wie vergleichbare elektromotorisch angetriebene Multisplitgeräte sowohl die Beheizung als auch die Kühlung von Gebäuden. Gasklimageräte in ein VRF-System oder in ein Wassersystem integriert, ermöglichen eine monovalente Beheizung der Gebäude im Leistungsbereich von 14 bis 56 kW, mit einer zusätzlichen Kühloption. Mit einer Leistungszahl bis 1,4 im Heizfall handelt es sich bei diesen Gasklimageräten um äußerst effiziente Heizgeräte.

Der weitaus größere Markt erschließt sich den Gasklimageräten allerdings durch die Kombination mit Hydraulik-Übergabestationen. Hierdurch können Gasklimageräte eine ausgewogene Alternative zu wassergeführten Heizsystemen mit einer zusätzlichen Kühloption darstellen.

Gasklimageräte tragen mit dazu bei die Umwelt zu entlasten. Die Gasklimageräte erhöhen nicht den Strombedarf in den kritischen Sommermonaten, sind zudem effizienter als strombetriebene Kühlgeräte und sparen letztlich durch den Wärmepumpeneffekt im Heiz-

fall Energie ein. Außerdem reduziert ein Gasklimagerät im Heizfall aufgrund der hohen Leistungszahl gegenüber einem Wärmeerzeuger in Kombination mit einem Kaltwassersatz (elektromotorischen Verdichter) ca. 30 % an Kohlendioxid-Schadstoffemissionen.

Im Gegensatz zu den konventionellen elektromotorisch betriebenen Wärmepumpen werden bei der Gaswärmepumpe die Verdichter durch einen Gasverbrennungsmotor angetrieben. Der Vorteil für den Heizbetrieb wird vor allem darin gesehen, dass neben der Außenluft auch die Abgase des Gasmotors als Wärmequelle für den Verdampfer des Aggregates zur Verfügung stehen. Dieses ermöglicht einen monovalenten Betrieb der Anlage auch bei niedrigen Außentemperaturen, die in unseren Breiten während der Heizperiode anzutreffen sind.

Aufgrund der hohen energetischen Effizienz des Systems mit einem COP zwischen 1,2 bis 1,5 und der Möglichkeit, die angeschlossenen Räume sowohl zu beheizen als auch zu kühlen, wird diese Technologie als interessante Alternative zu den konventionellen Heizsystemen vor allem im Bereich des Wärmecontractings gesehen, der zunehmend auch durch die Energieversorgungsunternehmen erschlossen wird. Mit dem Gas-Heat-Pump-System kann gekühlt und sehr effizient geheizt werden, weil zusätzlich zur Außenluft noch die Motorabwärme, wie in einem BHKW, anfällt. Die Leistungszahl im Heizfall liegt mit ungefähr 1,4 (auf die Primärenergie bezogen) sehr hoch. Die Übertragung der Wärme/Kälte erfolgt hierbei durch das Kältemittel; ein Wassersystem ist jedoch auch möglich. Hierdurch können z. B. neben Fan-Coils auch Flächenheiz- und -kühlelemente für die Abgabe der Wärme/Kälte zum Einsatz kommen.

### Aufbau und Funktionsweise

Die komplette Gas-Heat-Pump-Anlage besteht prinzipiell aus einer Außeneinheit mit Gasmotor und Verdichter sowie einer oder mehreren Inneneinheiten, die neben einem Wärmeübertrager zur Verdampfung/Kondensation über elektronisch gesteuerte Entspannungsventile verfügen. Die Inneneinheiten entsprechen exakt denen konventioneller elektrisch betriebener Multi-Splitklimaanlagen. Das Herzstück der Anlage bildet die Außeneinheit, die neben dem Gasmotor zum Verdichterantrieb zusätzlich über einen Abgaswärmeübertrager zur Überhitzung des Kältemitteldampfes verfügt. Im Heizbetrieb ermöglicht der Abgaswärmeübertrager den frostfreien Betrieb der Anlage bis zu Außentemperaturen um -15 bis -20 °C, im Kühlbetrieb wird die Abgaswärme nicht genutzt.

Zwischenzeitlich gibt es auch seitens eines japanischen Herstellers Gasklimageräte, die auch im Sommer die Abgaswärme, z. B. für die Warmwasserbereitung, nutzen und somit eine ganzjährig weiter verbesserte Energieeffizienz erreichen.

## 5.2.3 Absorptionswärmepumpe

Seit einigen Jahren erlebt die Wärmepumpentechnologie eine regelrechte Renaissance. Neben den bekannten, elektrisch und gasmotorisch betriebenen Wärmepumpen steht mit der Absorptionswärmepumpe eine Technologie zur Verfügung, die aufgrund des gleichzeitigen Bedarfs an Wärme und Kälte eine hohe Effizienz erreichen kann. Hierbei kann mit 100 % Primärenergie, aufgrund der Nutzung von Umweltenergie, über 160 % Wärme nutzbar gemacht werden.

Zwischenzeitlich stehen als Wärmepumpen zuverlässige Großserienprodukte zur Verfügung, die über hermetisch geschlossene und somit wartungsfreie Kältekreisläufe verfügen.

### 5.2.3.1 Absorptionswärmepumpen (Heizen und Kühlen mit einem System)

Eine energieeffiziente und umweltfreundliche Wärme- und Kühlanwendung in der TGA bietet die Absorptionswärmepumpe. Sie erzeugt Kälte und Wärme ohne den Einsatz von elektrischer Energie und kommt ohne Chlor-Fluor-Kohlenstoffe (CFC) und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (HCFC) aus. Als Wärmequelle dient indirekt gespeicherte Sonnenenergie in Luft, Wasser und Erdreich oder direkte Sonnenenergie, aber auch Prozesswärme aus Abwasser und Abluft.

#### Funktionsprinzip

Im Gegensatz zur Kompressionswärmepumpe, in der ein mechanischer Verdichter arbeitet, enthält die Absorptionswärmepumpe einen thermischen Verdichter. Dieser wird elektromotorisch angetrieben, benötigt jedoch nur eine minimale Antriebsenergie.

In einer reversiblen Luft/Wasser-Absorptionswärmepumpe kann der Absorptionskreislauf z. B. mit Erdgas gespeist werden. Die Lösung aus Wasser und Ammoniak wird in einem Generator von einem Gasbrenner erhitzt. Das Ammoniak wandelt sich hierbei in Dampf um und trennt sich vom Wasser. Der Dampf wird in einen Wärmeübertrager (Kondensator) geleitet, wo er von der Luft, d. h. von der Umgebungstemperatur, abgekühlt wird und wieder

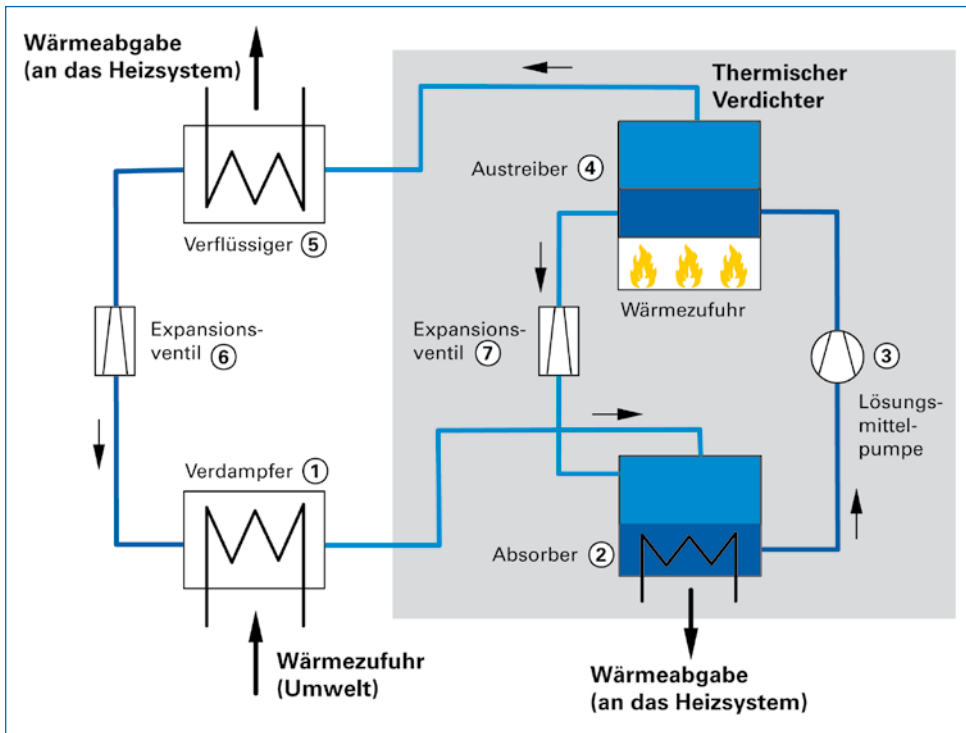


Abb. 5-4: Funktionsschema einer Absorptionswärmepumpe (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)



in einen flüssigen Zustand übergeht. Anschließend wird die flüssige Ammoniaklösung in einen zweiten Wärmeübertrager (Verdampfer) geleitet, in dem sie das Wasser des Außenkreislaufs abkühlt und dabei dessen Wärme aufnimmt, d. h. wieder in den dampfförmigen Zustand übergeht. Der Ammoniakdampf gelangt nun in den Absorber und trifft dort auf die Lösung, die nach der Trennung vom Ammoniakdampf im Generator (Austreiber) übrig geblieben ist. Dort kommt es nun zur Absorption: Der Ammoniakdampf wird vom Wasser absorbiert und letztlich in den ursprünglichen Aggregatzustand zurückgeführt. Die entstandene Lösung gelangt wieder in den Generator zurück und der Kreislauf beginnt von Neuem.

Die Besonderheit der reversiblen Luft/Wasser-Absorptionswärmepumpe besteht in der Umschaltung vom Heizbetrieb auf den Kühlbetrieb und umgekehrt: Im Sommer arbeitet die Wärmepumpe wie ein Absorptionskühler und führt die den Räumen entzogene Wärme über den luftgekühlten Kondensator nach außen hin ab. Im Winter arbeitet der Absorptionskreislauf in umgekehrter Richtung und entzieht der Umgebungsluft die Wärme. Die aus der Luft gewonnene Energie und die bei der Erdgasverbrennung entstandene Wärme werden an das Heizsystem abgegeben. Dabei werden hohe Wirkungsgrade erzielt, die weit über dem Wirkungsgrad eines Brennwertwärmeerzeugers liegen.

#### *Einsatzmöglichkeiten*

Für größere Gebäude wie Büro- und Verwaltungsbauten ist es sinnvoll, Sonnenkollektoren in Kombination mit einer Absorptionsanlage einzusetzen, da der Kühlbedarf in der Regel mit der Intensität der Sonnenstrahlung ansteigt. Gebäude mit Fußbodenkühlung oder Innendecken-Kühlgeräten eignen sich dafür besonders. Für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern eignen sich gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen, die mit einem thermischen Kompressor arbeiten. In einem gut wärmegeprägten Einfamilienhaus kann die Wärmepumpe im untersten Leistungsbereich auch zur Kühlung genutzt werden. Hier genügt eine einfache Umschaltung von Winter- auf Sommerbetrieb.

### **5.2.3.2 Absorptionswärmepumpe und Eisspeicher**

Gas-Absorptionswärmepumpen erzeugen gleichzeitig Kälte und Wärme. In den meisten Fällen besteht aber kein gleichzeitiger Bedarf an beiden Zuständen, sodass oftmals die nicht benötigte Energie nutzlos an die Umgebung abgegeben wird. Durch die Kopplung der Wärmepumpe mit einem saisonalen Eisspeicher kann die nicht benötigte Energie gespeichert und damit die Anlageneffizienz deutlich gesteigert werden.

#### *Funktionsprinzip*

Das Wasser wird während der Heizperiode über eine spezielle Wärmeübertrageranordnung so lange Wärme entzogen, bis es sich komplett in Eis verwandelt hat. Das entstandene Eis dient dann während des Sommers als nutzbare Kältequelle für Kühlzwecke. Wird die Eismasse im Sommer zum Kühlen verwendet, kann im Gegenzug die dem Gebäude entzogene Wärme dem Eisspeicher zugeführt werden (sanfte Kühlung). Die Abwärme lässt zum einen das Eis langsam schmelzen und heizt das Wasser auf, sodass am Ende der Kühlperiode wieder warmes Wasser zur Verfügung steht, welches im Gegenzug für Heizzwecke genutzt werden kann. Die dabei dem Eisspeicher zugeführte Wärmemenge entspricht der Kälteleistung des Gebäudes, d. h. der durch die Sonne in das Gebäude eingetragenen Wärme. Das Gebäude

fungiert in diesem Kreislauf wie eine Solarthermieranlage, die Wärme aufnimmt und wieder abgibt.

## 5.3 Betriebsvarianten

Generell können die Heizungsanlagen mit elektrisch angetriebenen Wärmepumpen nach drei Betriebsweisen eingestuft werden. Andererseits stehen für die unterschiedlichen Anforderungen und Anwendungen fünf Betriebsweisen zur Verfügung. Die jeweilige Betriebsart hängt hauptsächlich von der genutzten Wärmequelle ab.

### 5.3.1 Energiequelle Luft und Umweltenergie

Die Luft steht zwar als einzige Energiequelle überall und uneingeschränkt zur Verfügung, aber der große Nachteil gegenüber anderen Energiequellen besteht bei gleichen Temperaturen in ihrem vergleichsweise niedrigen Wärmeinhalt. Zur Veranschaulichung:

- 1 kg Wasser beinhaltet den gleichen Wärmeinhalt wie 5 kg Luft.

Als Energielieferant für eine Wärmepumpe zur Wohnhausbeheizung müssen aus diesem Grund enorm große Luftmengen abgekühlt werden. Ein weiterer großer Nachteil ist, dass mit sinkender Außentemperatur und steigendem Wärmebedarf der Energieinhalt der Luft stark abnimmt, was zur Folge hat, dass die Heizleistung der Wärmepumpe gleichfalls abnimmt.

Gerade aus diesem Grunde ist es u. a. nicht sinnvoll, eine Wärmepumpe mit Luft als Wärmequelle monovalent, d. h. als alleinigen Wärmeerzeuger zu betreiben. Die sinnvolle Einsatzgrenze liegt daher zwischen 0 °C und +5 °C Außentemperatur. Unterhalb dieser Außentemperatur, in der Praxis auch als »Bivalenztemperatur« bezeichnet, sollte eine konventionelle Heizung entweder zur Wärmepumpe zugeschaltet werden (bivalent parallele Betriebsweise) oder ausschließlich die Wärmeversorgung übernehmen (bivalent alternative Betriebsweise).

Eine völlige Abschaltung der Wärmepumpe unterhalb der Bivalenztemperatur (bivalent-alternativ) kommt dem Interesse der Versorgungsnetzbetreiber (VNB) entgegen, sodass für diese Betriebsweise in der Regel günstige Stromtarife gewährt werden.

Um einen wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpenheizungsanlage zu ermöglichen, werden von den meisten VNB-Sonderstrompreise für Wärmepumpen angeboten. Diese Strompreise sind jedoch in der Regel an die Anforderungen geknüpft, dass der Strombezug für die Wärmepumpen zu Zeiten hoher Netzbelastung unterbrochen werden kann. Z. B. kann die Stromzufuhr für monovalente Wärmepumpenanlagen vom Stromversorger innerhalb von 24 Stunden dreimal für maximal zwei Stunden unterbrochen werden. Die Freigabezeiten zwischen zwei Unterbrechungen dürfen nicht kürzer sein als die vorangegangene Unterbrechung.

Bei bivalent betriebenen Wärmepumpenanlagen kann die Stromzufuhr innerhalb der Heizperiode für maximal 960 Stunden unterbrochen werden. Für bestehende Gebäude bietet sich die bivalente Betriebsweise an, da ein Wärmeerzeuger vorhanden ist, welcher in der Regel weiter benutzt werden kann, um die Lastspitzen an kalten Wintertagen mit den erforderlichen Vorlauftemperaturen über 55 °C abzudecken.

### 5.3.1.1 Monovalenter Wärmepumpenbetrieb

Voraussetzungen für eine monovalente Betriebsweise sind:

- elektrische Energieversorgung: Genehmigung und entsprechende Tarifgestaltung durch den zuständigen Versorgungsnetzbetreiber (VNB)
- Wärmeverteilungssystem: Maximale Vor- und Rücklauftemperaturen 55/50 °C
- Wärmequelle: Grund- oder Brunnenwasser.

Die Wärmepumpe wird als alleiniger Wärmeerzeuger eingesetzt. Ihre Heizleistung muss daher für den maximalen Wärmebedarf des Gebäudes ausgelegt werden. Bei sehr niedrigen Außentemperaturen kann jedoch die Versorgung mit elektrischer Energie zu Engpässen führen. Aus diesem Grund werden monovalent durchgehend betriebene Wärmepumpen von einigen VNB entweder nicht gestattet oder zu den Arbeitsstromkosten muss eine Strombereitschaftsgebühr bezahlt werden, deren Höhe von der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe abhängt. Bei einer monovalent-unterbrechbaren Betriebsweise ist die Wärmepumpe ebenfalls der alleinige Heizwärmeerzeuger. Die VNB haben hier jedoch die Möglichkeit, bei einer Netzspitzenbelastung über Rundsteuereinrichtungen die Wärmepumpen abzuschalten. Zur Überbrückung der Stillstandszeiten, die je nach den VNB-Bestimmungen maximal zwei Stunden betragen können, muss die Wärmeversorgung daher aus einem Speicher erfolgen. Während der Freigabezeit muss der Speicher von der Wärmepumpe aufgeladen und gleichzeitig die direkte Wärmeversorgung aufrecht erhalten werden. Aus diesem Grund wird in der Praxis empfohlen, die Heizleistung der Wärmepumpe um ca. 15 bis 20 % höher als der maximale Wärmebedarf des Gebäudes auszulegen.

Die Wärmepumpe ist der alleinige Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasserbereitung. Die Wärmequelle muss für den ganzjährigen Betrieb der Anlage konzipiert werden.

Die Wärmepumpe ersetzt den Wärmeerzeuger und deckt den gesamten Wärmebedarf des Gebäudes. Mit dem Kältemittel R 290 ermöglicht die Wärmepumpe, z. B. für alle Heizsysteme, Vorlauftemperaturen bis max. 65 °C zu fahren.

### 5.3.1.2 Monoenergetische Betriebsweise

Bei dieser Betriebsweise wird als Hauptwärmelieferant eine Elektrowärmepumpe eingesetzt. Bei sehr niedrigen Außentemperaturen schaltet sich automatisch eine elektrische Zusatzheizung ein und ergänzt die Wärmepumpe im Spitzenbetrieb. Da beide Wärmeerzeuger gemeinsam den Heizwärmebedarf des Gebäudes abdecken und zudem mit der gleichen Energieform betrieben werden, liegt hier somit eine monoenergetische Betriebsweise vor, z. B. durch einen Elektrodurchlauferhitzer im Heizungsvorlauf oder mit einem Elektroheizeinsatz im Speicher-Wassererwärmer und/oder im Heizwasserpufferspeicher. Die Wärmeversorgung wird über zwei Wärmeerzeuger realisiert, die mit demselben Energieträger versorgt werden. Die Wärmepumpe wird zur Spitzenlastabdeckung mit einer Elektrozusatzheizung kombiniert. Die Elektrozusatzheizung ist hierbei im Vorlauf der Wärmeabgabeseite integriert und wird vom Regler bei Bedarf mit zugeschaltet. Der Wärmebedarfsanteil, der von der Elektrozusatzheizung gedeckt wird, sollte 15 % nicht übersteigen.

### 5.3.1.3 Effizienter Betrieb der bivalenten Wärmepumpe

Die Betriebsweise der Wärmepumpen richtet sich vor allem nach dem in bestehenden Gebäuden vorhandenen Wärmeverteilsystemen. Wenn z. B. eine Vorlauftemperatur oberhalb der maximalen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe, d. h. über 55 °C erforderlich wird, dann kann hier die Wärmepumpe nur als Ergänzung zu einem konventionellen Wärmeerzeuger betrieben werden.

In Neubauten ist das Wärmeverteilsystem in der Regel noch frei wählbar. Hier sollte im Hinblick auf möglichst hohe Jahresarbeitszahlen ein Wärmeverteilsystem mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 35 °C gewählt werden.

### 5.3.1.4 Bivalente alternative Betriebsweise

Bei dieser Systemlösung gibt es zwei verschiedene Wärmeerzeuger. Die Wärmepumpe ist bis zu einer bestimmten Außentemperatur allein für die Heizung zuständig. Ein zweiter Wärmeerzeuger, z. B. ein Erdgas-, Öl-, Flüssiggas-Wärmeerzeuger, wird bei Bedarf, d. h. bei sehr niedrigen Außentemperaturen, zugeschaltet. Neben der Wärmepumpe wird ein zweiter Wärmeerzeuger mit einem anderen Energieträger als der Wärmepumpe integriert. Hierbei arbeitet die Wärmepumpe nur bis zum Bivalenzpunkt, z. B. 0 °C Außentemperatur, um bei tieferen Außentemperaturen die Wärmeversorgung an den zweiten Wärmeerzeuger, z. B. Erdgas- oder Ölwärmeerzeuger, zu übergeben. Diese Betriebsweise findet in der Regel bei Wärmenutzungsanlagen mit hohen Vorlauftemperaturen Anwendung. Die Wärmepumpe kann für mitteleuropäische Verhältnisse dabei 60 bis 70 % der Jahresheizarbeit abdecken.

Elektrische Energieversorgung: Bivalent-alternativ betriebene Wärmepumpenanlagen belasten nicht zusätzlich die elektrische Energieversorgung, da ihr Betrieb im Wesentlichen außerhalb der Netzspitzenbelastung erfolgt. Aus diesem Grund werden derartige Anlagen von den VNB bevorzugt genehmigt und in der Regel auch günstige Stromtarife gewährt.

Wärmeverteilungssystem: Aufgrund der Betriebsweise, dass die Wärmepumpe bei sehr niedrigen Außentemperaturen außer Betrieb ist, liegen im Umschaltpunkt (Bivalenzpunkt) die Vorlauftemperaturen selbst bei Heizungsanlagen, die für 80/60 °C max. Vor- und Rücklauftemperatur ausgelegt sind, bei max. 55 °C. Somit können bivalent-alternative Wärmepumpenanlagen in Verbindung mit nahezu allen Wärmeverteilungsanlagen betrieben werden.

## 5.3.2 Energiequelle Grund- oder Brunnenwasser sowie Umweltenergie wie Luft, Sonne, Wärmerückgewinnung

Die Wärmepumpe deckt den überwiegenden Teil des Wärmebedarfs allein. Beim Unterschreiten einer vorher festgelegten Außentemperatur (Bilvalenztemperatur), die in der Regel im Bereich zwischen 0 °C und +5 °C liegt, wird die Wärmepumpe abgeschaltet und ein konventioneller Wärmeerzeuger übernimmt die weitere Wärmeversorgung des Gebäudes. In zunehmendem Maße werden von den Versorgungsnetzbetreibern Rundsteuereinrichtungen installiert, mit denen bei einer Netzspitzenbelastung die Wärmepumpen abgeschaltet werden können.

Die Auslegung der Wärmepumpenleistung richtet sich nach dem bei der Bivalenztemperatur erforderlichen Wärmebedarf. Überschlägig kann jedoch für die Wärmepumpe ca. 50 % der maximalen Heizleistung veranschlagt werden, wogegen natürlich der konventionelle Wärmeerzeuger auf den Gesamtwärmebedarf von 100 % auszulegen ist.

Unter diesen Bedingungen liegt der jährliche Heizleistungsanteil der Wärmepumpe je nach Klimazone zwischen 65 und 85 %, d. h. der Verbrauch an Primärenergie (Gas oder Öl) sinkt um denselben Prozentsatz.

### 5.3.2.1 Bivalente-parallele Betriebsweise

Die Wärmepumpe und der zweite Wärmeerzeuger decken ab einer festgelegten Außentemperatur gemeinsam den Heizwärmebedarf ab. Die Wärmepumpe bleibt jedoch, gemessen an der Jahresleistung, der Hauptwärmelieferant. Diese Betriebsart eignet sich insbesondere für Fußboden- und Radiatorheizungen bis zu einer Vorlauftemperatur von max. 65 °C. Neben der Wärmepumpe ist ein zweiter Wärmeerzeuger mit einem anderen Energieträger als der Wärmepumpe zur Deckung des Wärmebedarfs integriert. Ab einer bestimmten Außentemperatur wird der zweite Wärmeerzeuger mit zur Deckung des Wärmebedarfs zugeschaltet. Diese Betriebsweise setzt allerdings voraus, dass die Wärmepumpe bis zur tiefsten Außentemperatur in Betrieb bleiben kann. Zu beachten ist zudem:

- elektrische Energieversorgung: Genehmigung und Stromtarifgestaltung durch den zuständigen Versorgungsnetzbetreiber (VNB)
- Wärmeverteilungssystem: Maximale Rücklauftemperatur 50 °C
- Wärmequelle: Grund- bzw. Brunnenwasser, Erdreich, Wärmerückgewinnung sowie eingeschränkt auch Luftkollektoren- oder Solarthermiesysteme.

Die Wärmepumpe heizt bis zu einer Außentemperatur zwischen 0 °C und +5 °C allein. Unterhalb dieser Bivalenztemperatur wird ein konventioneller Wärmeerzeuger (Gas oder Öl) zugeschaltet. Die Heizleistung der Wärmepumpe ist hier gleich dem Gebäudewärmebedarf bei der Bivalenztemperatur.

Die Wärmeerzeugerleistung ergibt sich als Differenz zwischen dem Gebäudewärmebedarf und der Restheizleistung der Wärmepumpe bei minimaler Außentemperatur. Der Anteil der Wärmepumpe an dem jährlichen Gesamtenergiebedarf für die Gebäudeheizung liegt hier bei ca. 80 bis 90 %, d. h. es werden nur noch ca. 10 bis 20 % der Primärenergie (Gas bzw. Öl) benötigt.

### 5.3.2.2 Bivalent-teilparalleler Betrieb

Wenn die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe nicht ausreicht, schaltet die Wärmepumpe ab und der zweite Wärmeerzeuger übernimmt die vollständige Wärmeversorgung. Diese Betriebsart ist für alle Heizungssysteme über 65 °C Vorlauftemperatur geeignet.

Die Entscheidung, ob als Heizwärmeerzeuger die Wärmepumpe allein, d. h. monovalent, oder zusammen mit einer konventionellen Gas- oder Ölfuerungsanlage in bivalent-alternativer bzw. bivalent-paralleler Betriebsweise eingesetzt wird, hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Bestimmung bzw. Genehmigung durch den zuständigen Versorgungsnetzbetreiber (VNB) und die hieraus resultierende Tarifgestaltung
- maximale Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmeverteilungsanlage
- Art und Temperatur der Wärmequelle. Einsatzgrenze bei einer Eintrittstemperatur von Wasser min. +6 °C und Sole min. -5 °C.

### 5.3.3 Geregelter Wärmepumpenverdichter

Im Gegensatz zu herkömmlichen Wärmepumpenverdichtern, die eine konstante Leistung abgeben, passt der Digital-Scrollverdichter der Vitocal 300-A (Luft/Wasser-Wärmepumpe) seine Leistung zwischen 30 und 100 % an den Bedarf an. Dazu wird kurzzeitig die obere Verdichterspirale um etwa einen Millimeter in axialer Richtung angehoben. Die dadurch entstehenden Spalten an den Stirnseiten der Spiralen führen zu einer sofortigen Druckentlastung, der Verdichter arbeitet im Leerlauf und benötigt in dieser Phase auch nur Leerlaufstrom.

Die aktuelle Leistung des Verdichters wird durch die Dauer des Leerlaufs bestimmt. Bei einer Leistung von 30 % arbeitet der Verdichter für etwa 7 Sekunden im Leerlauf und für 3 Sekunden unter Last. Halbe Leistung entsteht durch jeweils fünf Sekunden Leerlauf und fünf Sekunden Lastbetrieb. Im Volllastbetrieb sind die stirnseitigen Spalten permanent geschlossen. So kann die Vitocal 300-A bei sinkender Außentemperatur ihre Leistung erhöhen und ihre Wärmeabgabe an den steigenden Bedarf anpassen.

Das Expansionsventil hat im Wärmepumpenkreislauf primär die Aufgabe, nach der Übergabe der Wärme an das Heizsystem das flüssige, aber noch unter hohem Druck stehende Kältemittel zu entspannen. Es regelt aber auch den Kältemittelmassenstrom und sorgt so dafür, dass nur so viel Kältemittel in den Verdampfer gelangt, wie dort vollständig verdampfen kann. Um Flüssigkeitseinträge in den Verdichter zuverlässig auszuschließen, wird vom Expansionsventil die Kältemittelmenge darüber hinaus so dosiert, dass ausschließlich überhitzter, also absolut trockener Dampf den Verdampfer verlässt. Durch sein feinfühliges Regelverhalten hält das elektronische Expansionsventil der Vitocal 300-A diese Überhitzung des Kältemittels konstant – unabhängig vom jeweiligen Betriebszustand der Wärmepumpe. So kann der Digital-Scrollverdichter stets mit höchstem Wirkungsgrad betrieben werden, was den hohen COP der Vitocal 300-A in allen Betriebszuständen sicherstellt und gegenüber Wärmepumpen mit herkömmlichen thermostatischen Expansionsventilen um bis zu fünf Prozent bessere Jahresarbeitszahlen ermöglicht.

Bei thermostatisch gesteuerten Expansionsventilen steigt dagegen, z. B. im Teillastbetrieb, die Überhitzung. Je größer die Überhitzung des Kältemittels, um so höher ist aber die zu erbringende Verdichterarbeit, um den vorgegebenen Enddruck zu erreichen. Der Verdichter muss dann mehr Energie in Form von elektrischem Strom aufnehmen, sein Wirkungsgrad sinkt.

Um in jedem Betriebszustand die Vitocal 300-A mit der höchstmöglichen Effizienz betreiben zu können, überwacht das innovative, zum Patent angemeldete RCD-System (Refrigerant-Cycle-Diagnostic-System) permanent Temperaturen sowie Drücke im Kältemittelkreislauf und steuert entsprechend das elektronische Expansionsventil. Alle wichtigen Werte werden gespeichert und stehen für eine Diagnose zur Verfügung. Dabei bilan-

ziert das RCD-System auch die Energieaufnahme aus dem Stromnetz und die Wärmeabgabe an das Heizungssystem. So kann auf den zusätzlichen Einbau eines Strom- und zweier Wärmemengenzähler (für Heizung und Trinkwasser) als Voraussetzung für die Inanspruchnahme von Fördermitteln aus dem Marktanreizprogramm verzichtet werden.

## 5.4 Systemvarianten (Wärmequelle/Wärmesenke)

### 5.4.1 Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W-WP)

Als Energiequelle für die Wärmeerzeugung nutzen Luft/Wasser-Wärmepumpen die Umgebungsluft im Raum oder die Außenluft. Die Luft saugt ein Ventilator über den Verdampfer der Wärmepumpe an. Dabei wird der Luft die Wärme entzogen, welche die Wärmepumpe an das Wasser des Heizkreises übergibt. Die um ca. 5 K abgekühlte Luft wird nach außen zurückgeführt. Da für diese Wärmepumpenart keine Erdarbeiten notwendig sind ist der Einbau kostengünstiger als bei Wasser- oder Solewärmepumpen. Der überwiegende Teil der Luft/Wasser-Wärmepumpen wird zur kombinierten Heizungs- und Warmwasserbereitung genutzt.

In der Regel erfolgt die Aufstellung in Splitbauweise, wobei die teils akustisch problematische Verdampfeinheit mit dem Ventilator im Außengelände aufgestellt und die Kondensatoreinheit im Gebäude integriert wird. Parallel hierzu werden Spezialmodelle zur Innenaufstellung in Kellerräumen genutzt, die mit der Umgebungsluft als Energiequelle ausschließlich der Warmwasserbereitung dienen. Kompaktaggregate für Lüftung, Heizung und Warmwasser kommen im Passivhaus zum Einsatz, wo sie mit Abluft und Außenluft Warmwasser bereiten. Einige dieser Systeme versorgen die Heizung im bivalenten Betrieb mit anderen Wärmeerzeugern.

Das Heizen mit konventionellen Luft/Wasser-Wärmepumpen wird in Neu- und Altbauten bei Außentemperaturen unter  $-5\text{ °C}$  zunehmend unwirtschaftlicher, da die Leistung mit den Minusgraden sinkt. Weil aber die meiste Heizenergie bei sehr niedrigen Außentemperaturen angefordert wird, muss eine zusätzliche Heizquelle, z. B. ein Brennstoffwärmeerzeuger eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden die monovalent betriebenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen in der Regel über einen Pufferspeicher betrieben. Weil zudem für eine behagliche Raumqualität als Folge der Dichtheit der Gebäudehülle auch eine mechanische Lüftung erforderlich wird, werden als kostengünstigste Varianten Einzelraum-RLT-Geräte und Abluft/Wasser-Wärmepumpen eingesetzt. Die separate Abluftwärmepumpe bringt jedoch gegenüber der Warmwasserbereitung mit der Heizungswärmepumpe keine Energieersparnis.

### Reversible Wärmepumpen (Heizen/Kühlen)

Reversible Luft/Wasser-Wärmepumpen werden heute so leistungsfähig konstruiert, dass sie als alleinige Wärmeerzeuger auch größere Gebäude beheizen und mit Brauchwarmwasser versorgen können. Der Einsatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen im größeren Leistungsbereich war bisher aufgrund der sinkenden Geräteeffizienz bei fallenden Außentemperaturen von maximal  $-5\text{ °C}$  nur eingeschränkt möglich. Die Umstellung auf das neue, hocheffiziente Kältemittel R 410 a ermöglicht nun den Betrieb bei Temperaturen von bis zu  $-12\text{ °C}$ . Selbst



unter diesen extremen Voraussetzungen sind hier noch relativ hohe Wirkungsgrade von deutlich über COP über 2,0 möglich. Damit können Luft-/Wasser-Wärmepumpen jetzt auch als alleinige Wärmeerzeuger in großen Gebäuden verwendet werden.

Eine Lösungsvariante verspricht die neue Generation der reversiblen Luft-/Wasser-Wärmepumpen mit größeren Heiz- und Kühlleistungen die mit dem hocheffiziente Kältemittel R 410 a sowie einer neuartigen Anordnung der Scrollverdichter sehr hohe Wirkungsgrade erreicht, die bis zu 50 % über denen der bisherigen Modelle auf. Zudem weisen diese Wärmepumpen eine sehr hohe Toleranz gegenüber den Außentemperaturen auf. Im Heizmodus ist ein Betrieb bei Außentemperaturen von -12 °C bis 20 °C möglich, während die Kälte bis zu einer Lufttemperatur bis 50 °C zur Verfügung steht. Mit einem wasserbasierten Wirkungsgrad von 3,02 bei einer Wassertemperatur von 12/7 °C, Luft 35 °C und einem COP von 3,06 bei einer Wassertemperatur von 40/45 °C, Luft 7 °C – gemäß Eurovent – erreicht das neue Gerät vom Typ »aquaciat power« des Herstellers Ciat Kälte- und Klimatechnik GmbH die Energieeffizienzklasse B und weist damit eine 30 % höhere Effizienz auf als Anlagen, die noch mit R 407 c betrieben werden.

Um den höheren Kondensationsdrücken des Kältemittels R 410 a standzuhalten, muss der gesamte Kältekreislauf neu dimensioniert und konzipiert werden. Im Gegensatz zu R 22 (max. 32 bar) entstehen bei R 410 a mit ca. 45 bar bis zu 50 % höhere Drücke. Das Kältemittel R 410 a besteht aus ca. 60 % R 32 und 40 % R 25. Praktisch verhält sich R 410 a wie R 22. Der wesentliche Unterschied besteht allerdings im Ozonabbaupotenzial von 0 in der 50 % höheren Leistungsausbeute aufgrund des höheren Wärmeinhaltes und dem entsprechend sehr günstigen COP-Wert.

Zudem ist eine Option zur teilweisen oder vollständigen Wärmerückgewinnung, um einen externen Wasserkreislauf zu beheizen, möglich. Zur vollständigen Wärmerückgewinnung wird direkt vor dem luftgekühlten Verflüssiger ein zusätzlicher wassergekühlter Wärmeübertrager eingebunden, wobei die Heißgastemperatur der Verdichter direkt genutzt und Wassertemperaturen bis zu 50 °C bereitgestellt werden können. Bei der teilweisen Wärmerückgewinnung wird die Abluftwärme der Verdichter direkt genutzt, wobei hier warmes Brauchwasser mit einer Temperatur von bis zu 65 °C zu erzeugt wird. Die Wärmerückgewinnung erfolgt an einem Wärmeübertrager direkt im Gerät und dient bei gleicher Leistung für Heizung und Kühlung zur kostenlosen Warmwassererzeugung.

## 5.4.2 Luft/Luft-Wärmepumpe (L/L-WP)

Der äußere Wärmeübertrager (Verdampfer) steht in diesem Fall in Verbindung mit der Außenluft und der innere Wärmeübertrager (Verflüssiger) in Verbindung mit der Raumluft. Die in der Außenluft enthaltene Wärme wird von dem äußeren Wärmeübertrager aufgenommen, über das Kältemittel zum inneren Wärmeübertrager transportiert und von diesem, in der Regel mittels Ventilator, an die Raumluft abgegeben.

## 5.4.3 Wasser/Luft-Wärmepumpe (W/L-WP)

Bei diesem System wird der äußere Wärmeübertrager anstelle von Außenluft mit natürlichem Wasser umspült, z. B. mit Brunnen-, Fluss-, See- oder Abwasser, während der innere



Wärmeübertrager von der Raumluft beaufschlagt wird. Die im Wasser enthaltene Wärme gelangt so über das Kältemittel an die Raumluft.

#### 5.4.4 Wasser/Wasser-Wärmepumpe (W/W-WP)

Die klassische Anwendung von Wasser/Wasser-Wärmepumpen findet in der Nutzung der Erdwärme aus dem Grundwasser bzw. Oberflächenwasser statt.

#### 5.4.5 Sole/Wasser-Wärmepumpe

Die Sole/Wasser-Wärmepumpen werden in der Praxis für Niedertemperaturheizsystem mit 35 °C Vorlauf- und 28 °C Rücklauftemperatur verwendet. Aus diesem Grund eignen sich derartige Flächenheizungen besonders gut in Verbindung mit Wärmepumpen, da die energetische Effizienz einer Wärmepumpe umso höher ist, je niedriger die Vorlauftemperatur gehalten wird. In der Praxis zeigt es sich, dass die Anlagenaufwandszahl einer Sole/Wasser-Wärmepumpe ohne Lüftungsanlage nach den Standardwerten der DIN V 4701 Teil 10 gerechnete um ca. 30 % günstiger ist als beim Einsatz eines Brennwertwärmeerzeugers.

#### 5.4.6 Erdreich/Luft-Wärmepumpe

In diesen selteneren Anwendungsfällen wird der äußere Wärmeübertrager im Erdreich eingebettet (Rohrschlangen oder Erdsonden). Wichtig ist hierbei, dass dieses Erdreich auch stets ausreichende Wärme abgeben kann, d. h. dass es stets über eine ausreichende Feuchtigkeit und somit über eine gute Wärmeleitfähigkeit verfügt. Lehmhaltiger Sandboden ist daher in den meisten Fällen besonders geeignet. Der innere Wärmeübertrager wird hier mit Raumluft beaufschlagt und gibt so die aufgenommene Erdwärme über das Kältemittel an die zu beheizenden Räume ab.

#### 5.4.7 Erdreich/Wasser-Wärmepumpe

Dieses System ähnelt dem System der Boden/Luft-Wärmepumpe, lediglich mit der Abweichung, dass in diesem Fall die Wärme an ein Wassersystem, z. B. an ein Schwimmbad, abgeführt wird. In diesem Fall ist gleichfalls darauf zu achten, dass das Erdreich eine genügend hohe Wärmeleitfähigkeit durch eine anhaltende Feuchtigkeit enthält.

#### Natural Cooling

In den Sommermonaten sind die Temperaturen im Inneren der Gebäude in der Regel höher als im Erdreich oder im Grundwasser. In diesem Zeitraum können die niedrigeren Temperaturen des im Winter als Wärmequelle dienenden Erdreichs bzw. des Grundwassers zur direkten natürlichen Kühlung des Gebäudeinneren genutzt werden. Bestimmte Wärmepumpen verfügen hierzu innerhalb ihrer Regelung über eine auch als Natural Cooling bezeichnete Funktion.

Aufgrund der hohen Außenlufttemperaturen im Sommer ist diese Funktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpen nicht möglich.

Das Natural Cooling hat sich in der Praxis als eine besonders energiesparende und kostengünstige Methode der Gebäudekühlung bestätigt, da nur ein geringer Stromverbrauch für die Umwälzpumpen zur Erschließung der »Kühlquelle« Erdreich bzw. des Grundwassers benötigt wird. Die Wärmepumpe wird während des Kühlbetriebes nur zur Brauchwassererwärmung eingeschaltet. Die Ansteuerung sämtlicher erforderlichen Umwälzpumpen und Umschaltventile sowie die Erfassung der erforderlichen Temperaturen und der Taupunkttemperaturüberwachung erfolgen durch die Wärmepumpenregelung. Die Natural Cooling-Funktion kann mit wenigen zusätzlichen Komponenten (Wärmeübertrager, Dreizehventile und Umwälzpumpe) aktiviert werden. Grundsätzlich ist diese Kühlfunktion in ihrer Leistungsfähigkeit aber nicht mit Klimaanlage oder Kaltwassersätzen zu vergleichen. Die Kühlleistung ist abhängig von der Wärmequellenkapazität und der Wärmequellentemperatur, die jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sein kann. Das Erdreich hat z. B. über die Sommermonate mehr Wärme gespeichert, sodass sich die Kühlleistung um Sommerende hin etwas reduziert. Bei dieser Kühlungsart werden Kühl-COPs zwischen 15 bis 20 erreicht.

## 5.4.8 Objektbeispiele – Referenzprojekte

### 5.4.8.1 Grund-/Brunnenwassernutzung

Zur Prozesskühlung bietet sich die Nutzung von kaltem Grundwasser an, sofern die zuständige Wasserbehörde dieses zulässt und die Wasserqualität geeignet ist. Diese Nutzung stellt sich in der Regel als die energiesparenste Variante heraus, weil die Energiequelle über das gesamte Jahr ein Kühltemperaturniveau von 8 bis 10 °C bietet. Als zweitbeste Variante bietet sich bis zu einer Kühltemperatur von ca. 14 °C die Kühlung mittels Kühltürmen an. Wenn der Einsatz von Kältemaschinen erforderlich wird, sollten die Möglichkeiten der Abwärmennutzung überprüft werden.

*Planungsempfehlung:* Priorität einer Grundwasserkühlung vor der Investition von Kühltürmen und Kältemaschinen.

#### *Objektbeispiel:*

St. Emmeram Realschule in Aschheim, Architekten: Bär, Stadelmann, Stöcker, Nürnberg. Der Neubau der Realschule als viergeschossiger linearer Baukörper bietet mit einer Bruttogeschossfläche von rund 9000 m<sup>2</sup> Platz für 18 Klassen mit insgesamt bis zu 550 Schülern.

Zielsetzung bei der Planung war es, mit einem Minimum an Energie ein Maximum an Behaglichkeit zu bieten. Aufgrund des niedrigen Heizenergiebedarfs, bedingt durch den hohen Dämmstandard sowie der hohen inneren Wärmegewinne (Beleuchtung und Personen) zielte die energetische Optimierung auf die sommerliche raumklimatische Behaglichkeit unter Ausschöpfung von vorrangig passiven Maßnahmen. Zu diesem Zweck mussten äußere Wärmelasten reduziert und Speichermassen aktiviert werden. Zudem stellt sich bereits die Ausrichtung des Schulgebäudes in Nord-Süd-Richtung als energetisch günstige Lösung dar. Eine weitere passive Maßnahme zeigt sich in der ausgewogenen thermisch aktiven massive Speichermasse.

*Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

Zur Beheizung der Realschule wurde unter Berücksichtigung der Gebäudestruktur und der schweren Bauweise ein Fußbodenheizungssystem mit einer Verlegefläche von insgesamt 6500 m<sup>2</sup> gewählt. Die Bereitstellung der erforderlichen Wärmeenergie erfolgt über ein energieeffizientes bivalentes System mittels einer Grundwasserwärmepumpe zur Grundlast mit einer Leistung von 150 kW und einem Gas-Wärmeerzeuger zur Spitzenlastdeckung mit einer Heizleistung von 180 kW. Als Wärmepumpe wurde ein optimiertes System mit vergrößerter Verdampfer- und Kondensatorfläche zur Verringerung des Temperaturgefälles zwischen Medium und Kältemittel sowie einem Rekuperator zur inneren Wärmerückgewinnung gewählt. Zudem wurden zur Verbesserung des Teillastverhaltens drei Scrollkompressoren eingesetzt. Das ökologisch ausgewogene Energiekonzept beinhaltet nach Ausschöpfung sämtlicher passiver energetischer Maßnahmen noch, dass die Wärmepumpe auch über die Sommermonate zur Kühlung der Fußbodenheizflächen der Klassenräume herangezogen wird.

**Tab. 5-5:** Referenzprojekte für Anlagen mit Grundwasserwärmepumpe (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt   | Rationelle Energietechnologien   | Besonderheiten   |
|---|--|--|
| Alki-technik-Firmenzentrale in Ingolstadt, Bachschuster Architektur, Ingolstadt           | Grundwasserwärmepumpen zur Bauteilaktivierung  | Solarthermie mit 3000 l-Pufferspeicher, Photovoltaik mit CIS-Solarzellen:<br>Über der Montagehalle: 3 Reihen mit je 27 Module = 14,31 kWp<br>PV-Dachanlage mit 17 Reihen = 168 Dünnschichtzellen, 7,23 kWp |
| Gemeindezentrum Neulußheim in Baden-Württemberg, Architekten Lorentz & Roth, Schwetzingen | zwei Wasser/Wasser-Grundwasserwärmepumpen; ganzjährig 8 bis 12 °C aus zwei 15 m tiefe Saugbrunnen. Drei 2000 Liter Pufferspeicher. | netzgekoppelte Photovoltaikanlage 17 PV-Modulen; max. Leistung 3150 Watt Peak (Wp)   |
| PowerTower (Green Buildings-Büros und Verwaltungsgebäude), Linz                           | reversible Brunnenwasser-Grundwasserwärmepumpe; 46 Erdwärmesonden (ges. 6900 m)  | Rechenzentrumabwärme mit 330 kW wird über die RLT-Wärmerückgewinnung genutzt; multifunktionale Fassade; 700 m <sup>2</sup> fassadenintegrierte PV-Anlage; Tageslichtsysteme; Gebäudeleittechnik            |

#### 5.4.8.2 Abwärmenutzung

##### *Objektbeispiel:*

Freizeitbad in Plettenberg (Abwärmenutzung eines Industriebetriebes)

Architekten: agn Paul Niederberghaus & Partner, Ibbenbüren

Das Freibad AquaMagis in Plettenberg mit einer Gesamtwasserfläche von 1800 m<sup>2</sup> wurde von dem Generalplaner agn Paul Niederberghaus & Partner entwickelt. Aufgrund eines in der Nachbarschaft befindlichen Aluminiumwalzwerkes wurde dessen Abwärme unter Einbe-

ziehung sämtlicher Förderungsmöglichkeiten zur optimalen energetischen Versorgungskonzept ausgeschöpft und umgesetzt.



**Abb. 5-5:** AquaMagis Freizeitbad, Plettenberg/Sauerland (Quelle: Marcel Hoefsloot, agn, Ibbenbüren)

Angesichts der finanziellen und ökologischen Vorteile sowie der Zusicherung eines ungestörten operativen Betriebes wurde eine Energiekooperation vereinbart, die eine Nutzung der überflüssigen Abwärme des Industriebetriebes mittels einer mit Gasmotor betriebenen Wärmepumpenanlage zur Beheizung des Freibades zusichert. Einer der wichtigsten Punkte des Energiekonzeptes bestand in der gegenseitigen Nicht-Verpflichtung zur Lieferung oder Abnahme der Abwärme. Das Aluminiumwerk ist daher nicht zwingend auf eine Fremdkühlung seiner Anlagen angewiesen und gleichfalls wurde das Freizeitbad mit einer eigenständig arbeitenden, konventionellen Wärmeversorgung ausgerüstet, sodass die Unabhängigkeit beider Vertragspartner gewährleistet ist.

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

In einem kontinuierlichen Volllastbetrieb erreicht der Energieverbund eine Gesamtleistung von 1,1 MW thermisch und 200 kW elektrisch. Das Energiekonzept nutzt nun als Hauptenergieträger die Abwärme des Walzöls, die in der Vergangenheit von 55 auf 38 °C abgekühlt wurde. In der neuen energetischen Abwärmenutzung hebt eine wärmegeführte gasmotorische Wärmepumpe die niedrige Abwärmtemperatur zur Beheizung des Freibades auf ein

höheres Temperaturniveau. Das Walzöl heizt hierbei den Verdampfer innerhalb des Wärmepumpenkreislaufes auf und kühlt sich dabei gleichzeitig auf 25 °C ab. Die Leistung des Verdampfers beträgt 518 kW. Der Verflüssiger der Wärmepumpenanlage heizt mit einer Leistung von 700 kW das mit 45 °C vom Freizeitbad kommende Heizungsrücklaufwasser auf ca. 70 °C auf.

Da sich aufgrund der schwankenden Betriebszeit des Aluminiumwalzwerkes und der unterschiedlichen Betriebszeiten des Erlebnisbades ein gleichmäßiger Betrieb der Abwärmenutzung nicht realisierbar war, musste eine energetisch vertretbare Alternativlösung gefunden werden. Als Systemfindung wurde eine Kombination aus einer Gasmotorwärmepumpe und einem elektrischen Generator entwickelt, wobei die Komponenten über eine gemeinsame Welle kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Aufgrund dieser Lösung kann die Anlage mechanisch den Vorgaben der Regelungstechnik stufenlos und ohne Abschaltungen folgen. Der Anlagenarbeitspunkt wird stetig angepasst, d. h. wenn das Abwärmeangebot oder der Wärmebedarf des Freizeitbades sinkt, wird auch die Leistung der Wärmepumpe reduziert.

Als Folge steht dem elektrischen Generator ein höherer Anteil der mechanischen Leistung des Gasmotors zur Verfügung. Bei der Anlagenregelung hat in jedem Fall stets die Wärmeproduktion die höchste Priorität. Zudem erlaubt diese Betriebsweise einen nahezu permanenten Betrieb des Generators unter Volllast und kann auch hinsichtlich des Wirkungsgrades in einem optimalen Bereich arbeiten. Für den Gasmotor wird so ein Leerlauf- oder Teillastbetrieb vermieden bzw. ein kompletter Abbruch des Wärmepumpenprozesses ausgeschlossen.

Der erzeugte Strom wird in das Netz des Verteilungsnetzbetreibers eingespeist. Um den Wirkungsgrad der Wärmepumpenanlage als Hauptwärmelieferant in Kombination mit der Motorabwärme des Gasmotors zu optimieren, musste die maximale Vorlauftemperatur der gesamten Heizungsanlage des Freizeitbades auf 75 °C ausgelegt werden. Die maximal sinnvolle Vorlauftemperatur der kompletten Anlage aus den Bereichen der Motorabwärme, der Wärmepumpe, der Abgaswärmeübertrager und der Ölkühler beträgt hierbei als austretende Mischtemperatur ca. 75 °C. Jede weitere Erhöhung über die maximal erforderliche Vorlauftemperatur würde eine deutliche Reduzierung des Wirkungsgrades der Anlage nach sich ziehen.

Das Zusammenspiel der industriellen Abwärmenutzung und der eigenproduzierten Wärme wird durch einen regelungstechnischen Automatisierungsverbund der verschiedenen Anlagen realisiert. Die Steuerung des Gasmotors und des Verdichters wurde mittels der sogenannten SPS-Technologie umgesetzt, die eine direkte Nutzung der wichtigsten Parameter der Ölwirtschaft innerhalb des Aluminiumwalzwerkes erlaubt. Die Gebäudeleittechnik des Freizeitbades erfolgt über eine LONWorks-Verkabelung, für die eine Glasfaserkabelverbindung mit der ca. 650 m entfernten Energiezentrale und einer SPS/LON-Schnittstelle errichtet wurde.

### 5.4.8.3 Massivabsorber (Fundamentplatten)

#### *Objektbeispiel:*

Kultur- und Bürgerhaus in Denzlingen

Architekten: Dasch, Zürn und von Scholley, Stuttgart

In Denzlingen, zwischen Freiburg und Waldkirch im Südschwarzwald gelegen, realisierten die Stuttgarter Architekten Dasch, Zürn und von Scholley ein neues Kultur- und Bürgerhaus, das nicht nur architektonisch sondern auch ökologisch Vorzeigecharakter hat. Vorgaben des Wettbewerbs waren u. a. auch die Kosten- und Energieoptimierung – diese wurde in einem energiesparenden Konzept umgesetzt.

Umgeben von 3400 m<sup>2</sup> Wasserfläche fügt sich das neue Kulturgebäude mit einer BGF von 3180 m<sup>2</sup> in einen von Nord nach Süd verlaufenden Grünzug ein. Die vier Hauptnutzungsbereiche (Großer Saal, Kleiner Saal, Restaurant und Foyer) sind in geometrischen Grundformen und unterschiedlichen Fluchten angeordnet.

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

Zum Energiekonzept gehört neben der Speichermassennutzung der massiven Bauteile auch die Raumkonditionierung mittels eines Systems aus aktiver und passiver Nutzung der Erdwärme. Unter der Bodenplatte verlegte Rohrschlangen sowie der unter dem Gebäude angeordnete Erdkanal nutzen die Erdwärme bzw. Erdkälte. Die somit erzeugte Energie verursacht nur 10 bis 20% der CO<sub>2</sub>-Emissionen vergleichbarer Projekte. Die Wärmerückgewinnung und die Nutzung der Sonnenenergie wirken sich zusätzlich positiv auf die Energiebilanz des Gebäudes aus.

Auf einer Fläche von insgesamt 870 m<sup>2</sup> sind Photovoltaikmodule direkt in der Dachabdichtungsfolie eingebracht. Die zur Stromerzeugung integrierten PV-Module erzeugen etwa 28.000 kWh pro Jahr.

## 5.5 Oberflächennahe Geothermie

Eine besondere Bedeutung kommt der Wärmepumpe zu, bei der durch Nutzung der Geothermie im Heizfall mit einer Heizzahl von bis zu 4,0 die Gebäudeheizung energetisch deutlich besser realisiert werden kann als durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Wenn es auch noch gelingt, die Grundkühlung eines Gebäudes in den Sommermonaten nur durch die Energie aus dem Erdreich abzudecken, dann schafft dieses Energieeinspareffekte in einer nennenswerten Größenordnung. Grundvoraussetzung hierfür ist allerdings, dass das Gebäude auch für den Sommerfall thermisch optimiert wurde und auch die erforderlichen Flächen für die Bauteilaktivierung zur Verfügung gestellt werden können. Um bei sehr guten Witterungsverhältnissen einer Übererwärmung im Gebäude vorzubeugen, sollte das Gebäude eine thermisch ausreichend träge Masse aufweisen.

### 5.5.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Als Regelwerk sollte insbesondere die VDI 4640 Blatt 1 bis 4 beachtet werden:

- VDI 4640 Blatt 1:2010-06: Thermische Nutzung des Untergrundes, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte
- VDI 4640 Blatt 2:2001-09: Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen
- VDI 4640-Blatt 3:2001-06: Thermische Nutzung des Untergrundes, Unterirdische Thermische Energiespeicher.
- VDI 4640 Blatt 4:2004-09: Thermische Nutzung des Untergrundes, Direkte Nutzungen

Die Richtlinie VDI 4640, Blatt 1, Ausführung Juni 2010: »Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte« behandelt die Auslegung von Anlagen zur Nutzung von Wärme aus dem Erdreich, d. h. die Wärmepumpenanlagen, die das Grundwasser bzw. den Untergrund mit Erdreichkollektoren und Erdwärmesonden nutzen, oder Anlagen zum Energiespeichern und geht auch auf den Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emission dieser Systeme ein. Hierbei werden auch die möglichen Umweltbelastungen, z. B. durch Leckagen, sowie thermische und hydraulische Auswirkungen berücksichtigt.

Neben den Grundlagen zum Wärmefluss im Erdreich werden u. a. die nach dem Wasser- und Bergrecht erforderlichen Genehmigungen erläutert. Ferner wird in dieser Richtlinie auf eine umweltverträgliche Materialwahl eingegangen und erläutert, wie die Bohrungen auszuführen sind und wie derartige Anlagensysteme zur Nutzung von Erdwärme installiert sowie in die Heizsysteme eingebunden werden können. In immer mehr Gebäuden wird die Erdwärme aber auch als Quelle für die Wärme- und/oder Klimakälteversorgung verwendet, weil diese Energiequelle z. B. mithilfe von Erdwärmesonden eine ideale Wärmequelle für Wärmepumpen ist. Die Wärmepumpen schöpfen aus dieser Energiequelle mit einem gleich bleibenden Temperaturniveau und sind nicht den Störungen (Witterungseinflüssen) der Oberfläche unterworfen. Zudem eignet sich der Untergrund ausgezeichnet als saisonaler Wärme- bzw. Kältespeicher.

### 5.5.2 Wärmequellenerschließung

Die oberflächennahe Geothermie nutzt das Temperaturangebot im Bereich unter Terrain bis ca. 100 m, zum Heizen meist in Verbindung mit einer Wärmepumpe. Andererseits wird das Erdreich auch direkt als Quelle für die Klimakälte genutzt und hierbei die aufwendige und betriebskostenintensive Kälteerzeugung eingespart. Die geothermische Energie (Erdwärme) der oberen Bodenschichten bis etwa 100 m Tiefe betrifft die gespeicherte Sonnenenergie in der Oberflächennähe. Dagegen handelt es sich in den tieferen Schichten um die Wärmeenergie aus dem Erdinneren. Bis zu einer Tiefe von etwa 10 m unter Terrain wird die herrschende Temperatur vom Verlauf der Jahreszeiten geprägt. Die Erdtemperatur ist jedoch über das Jahr hinweg ab einer Tiefe von ca. 15 m nahezu konstant.

Die Temperaturen der Luft schwanken mit der Jahreszeit sehr stark. Innerhalb der oberen Schichten des Erdbodens werden diese Temperaturen jedoch nicht bzw. nur sehr stark gedämpft nachvollzogen. Aus mathematischer Sicht folgt der Temperaturverlauf einer har-



monischen Schwingung. In 5 bis 10 m Tiefe entspricht die im Boden gemessene Temperatur praktisch der Jahresmitteltemperatur des Standortes, die in Deutschland ca. 8 bis 10 °C beträgt.

Die Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials setzt die Kenntnis über die Geologie (Lithologie, Stratigraphie, Tektonik und Mächtigkeit) sowie die Hydrologie, Flurabstand und relative Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers sowie Grundwasserführung eines Standortes voraus.

### 5.5.2.1 Erdwärme-Flächenkollektoren

Bei den Flächenerdärmekollektoren werden in der Regel aus Festigkeitsgründen Rohre verwendet, deren Geometrie nachstehend aufgeführten Parametern unterliegen:

- Einrohr- bzw. Registerbetrieb
- Rohrdurchmesser
- Strömungsgeschwindigkeit
- Verlegeabstand innerhalb des Registers
- Anzahl und Länge der Erdrohre.

In der Praxis lassen sich allein durch die Kombination dieser Parameter nahezu unendlich viele Möglichkeiten (Künettenkollektoren, Roth-Körbe, etc.) realisieren. Aus Gründen der effektiveren Wärmeübertragung werden die meisten Anlagen im Registerbetrieb, mit Sammler und Verteiler, errichtet. Insofern werden anstatt mehreren parallel durchströmter Rohre, kleinere Nennweiten verwendet. Die Änderung des Rohrdurchmessers bei gleichem Volumenstrom hat jedoch auch konträre Auswirkungen. Einerseits wird über die Oberflächenverkleinerung des Durchmessers die Wärmeübertragerfläche reduziert, zum anderen vergrößert sich aber aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit der innere Wärmeübergangskoeffizient. Aus diesem Grund ist es nicht einfach eine Aussage über die sinnvolle Nennweite zu treffen.

Das Kennzeichnende für den Erdreichkollektor ist das Rohrnetz aus Kunststoffschläuchen, die für den Wärmepumpenbetrieb in Tiefen von 0,80 m bis ca. 2,00 m als Wärmeübertrager für den Entzug und die Nutzbarmachung von »kalter«, nur noch Anergie enthaltener Wärme aus dem Erdreich verlegt werden. Für die Jahreswärmebilanz des Erdreichs sind geringere Verlegetiefen vorteilhafter, weil sich dieser Bereich durch die Sonneneinstrahlung relativ schnell regeneriert. Die Oberflächenerdschichten wirken hierbei jedoch nur als Kurzspeicher.

**Tab. 5-6:** spezifische Entzugsleistungen nach Bodenarten (Quelle: IB-THEISS, München)

| Untergrund                       | spezifischeEntzugsleistung(W/m) |
|----------------------------------|---------------------------------|
| trockener, sandiger Boden        | 20                              |
| feuchter, sandiger Boden         | 40                              |
| feuchter, felsiger Boden         | 60                              |
| grundwasserführende Erdschichten | 80 bis 100                      |



Das Ausmaß des Wärmeentzugs hängt von der Wärmekapazität und von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ab. Als Werkstoff für die Erdflächenkollektoren kommen nur witterungsbeständige, ungiftige und korrosionsbeständige Werkstoffe mit glatter Rohrrinnenwand zur Ausführung. Die Wärmepumpe hebt das Temperaturniveau des Wassers auf 40 bis 50 °C und speist damit eine Fußboden-, Wandflächen- oder Radiatorheizung.

Bei der horizontalen Wärmeaufnahme sind zwar die Erstellungskosten geringer als dies bei den vertikalen Erdsonden der Fall ist; in der Praxis fehlt es jedoch oft an der erforderlichen Grundstücksfläche. Eine neue Innovation stellt sich in der Verlegung von kompakten »Reposolmatten«, einem Rohrgeflecht mit nur 2 mm dicken Kunststoffrohren dar. Diese Matten werden unterhalb der Frostgrenze, in ca. 1,50 m Tiefe, im Erdreich verlegt und haben eine Ertragsheizleistung von 90 W/m<sup>2</sup>. Insofern reicht bereits für einen Neubau mit einem Niedrigenergiehausstandard eine Absorberfläche von 60 bis 80 m<sup>2</sup>; oder überschlägig die halbe Nutzfläche, die auf dem Freigelände verfügbar sein muss.

Zum Vergleich: Mit den bisherigen Rohrabsondern war die doppelte Belegungsfläche erforderlich. Die flexiblen Reposolmatten haben zudem noch den Vorteil zu verzeichnen, dass sie leichter zu verlegen sind. In der Praxis hat sich zudem das Heizflächensystem der Reposolmatten in Form von Kapillarrohrheizregistern für Decken- und Wandheizungen, die in den Putz eingebettet werden bestens bewährt.

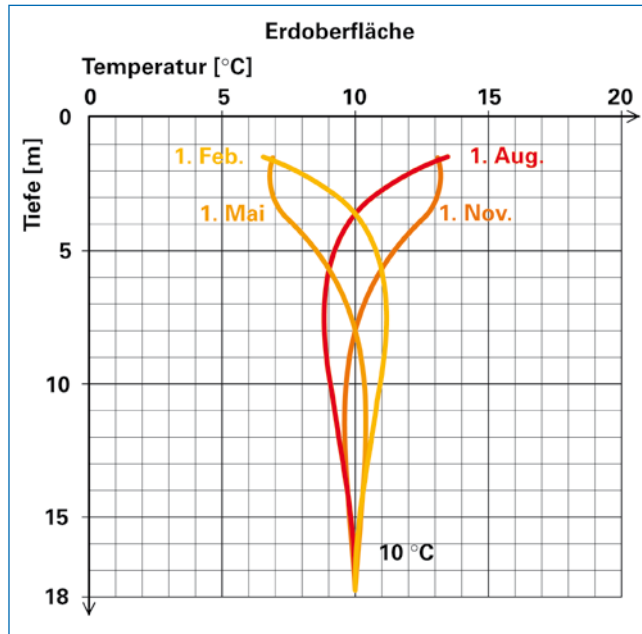
### 5.5.2.2 Erdwärmesonden

Zu den innovativen Technologien zählen die unterschiedlichen Erdsonden, die primär als Kaltwasserquelle und Kühlsystem verwendet und z. B. zur Bauteilkühlung eingesetzt werden. Die Decken- und Fußbodenkühlsysteme leisten hierbei auch bei geringen Temperaturdifferenzen eine erhebliche Kühlleistung. Weil diese Systeme mit sehr geringen Temperaturdifferenzen arbeiten, bietet sich auch hier der Einsatz einer Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung und gegebenenfalls auch zur unterstützenden Kaltwassererzeugung an, wobei die Wärmepumpe unter diesen Temperaturbedingungen gute Leistungszahlen erreicht.

In Mitteleuropa sind die Einstrahlungswerte für eine Solaranlage in der Zeit von November bis März auch bei sonnigem Wetter zu gering, um den erforderlichen Wärmebedarf auch mithilfe einer Wärmepumpe mit einer Anzahl wirtschaftlich vertretbarer Kollektorflächen zu decken. In diesen Fällen stellt sich der Einsatz eines saisonalen Speichers als Lösungsvariante dar.

Bei Wärmepumpen mit Erdwärmesonden als Wärmequelle ist einer sorgfältigen Auslegung der Pumpe zur Umwälzung des Wasser-Glykolgemisches große Aufmerksamkeit zu schenken. Hier sind enorme Einsparungen möglich. Häufig führt in Erdsonden bis 100 m Tiefe eine laminare Strömung zum geringsten Energiebedarf. Zur Spitzenlastabdeckung und zur Effizienzsteigerung lässt sich das Wärmeevolumenproblem mit sehr groß dimensionierten Pufferspeichern oder mit den wesentlich kleineren und effektiveren Latentwärmespeichern oder mit Erdwärmesonden lösen.

Zur Gewinnung kostenloser Umweltwärme aus der Tiefe des Erdreichs werden für Heiz- und Kühlzwecke Erdwärmesonden in senkrechte Erdbohrungen gesetzt. Mittels Erdwärmesonden (vertikale oder schräge Bohrungen oder horizontal und oberflächennah ins Erdreich eingebrachte Systeme), aber auch mit erdgebundenen Betonbauteilen wird die Wärme an



**Abb. 5-6:** Jahrestemperaturverlauf im Erdreich (Quelle: Viessmann-Werke, Allendorf)

die Oberfläche gefördert. Hierzu wird eine ca. 30 bis 100 m tiefe säulenförmige Bohrung auf dem Grundstück hergestellt, in die ein Doppel U-Rohrkollektor eingelassen wird. Mit der gewonnenen Wärme wird eine erdgekoppelte Wärmepumpe versorgt, welche die aus dem Erdsondenkreislauf vorgewärmte Sole (Wasser-Frostschutzgemisch) auf das benötigte Temperaturniveau für Heizung und Warmwasserbereitung hebt. Andererseits kann im Sommer aber auch mit der Erdwärme gekühlt werden.

In den neueren technischen Regeln werden die Anforderungen und die Dimensionierung der Betonaktivierung sowie die Anforderungen an Erdsonden beschrieben. Das Regelwerk reicht allerdings zur Dimensionierung der Heiz- und Kühlanlagen nicht aus, weil zur Auslegung der Erdwärmesonden bzw. Erdkältesonden die Kenntnis des thermischen Verhaltens der Sonden, der Wärmeleitfähigkeit und der volumerischen Wärmekapazität des Erdreichs erforderlich ist. Aus diesem Grund werden zur Dimensionierung im Regelfall Simulationsrechnungen genutzt.

Andererseits geht der Anwender aber auch ein großes Risiko ein, wenn er die Richtwerte aus der VDI 4640 zugrunde legt, da die realen Werte in der Praxis erheblich von den Richtwerten abweichen können. Als Folge würde sich für die speicherwirksame Erdmasse auf jeden Fall eine unausgeglichene Energiebilanz ergeben, wodurch letztlich eine permanente Aufheizung oder Auskühlung resultieren könnte.

Der Zusammenhang zwischen der Leistung und der mittleren Temperaturdifferenz hinsichtlich der Energiequelle und Umgebung lässt sich für einfache geometrische Formen der Wärmequelle, d. h. Punkt, Linie, Band, Scheibe, etc., analytisch nach der »Quellentheorie« berechnen. Hierbei kann vor Beginn der Wärmeeinspeisung mit der gleichen Temperaturmessung der Wärmequelle die Temperatur der Umgebung nach einer angemessenen Ausgleichszeit einfach bestimmt werden.

**Tab. 5-7:** spez. Entzugsleistungen über Erdwärmesonden (Quelle: IB-THEISS, München)

| <b>Untergrund</b>  | <b>spezifische<br/>Entzugsleistung (W/m)<br/>für 1800 h</b> | <b>spezifische<br/>Entzugsleistung (W/m)<br/>für 2400 h</b> |
|--|---|---|
| <b>Allgemeine Richtwerte</b>   |   |   |
| Schlechter Untergrund<br>(trockenes Sediment);<br>$\lambda < 1,5 \text{ W/(m K)}$                                      | 25  | 20  |
| Untergrund normales Felsgestein<br>und wassergesättigtes Sediment;<br>$\lambda = 1,5 \text{ bis } 3,0 \text{ W/(m K)}$ | 60  | 50  |
| Felsgestein mit hoher<br>Wärmeleitfähigkeit;<br>$\lambda > 3,0 \text{ W/(m K)}$  | 85  | 70  |
| <b>Einzelne Gesteine</b>   |   |   |
| Kies, Sand, trocken  | < 25  | < 20  |
| Kies, Sand, wasserführend  | 65 bis 80   | 55 bis 65   |
| Einzelanlagen bei starkem Grund-<br>wasserfluss in Kies und Sand   |   | 80 bis 100  |
| Lehm und Ton, feucht   | 35 bis 50   | 30 bis 40   |
| Kalkstein, massiv  | 55 bis 70   | 45 bis 60   |
| Sandstein  | 65 bis 80   | 55 bis 65   |
| saure Magmatite, Granit, etc.  | 65 bis 85   | 55 bis 70   |
| basische Magmatite, Basalt, etc.   | 40 bis 65   | 35 bis 55   |
| Gneis  | 70 bis 85   | 60 bis 70   |

In der oberflächennahen Geothermie wird in den letzten Jahren die »Quellentheorie« aus dem Grund gerne angewendet, weil die Erdwärmesonden bzw. Erdkältesonden eine nahezu ideale Linienform haben und sich daher der Zusammenhang zwischen der Leistung und der Temperaturdifferenz nach großen Zeiten entsprechend der VDI 4640 logarithmisch in der Zeit darstellt.

Für die Beheizung und Kühlung eines Gebäudes mittels Wärmepumpentechnologie stellt sich dieses Temperaturniveau ideal dar. Selbst bei einer Temperaturdifferenz des Wärmeübertragers von ca. 10 K zwischen dem Untergrund und der Wärmepumpe sind, in Verbindung mit Flächenheizsystemen Heizzahlen von über 4,0 erreichbar.

Neben den geologischen und hydrologischen Untergrundverhältnissen sowie der gewählten Betriebsvariante ist die geothermische Nutzungsmöglichkeit auch von der Anzahl der Jahresbetriebsstunden abhängig. Entsprechend der VDI-Richtlinie 4640 wird die spezifische Entzugsleistung der Erdwärmesonden für jährliche Betriebsstunden von 1800 und 2400 Stunden berechnet. Im Vorfeld einer Anlagenplanung ermöglicht die Berechnung und Bewertung der spezifischen Entzugsleistung eine Aussage über den Grad der Nutzungsmöglichkeit von Erdwärmesonden. Bei kleineren Gebäudegrundstücken bieten die Erdsonden eine

Alternative zu den sonst üblichen Erdwärmeflächenkollektoren. Die Leistung einer Erdsonde ist allerdings von der Beschaffenheit des Erdreichs abhängig und kann im Mittel mit ca. 50 W/m Bohrtiefe veranschlagt werden.

*Objektbeispiel:*

Neubau Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG

Architekten: Anin Jeromin Fitolidis & Partner, Architekten & Ingenieure, Düsseldorf.

Der neue Baukörper der Hauptverwaltung übernimmt die Proportionen des weißen Bestandsgebäudes und bildet mit seinen Abmessungen einen gläsernen Zwilling, wobei die Gebäude mittels zweier Brückenelemente verbunden sind.

Das Gebäude mit einer Bruttogrundfläche von ca. 7100 m<sup>2</sup> (BGF) und einer Nettogrundfläche (NGF) von ca. 6350 m<sup>2</sup> besteht aus sieben Vollgeschossen, einem Staffelgeschoss sowie einem Untergeschoss mit integrierten EDV-Bereichen und Technikräumen.

*Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

Bei der Energieversorgung des Gebäudes spielen die regenerativen Energiequellen die entscheidende Rolle. Zur Wärme- und Kälteversorgung dient eine oberflächennahe Geothermieanlage mit 36 Doppel-U-Erdsonden in einer Tiefe bis zu 150 m. Die reversible Wärmepumpe leitet die Wärme bzw. Kälte der Erdsonden zu den Heiz- und Kühldecken. Bei tieferen Außentemperaturen erfolgt die Wärmeversorgung durch die Abwärmenutzung eines vorhandenen gasbetriebenen Blockheizkraftwerks (BHKW). Im Sommer wird diese Abwärme zur Trocknung und Kühlung der zentralen DEC-Lüftungsanlage (Desiccant Evaporating Cooling System) verwendet. Die Lastspitzen werden durch einen Gas-Wärmeerzeuger abgedeckt.

Auf dem Gebäudedach wurde zur Ergänzung der Stromversorgung eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 25 kWp installiert. Die gesamten gebäudetechnischen Anlagen werden über eine zentrale Gebäudeleittechnik mit einem M-Bus-System gesteuert und geregelt.

### 5.5.2.3 CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonden

Für Bauprojekte in wasserwirtschaftlich sensiblen Gebieten oder für den Fall, dass die genehmigungspflichtigen Bohrungen mit Solesonden nicht genehmigt werden, bietet sich der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonden an. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Erdwärmesonden, die mit einem Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel arbeiten, wird für diese Sonden Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) verwendet, das weder das Grundwasser noch das Mineralwasser negativ beeinflusst.

Die Funktionsweise einer CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde verläuft im Umkehrsinn zu den Solesonden. Hier rinnt zunächst das flüssige CO<sub>2</sub> an den Innenwänden der Sonde in die Tiefe und verdampft nach und nach durch die Aufnahme der Erdwärme, bevor es als leichteres Gas in der Rohrmitte wieder aufsteigt. In einem Wärmeübertrager wird die Erdwärme in der CO<sub>2</sub>-Gasform an das Arbeitsmittel der Wärmepumpe abgegeben. Das so abgekühlte Gas wird wieder flüssig und gelangt erneut zu den Erdwärmesonden. Weil das CO<sub>2</sub> innerhalb der Sonde selbstständig zirkuliert, wird bei diesem Verfahren auch keine Umwälzpumpe benötigt. Gegenüber des sonst verwendeten glatten Kunststoffrohrs besteht die CO<sub>2</sub>-Sonde aus Edelstahl-

wellrohr. Das hat den Vorteil, dass der Kohlendioxidfilm innerhalb der Rillen mit einem geringeren Durchmesser effektiver wirken kann. Zudem wird durch die bessere Wärmeübertragung und die kleinere Temperaturdifferenz zwischen dem CO<sub>2</sub> und dem Arbeitsmittel der Wärmepumpe eine höhere Leistungszahl erreicht. Als Folge sind auch niedrigere Betriebskosten zu verzeichnen.

Derzeit stehen CO<sub>2</sub>-Wärmesonden nach dem Prinzip des Wärmerohres anstelle der konventionellen Pumpsonden mit Wasser-Glykolegemisch in der Entwicklungsphase. Bei den Bohrarbeiten muss damit gerechnet werden, dass im Verlauf der Einbringung der Sonde nachträglich nicht mehr kontrollierbare Beschädigungen des PE-Mantels an einem Gesteinsrand des Bohrloches und Anlass zu Korrosionen des Kupferrohres geben könnte. Als Alternative bietet sich für die CO<sub>2</sub>-Erdsonden auch rostfreier Edelstahl an.

**Tab. 5-8:** Referenzprojekte für Anlagen mit oberflächennaher Geothermie  
(Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt   | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
|   | <b>Erdwärmesonden</b>   |  |
| Energon in Ulm,<br>Architekten:<br>Stefan Oehler;<br>oehler + arch kom,<br>Bretten        | Das Passivhausbürogebäude mit einer Nutzfläche von 7000 m <sup>2</sup> wurde als solaroptimierter Baukörper in Form eines Wankelmotor Grundrisses errichtet. Das Bauwerk enthält zur sommerlichen Wärmeabfuhr ein Feld aus 40 Erdwärmesonden mit je 100 m Bohrtiefe und einer Kälteleistung von bis zu 120 kW.                    | Die regenerative Primärkühlenergie wird zur Betonkerntemperierung in Verbindung mit in den Decken verlegten Lüftungsrohren genutzt. Der summierte Wärmebereitstellungsgrad von Abluft, Erdluftkanal und Erdwärmesonden liegt bei ca. 80 %. |
| Erweiterung eines Bürokomplexes in Stuttgart-Vaihingen,<br>Architekten PSKÄ,<br>Stuttgart | Für den auf einer Fläche von über 3500 m <sup>2</sup> erweiterten Bürokomplex wurde eine geothermische Erdwärmennutzung über Erdwärmesonden als Doppel-U-HPPE-System zur thermische Bauteilaktivierung (TBA) integriert. Insgesamt wurden 18 Erdsonden in einer Tiefe von 55 bis 60 m mit einem Mindestabstand von 6,0 m gesetzt. | Damit die Mineralwasservorkommen im Stuttgarter Raum nicht gefährdet werden, mussten die Bohrdurchmesser mit 200 mm ausgeführt werden.   |
| VIKA-Bürogebäude in Aachen  | Balanced Office Building (BOB-Konzept)<br>28 Erdsonden, 45 m tief   | Baukerntemperierung (BKT); Gebäudeleittechnik  |
|   | <b>Fundament-Massivabsorber (EWT)</b>   |  |
| Mediathek in Neckarsulm<br>Bechler Krummlauf Teske,<br>Heilbronn                          | Bauteilaktivierung, oberflächennahe Geothermie, Erdkühle, Fundament-Massivabsorber (EWT)  | WRG, PV: ca. 19 kWp  |

Fortsetzung Tab. 5-8

| Projekt/Architekt                                   | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten   |
|---|---|--|
| Volkswagen Bibliothek<br>Berlin<br>Walter A. Noebel | thermisch aktivierte Bauteilsysteme (TAB), Wärmepumpe, Wärme- und Kältespeicherung, der Bodenplattenabsorber (8100 m <sup>2</sup> ), nutzt das Erdreich unter dem Gebäude als saisonalen thermischen Speicher und dient mittels Wärmepumpe zur Wärme/Kühlung der TAB. | Raumlufttechnik mit Wärmerückgewinnung, Regenerative und passive Kühlung, RLT-Sorptions-technologie; Gebäudeleittechnik (GLT). |

#### 5.5.2.4 Energiepfähle (Gründungspfähle)

Bei schwierigen Baugrundverhältnissen müssen die Bauwerke tiefgegründet werden. Bei Gebäuden die auf einer Pfahlgründung stehen, bietet sich geradezu eine zusätzliche geothermische Nutzung des Untergrundes durch die Energiepfähle an. Hierbei handelt es sich um geothermisch aktivierte Ortbeton- oder Fertigpfähle, Hohlpfähle oder Presspfähle, die an ein Wärmepumpensystem angeschlossen sind. Die thermische Nutzung des (oberflächennahen) Untergrundes wird u. a. in der VDI-Richtlinie 4640 (Blatt 2) definiert. Energiepfähle werden dort als »besondere Wärmequellen(-senken)-anlagen« behandelt.

Die Energiepfähle nutzen das oberflächennahe geothermische Potenzial zum Heizen und/ oder Kühlen. Bei einem wechselseitigen Heiz- und Kühlbetrieb übernehmen die Energiepfähle und das sie umgebende Erdreich die Funktion eines saisonalen Wärme- und Kältespeichers.

Das Funktionsprinzip von Erdpfählen verläuft analog dem der Erdwärmesonden. Eine umschaltbare Wärmepumpe entzieht dem in den Erdpfählen zirkulierenden Wasser die Wärme, die dann für die Gebäudebeheizung zur Verfügung steht bzw. gibt im Kühlbetrieb, d. h. in den Sommermonaten wahlweise die dem Gebäude entzogene Wärme an den Energiepfahlkreislauf ab.

Die durch die Wärmeentnahme bzw. Wärmebeaufschlagung am Energiepfahl einem »Gebirgsprofil«-ähnlichen Temperaturgradienten bewirken einen gerichteten Wärmestrom.

Die Herstellungs- und Installationskosten der Energiepfähle sind, da sie kombiniert mit der statischen Gründung erfolgen, im Vergleich zu den Erdwärmesonden um ca. 4 bis 50 % geringer.

Die Energiepfahlsysteme erfordern allerdings auch eine optimale, den Untergrundverhältnissen angepasste Dimensionierung und Ausführung. Neben der Wärmeleitung durch das Erdreich (anstehende Substrate) wird die Entnahmeeistung der Energiepfähle durch

- den volumerischen Wärmefluss (Wärmetransport) mit dem Grundwasser
- die Pfahlanordnung (ggf. gegenseitige Beeinflussung)
- die konstruktiven Merkmale (geothermische Aktivierung und Pfahlgeometrie)

bestimmt.

*Objektbeispiel:* Omnibusbetriebshof in Ludwigsburg, Architekten: Architektur- und Planungs GmbH Cavadini, Stuttgart

Der Neubau des Omnibusbetriebshofes der Jäger GmbH & Co. KG beinhaltet ein Verwaltungsgebäude, die Werkstatt und Nebengebäude sowie ein Carport für 90 Busse. Da sich das Erdreich im Bereich der Gebäudegrundrisse als nicht tragfähig erwies, mussten die Gebäudefundamente auf Gründungspfählen errichtet werden, die sich gleichzeitig als Energiepfähle zur Nutzung der Erdwärme und Erdkälte angeboten haben.



**Abb. 5-7:** Omnibusbetriebshof in Ludwigsburg (Quelle: Cavadini Architektur- und Planungs GmbH)

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik:*

Das Bauwerk wurde auf 112 Bohrpfählen gegründet, die geothermisch genutzt werden und bis zu einer Tiefe von 10 m ins Erdreich reichen. Die massiven Decken im Erdgeschoss und im 1. Obergeschoss des Verwaltungsgebäudes dienen als Speicherelemente in Form einer Betonkerntemperierung (BKT). Aufgrund der großen Betonspeicherkapazität wird die Wärmepumpe so geschaltet, dass der Betonkern in der Nacht aufgeladen wird, um sich im Tagesverlauf wieder zu entladen. Durch die Kältespeichermasse werden auch im Sommer die Behaglichkeitskriterien innerhalb der Nutzungsbereiche erreicht. Um die fehlende Kühllast bzw. den fehlenden Wärmebedarf zu decken, wurden im Bereich der Fassade Aluminium-Paneeeldecken integriert, die mit zusätzlichen Kühl-/Heizdecken bestückt sind. Die Raumluftqualität wird in Bezug auf die erforderliche Außenluftfrate durch eine bedarfsgeregelte Be-



und Entlüftungsanlage eingehalten. Das Energiekonzept wurde so effizient umgesetzt, dass rund 70 % des Heiz- und Kühlenergiebedarfs durch die Nutzung der Geothermie abgedeckt werden. Durch die Bohrfpahlaktivierung und die thermische Betonkernaktivierung wurde ein ökonomisch und ökologisch optimiertes Verwaltungs- und Betriebsgebäude errichtet.

**Tab. 5-9:** Referenzprojekte – Anlagen mit Energiepfahlnutzung (Quelle: IB-THEISS, München)

| Projekt/Architekt  | Rationelle Energietechnologien  | Besonderheiten  |
|--|---|---|
| Nord/LB-Zentrale in Hannover   | 194 Gründungspfähle mit einem Durchmesser von 90 cm; in 20 m Tiefe  | Heliostat-Tageslicht-Lenksysteme, Nachtauskühlung, Solarthermie |
| Skyper Tower in Frankfurt,<br>J S K-Architekten<br>Bauherr: DekaBank | Im Bereich der Gründung des Bürohaus Tower mit einer Bürofläche von 40.710 m <sup>2</sup> wurden 47 Energiepfähle in einer Tiefe bis 51 m integriert. Das Energiepotenzial im Erdreich wird zum Heizen bzw. Kühlen verwendet wird.                |   |
| Stadtwerke Bochum,<br>Architekten:<br>Gatermann-Schossig,<br>Köln    | Die 104 der 135 Gründungspfähle, auf denen das Gebäude ruht werden als wasserführende Energiepfähle genutzt. Die gewonnene regenerative Energie wird zum Kühlen bzw. Heizen der in den Büros dezentral angeordneten Change Over Systeme geleitet. | Nachtauskühlung   |

## 5.6 Wärmepumpen-Innovationen

### 5.6.1 Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP)

Nach den Niedertemperaturwärmeerzeugern und der Brennwerttechnologie bieten sich in der neuen Generation neue Techniken an. Im Gegensatz zur Kompressions- und zur Absorptionswärmepumpe wird die Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) nicht elektrisch mit einem Verdichter oder einer Lösungsmittelpumpe, sondern in einem thermodynamischen Umlaufprozess, der Temperatur- und Konzentrationsunterschiede von Stoffgemischen ausnutzt, wird der Umgebung kostenlose Wärme entzogen. Aufgrund des natürlichen Umlaufprinzips arbeitet die DAWP praktisch geräuschlos und vibrationsfrei. Die erdgasbetriebene Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) erreichte einen theoretischen Prozesswirkungsgrad bis zu 150 %. Bei einer Heizleistung von 3,6 kW werden nur 2,4 kW an Primärenergie über einen integrierten Gasbrenner zugeführt. Die Leistungszahl (COP) liegt bei 1,5, daraus folgt, dass pro eingesetzter Primärenergie-kWh zusätzlich eine halbe kWh an Umweltenergie nutzbar gemacht wird.

Für den Einsatz in Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser ist z. Zt. eine Kombination mit einem Brennwertwärmeerzeuger mit einer Leistung von 11 kW vorgesehen. Dieses kombinierte System würde nach dem heutigen Stand ca. 25 % über dem Nutzungsgrad der momentan installierten Brennwertwärmeerzeuger liegen.



Ein besonderer Vorteil der DAWP liegt darin, dass sie über die gesamte Lebensdauer wartungsfrei arbeitet, weil hier keine beweglichen Bauteile, wie Verdichter, Ventile, etc. vorhanden sind. Bei der DAWP muss lediglich der moderne, emissionsarme Gasbrenner regelmäßig gewartet werden.

Aufgrund der Ausführung als Sole-/Wasser-Wärmepumpe mit dem Kältemittel Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) kann selbst bei  $-25\text{ °C}$  aus der Umgebung noch Energie entzogen werden.

Bei einer konventionellen Kompressionswärmepumpe wird dagegen der zum Antrieb des elektrischen Verdichters erforderliche Strom vom Kraftwerk mit sämtlichen Verlusten behaftet bereitgestellt.

Vorteil: sparsamer Energieverbrauch der Pumpe. Die gasbetriebene Wärmepumpe nutzt durch einen natürlichen Umlaufprozess die Umweltwärme zur Warmwasser- und Wärmeversorgung von Wohnungen und Gebäuden. Für die praktische Anwendung ist der Einsatz einer Kombination aus Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) und Brennwertwärmeerzeuger angedacht, die nach aktuellen Erkenntnissen einen um 20 bis 35 % höheren Normnutzungsgrad aufweisen sollte als dieses bei den heutigen Brennwertwärmeerzeugern der Fall ist.

Als Arbeitsgemisch wird ein Ammoniak-/Wasser-System verwendet. Als Trägergas für die Diffusion wird Helium eingesetzt. Der Kreisprozess ist so aufgebaut, dass bei der Wärmezufuhr die Lösung durch Temperatur- und Konzentrationsunterschiede in Bewegung gesetzt wird. Der antrieb der DAWP erfolgt mit einem Gasbrenner von ca. 2,5 kW Leistung im Ausreiber des Kreisprozesses. Die dabei im Ammoniakdampf mitgerissenen Wassertröpfchen werden im Rektifikator abgeschieden und zurückgeführt. Der hochreine Ammoniakdampf kondensiert daraufhin und gibt dabei seine Kondensationswärme an das Heizwasser ab. Angetrieben durch die höhere Dichte des Ammoniakdampf-Heliumgemisches nach dem Verdampfer strömt das Gasgemisch zum Absorber, wo das gasförmige Ammoniak von der  $\text{NH}_3$ -armen Lösung absorbiert und hierdurch das Heizungswasser erwärmt wird.

### Kältegewinnung auch mit Wärmepumpen

Im Gegensatz zur Absorptionskältemaschine kann die Wärmepumpe selbst im untersten, dem gut wärmegeprägten Einfamilienhaus zuzuordnenden Leistungsbereich zur Kühlung genutzt werden. Eine einfache Umschaltung von Winter- auf Sommerbetrieb genügt. Das Funktionsprinzip der Wärmepumpe beruht auf Absorption (Absorptionskältemaschine) jedoch ist hier ein elektromotorisch angetriebener Verdichter, der allerdings nur wenig Antriebsenergie benötigt, erforderlich. Hierbei wird kalte Außenluft angesaugt, gefiltert und mit der durch die Abluft vorhandenen Restwärme versetzt. Zusammen mit einer Wärmepumpe wird die einströmende Luft erwärmt oder gekühlt. In jedem Raum werden elektrische Nachheizflächen direkt im Luftsystem integrierte und über die Raumtemperaturregelung aktiviert. Da beim Einsatz in Niedrigenergiegebäuden keine weiteren Zusatzheizungen notwendig sind, reduzieren sich die Heizkosten nach Angaben des Herstellers bis zu 40 %, wobei dabei auch eine vereinbarte Förderung der Elektroenergiekosten berücksichtigt wurde.

### Wärmepumpe mit Kühlung im Umkehrbetrieb

Die eingebaute Wärmepumpe wird so bemessen, dass sie einerseits im Heizbetrieb den rest-

lichen Wärmebedarf und andererseits als Kälteaggregat im Umkehrbetrieb den restlichen Kühlbedarf deckt.

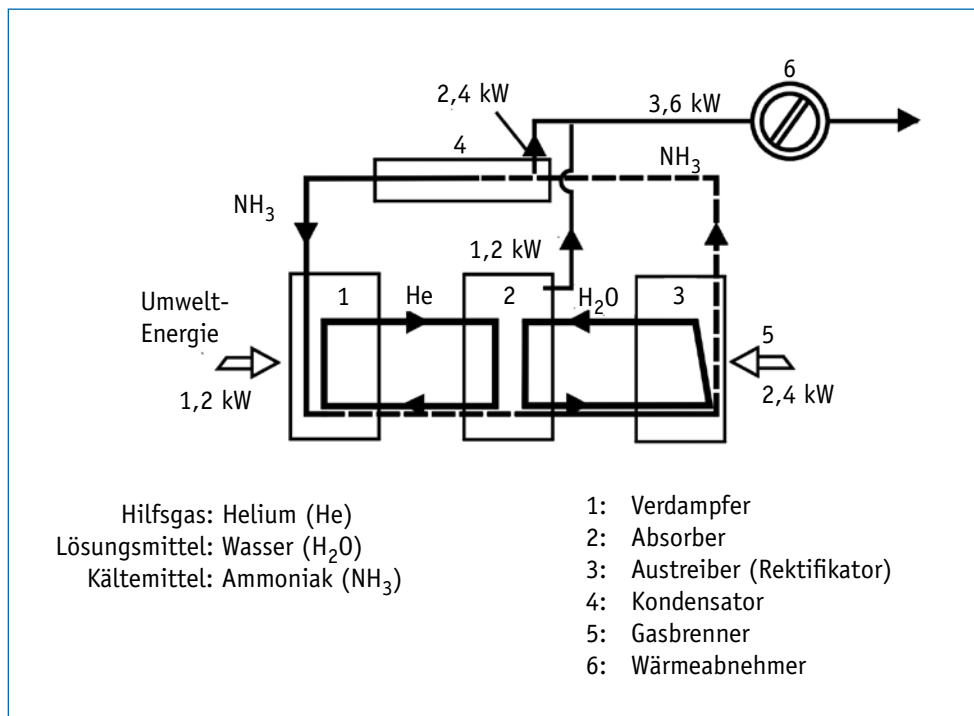
In der Regel wird bei einer Absorptionswärmepumpe eine Lösungspumpe benötigt, die zwischen den beiden Druckniveaus, die jede Wärmepumpe beinhaltet, das Kältemittel gegen den höheren Druck pumpt. An Stelle eines elektrisch betriebenen Verdichters bzw. einer Lösungsmittelpumpe wird die Diffusions-Absorptionswärmepumpe thermisch mittels eines Gasbrenners betrieben. In einem thermodynamischen Umlaufprozess werden die Temperatur- und Konzentrationsunterschiede von Stoffgemischen ausgenutzt und der Umgebung kostenlose Wärme entzogen. Als Arbeitsgemisch wird ein Ammoniak-Wassersystem und als Trägergas für die Diffusion wird Helium verwendet, dessen Partialdruck so groß ist, dass bei entsprechenden Temperaturen die Anlage nach dem Schwerkraftprinzip oder Thermosyphonprinzip im Naturumlauf zirkulieren kann. Die erdgasbetriebene Diffusions-Absorptionswärmepumpe erreicht einen theoretischen Prozesswirkungsgrad bis zu 150 %. Bei einer Heizleistung von 3,6 kW werden nur 2,4 kW an Primärenergie über den integrierten Gasbrenner zugeführt. Die Leistungszahl (COP) liegt bei 1,5, daraus folgt, dass pro eingesetzter Primärenergie-kWh zusätzlich eine 1/2-kWh an Umweltenergie nutzbar gemacht wird.

#### *Funktionsprinzip:*

Der Kreisprozess ist so aufgebaut, dass bei der Wärmezufuhr sich die Lösung durch Temperatur- und Konzentrationsunterschiede in Bewegung setzt. Die Arbeitsmedien zirkulieren innerhalb der DAWP aufgrund der sich durch Wärmezufuhr automatisch einstellenden Dichte- und Konzentrationsunterschiede. Der Kreisprozess der DAWP-Technologie beginnt damit, dass Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) im Verdampfer, z. B. auf dem Dach eines Hauses, analog der Funktion eines Kollektors ausgeführt, verdunstet und in die Heliumatmosphäre diffundiert. Weil das Ammoniak aufgrund des in der Heliumatmosphäre niedrigeren Partialdruckes verdampft, wird vom Ammoniak gleichzeitig die Umgebungsenergie aufgenommen. Das Helium (He) dient hierbei nur ausschließlich als druckausgleichendes Hilfsgas (Treibgas), ohne an einem eigentlichen Stoffaustausch teilzunehmen. Im Anschluss daran strömt das Dampfgemisch (Ammoniak/Helium) über einen Wärmeübertrager in den Absorber. Eine an  $\text{NH}_3$ -arme Wasser-Ammoniaklösung absorbiert im Absorber das Ammoniak, sodass das übrige Helium wieder über den Wärmeübertrager in den Verdampfer zurückfließen kann. Bei diesem Absorptionsvorgang wird nutzbare Wärme (Absorptionswärme) frei. Die Absorptionswärme entsteht bei der physikalischen Paarung der beiden Stoffe (Wasser/Ammoniak). An diesem ersten Wärmeabgabepunkt, d. h. an dieser Stelle wird nur die Absorptionswärme vom Gasbrennen hineingesteckt, erfolgt daher noch kein Gewinn aus der Umweltwärme. Im Anschluss an den Absorber strömt die an  $\text{NH}_3$ -reiche Wasser-Ammoniak-Lösung in den Austreiber (Generator). Im Austreiber wird dem Prozess mittels Gasbrenner (ca. 2,4 kW) Wärme zugeführt. Aufgrund des niedrigen Siedepunktes verdampft das Ammoniak und trennt sich im nachfolgenden Rektifikator vom nicht mehr gewünschten Wasser. Die im Ammoniakdampf mitgerissenen Wassertröpfchen werden im Rektifikator abgeschieden und in den Absorber zurückgeführt. Der reine Ammoniakdampf steigt in den Kondensator auf und gibt dort nach der Kondensation die Wärme ab, die er zuvor im Verdampfer der Umwelt entzogen hat. Nach dem Verdampfer strömt das Gasgemisch, angetrieben durch die höhere Dichte des Ammo-

niakdampf-Heliumgemisches, zum Absorber, wo das gasförmige Ammoniak von der  $\text{NH}_3$ -armen Lösung absorbiert und hierdurch das Heizungswasser erwärmt wird.

Ammoniak wird aus dem Grund eingesetzt, weil es thermodynamisch besondere Eigenschaften und kein Ozon schädigendes Potenzial hat. Analog zu den Absorptionskältemaschinen im Haushalt (Campingwagen, Freizeithütten) muss jedoch die Gebrauchstauglichkeit des giftigen Ammoniaks hinsichtlich evtl. Leckagen technisch garantiert werden. Derzeit sind in den Normen und Regelwerken noch keine Grenzwerte erfasst. Bisher wird jedoch ein Grenzwert von ca. 2,5 kg Ammoniak angedacht, wobei diese Menge auf eine Wärmepumpenleistung von 3,6 kW hinauslaufen würde.



**Abb. 5-8:** Funktionsprinzip einer Diffusions-Absorptionswärmepumpe ( $\text{COP} = 1,5$ )  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Mit dem Arbeitsmittelpaar Ammoniak/Wasser entsteht im Gegensatz zu den konventionellen Kältemitteln weder eine Gefährdung der Ozonschicht noch eine Förderung des Treibhauseffektes. Aufgrund der Ausführung als Sole/Wasser-Wärmepumpe mit dem Kältemittel Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) kann selbst bei  $-25^\circ\text{C}$  aus der Umgebung noch Energie entzogen werden.

### 5.6.1.1 Kombination einer Diffusions-Absorptionswärmepumpe mit einem Brennwertwärmeerzeuger

Die Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) wird in der Regel als umweltschonendes Sole-Wassersystem mit einem hohen Wirkungsgrad und verlustfreien Nutzung der Primärenergie für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung eingesetzt. In der Praxis wird

die Diffusions-Absorptionswärmepumpe in Kombination mit einem Brennwertwärmeerzeuger konzipiert, wobei die DAWP übernimmt hierbei die Grundlast für den Heizbetrieb und die Warmwasserbereitung. Bei einer hohen Wärmebedarfsanforderung, also bei niedrigen Außentemperaturen, wird der Brennwertwärmeerzeuger zugeschaltet.

## 5.6.2 Vuilleumier-Wärmepumpe

Das Prinzip der Vuilleumier-Wärmepumpe (Analog dem Stirlingprinzip) wurde bereits 1913 von Rudolph Vuilleumier zum Patent angemeldet und weicht vom mechanischen Kompressionsprinzip ab. Die Wärmepumpe arbeitet ohne physikalischen Verdichter, d. h. das Funktionsprinzip basiert analog auf den Stirlingmotor (1816) und somit auf einer externen Verbrennung.

Bei der Vuilleumier-Wärmepumpe wird die Wärme analog zum Stirlingmotor, von außen zugeführt und somit ein schadstoffarmer Betrieb ermöglicht. Die Vuilleumier-Wärmepumpe eignet sich für unterschiedlichste Brennstoffe, wobei hier die Umgebungswärme auch auf niedrigem Temperaturniveau genutzt werden kann. Selbst mit Außenluft als Wärmequelle erreicht die Vuilleumier-Wärmepumpe hohe Leistungsdaten. Die Energiebilanz ergibt, dass sich mit der Vuilleumier-Wärmepumpe der Primärenergieverbrauch gegenüber eines Gasbrennwertgerätes um mehr als 30 % senken lässt. Die Vuilleumier-Wärmepumpe kann zudem auch an kalten Tagen ohne gravierende Leistungseinbußen monovalent Heizwärme und Warmwasser bereitstellen. In besonderem Maße eignet sie sich daher für den Einsatz in Altbauten ab einem Nennleistungsbedarf von ca. 15 kW, bei denen in der Regel die Erschließung anderer Wärmequellen wie Erdreich oder Grundwasser nicht möglich oder zu teuer ist. Für kleinere Leistungen erhöhen sich die spezifischen Kosten unverhältnismäßig stark aufgrund der in allen Leistungsklassen erforderlichen Peripheriegeräte.

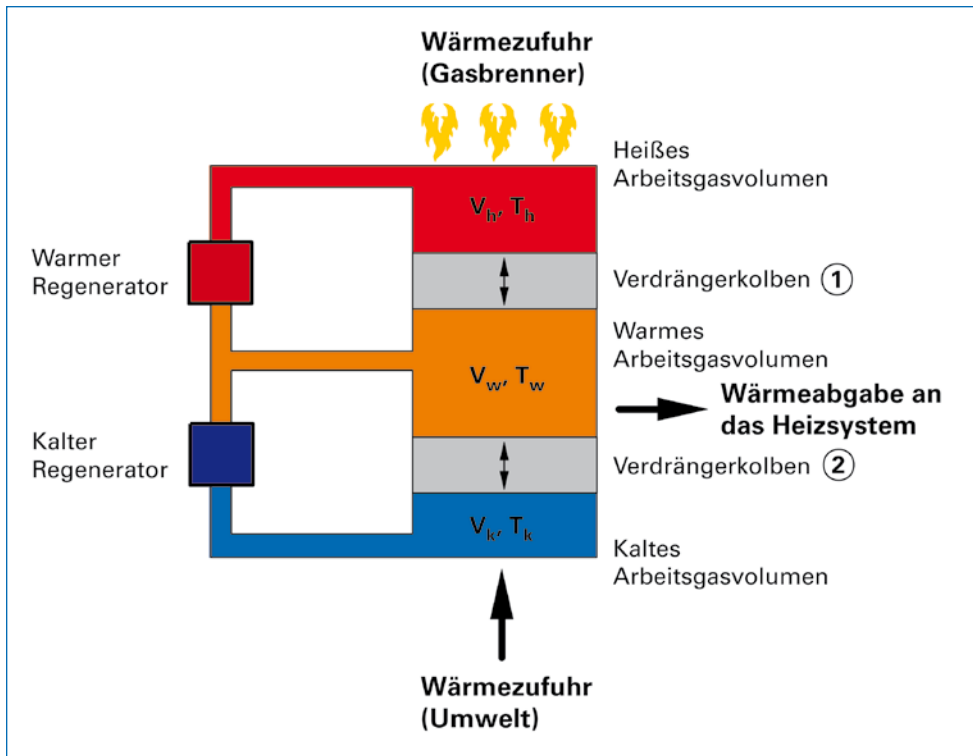
Zum thermodynamischen Vorgang wird bei der Vuilleumier-Wärmepumpe z. B. die thermische Energie der heißen Rauchgase eines Brenners genutzt. Indirekt handelt es sich um eine Brennwerttechnologie mit anderen Mitteln und dazu noch mit höherem Wirkungsgrad.

Im Verhältnis zur elektrischen Kompressionswärmepumpe mit einem Verhältnis von 1,2 (Nutzenenergie zu Primärenergie) erreicht die Vuilleumier-Wärmepumpe den Faktor 1,7, d. h. 170 %, wobei zudem die CO<sub>2</sub>-Emission erheblich geringer ist. Beim Faktor 1,2 der Elektrowärmepumpe ist der ineffiziente Verstromungsprozess mitberücksichtigt.

Positiv ist, dass die Vuilleumier-Wärmepumpe mit Erdgas betrieben wird sowie auf der Heizungsseite bis 75 °C hochgefahren werden kann und somit auch den Brauchwarmwasserbedarf abdeckt. Außergewöhnlich ist ferner, dass diese Wärmepumpe auch bei Außentemperaturen bis zu -20 °C betrieben werden kann.

### *Funktionsprinzip:*

Ähnlich einem Stirlingmotor basiert das Funktionsprinzip der Vuilleumier auf einer externen Verbrennung. Bei beiden Systemen handelt es sich um regenerative Gaskreisprozesse. Der Unterschied liegt darin, dass beim Stirling, das Gasgesetz entsprechend Boyle-Mariotte (ansteigender Druck bei ansteigender Temperatur) den Kolben bewegt. Der Stirlingmotor verbrennt das Gas nicht intern in den Zylindern, sondern außerhalb. Es genügt ein gewisser Wärmestrom, der die Maschine in ein Drehmoment umwandeln lässt.



**Abb. 5-9:** Funktionsprinzip einer Vuilleumier-Wärmepumpe (Viessmann-Werke-Allendorf)

Anders verhält es sich bei dem Vuilleumierprozess. Hier wird kein Drehmoment erzeugt, sondern nur Wärme und Kälte. Bei der Vuilleumier-Wärmepumpe handelt es sich jedoch um den konstruktiven Unterschied, dass hier der Druck nicht einseitig auf einer Kolbenseite lastet und aus diesem Grund auch nicht schiebt. Die beiden Zylinderräume oberhalb und unterhalb des Kolbens kommunizieren über einen Bypass miteinander, d. h. das Volumen bleibt konstant und auf beiden Seiten herrschen identische Drücke. Da eine Druckdifferenz fehlt, entsteht auch kein Drehmoment. Die Vuilleumier-Wärmepumpe verschiebt einfach das Gas (Helium) von einem heißen Raum in einen kalten und zurück von kalt nach warm. Von heiß nach kalt sinkt der Druck, von kalt nach heiß steigt der Druck. Dieser Vorschub bedeutet jedoch nur eine Vorverdichtung und genügt nicht um die aufgenommene Umgebungswärme in die Hausheizung einzuspeisen. Aus diesem Grund muss das Gas noch weiter verdichtet und zwar auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben werden. Dieses wird durch einen auf dem Kopf des Aggregates integrierten thermischen Kompressor (Brenner) erreicht.

Derzeit sind die Herstellungskosten für die im Test befindlichen Prototypen noch zu hoch. Die Schwierigkeit zur Serienfertigung liegt, analog wie bei der Brennstoffzelle, in der momentanen Einzelfertigung und an der Energiepreissituation. Mit Anreizen, z. B. über Abschreibungen, Fördermodelle, etc., analog zu den solarthermischen oder Photovoltaik-Systemen, ist eine Marktakzeptanz für die Verwendung der Vuilleumier-Wärmepumpe sicherlich denkbar. Der Brenner und die kalte Seite führen dem Prozess Energie zu und stehen in der Summe als Energiepolster auf der Wärmeabgabeseite dem Heizungswärmeüber-

trager zur Verfügung. Anfänglich wurden Vuilleumier-Wärmepumpen mit Leistungen von ca. 4 kW für Niedrigenergiehäuser konzipiert. Für diesen Leistungsbereich war jedoch das Preis-/Leistungsverhältnis nicht ausgewogen. Aus diesem Grund befinden sich derzeit als Prototypen Vuilleumier-Wärmepumpen mit 20 bis 30 kW auf dem Prüfstand.

### 5.6.3 Zeolith-Wärmepumpe

Der schwedische Mineraloge Baron Axel F. Cronstedt hat bereits 1756 entdeckt, dass bestimmte Mineralien zu brodeln beginnen, wenn diese stark genug erhitzt werden. Für diese mineralischen Substanzen hat von Cronstedt die Bezeichnung »Zeolithe«, als Wortpaarung aus »zeo« (grch. siedeln) und »lithos« (grch. Stein) eingeführt. Die »siedenden Steine« haben bereits seit einigen Jahren das Interesse der Wissenschaft geweckt, weil sie zahlreiche interessante Eigenschaften besitzen. Die Zeolithe werden z. B. als Molekularsiebe in der Wasserwirtschaft verwendet, als Schwermetallkatalysator in der Abgasreinigung, als Ersatz für Phosphate in den Waschmitteln. Aufgrund der besonderen thermodynamischen Eigenschaften wird Zeolith auch bei der Solaren Klimakälte (Adsorptionskältemaschine) genutzt und als Energiespeicher zur umweltschonenden Wärmebereitstellung.

#### *Funktionsprinzip:*

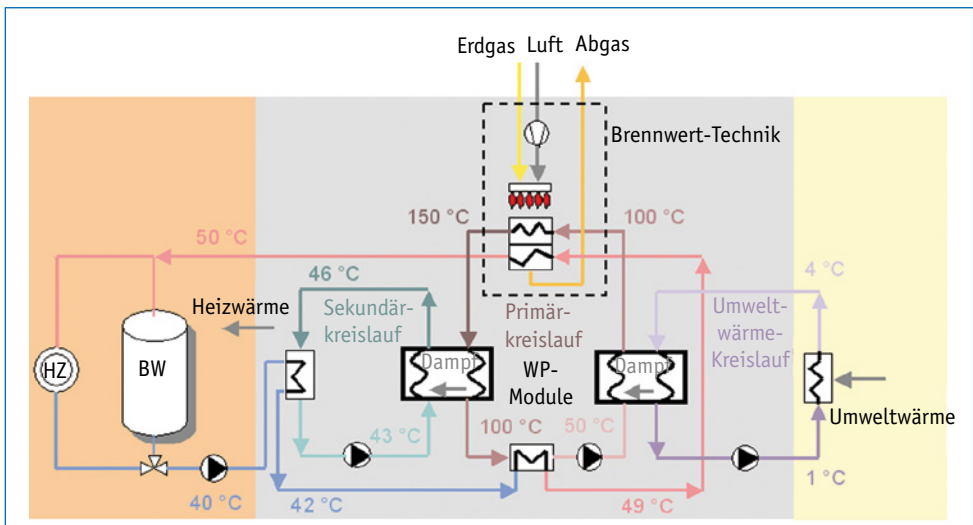
Das Funktionsprinzip der Zeolith-Wärmepumpe basiert auf einem Gasbrenner als Antrieb und benötigt keinen elektrischen Kompressor. Zudem arbeitet das Aggregat mit dem höchst umweltfreundlichen Mineral Zeolith als Speicher sowie Wasser als Kältemittel. Die Energieeffizienz verhält sich analog zur Brennwerttechnologie nur mit höherem Wirkungsgrad, laut Herstellerangaben nach den ersten Testläufen bei 135 % im Jahresmittel. Gegenüber einem konventionellen Gas-Brennwertwärmeerzeuger spart die Zeolith-Wärmepumpe ein Viertel der bisher erforderlichen Energie ein und verursacht weit geringere CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen.

Die Zeolith-Megaperls kommen ursprünglich aus der Waschmittelindustrie und zwar als Phosphatersatzmittel, da die Phosphate die Gewässer überdüngen und das biologische Gleichgewicht stören. Zeolith ist ein sandartiges, mineralisches Gestein, das in der Natur in großen Mengen vorkommt. Wenn die hellbraunen, kleinen Zeolithkügelchen in Wasser eingeführt werden, dann brodeln das Wasser sofort auf und verdampft. Zeolith reagiert mit hoher Geschwindigkeit mit dem Wasser, sodass eine schlagartige Hitze entsteht, die das Wasser in Sekundenbruchteilen zum Kochen bringt. Die Zeolithporen zeichnen sich durch extreme elektrostatische Eigenschaften mit einer hohen Polarität aus. Die Zeolithkügelchen nehmen im Wechsel Wasserdampf auf (adsorbieren) und geben Wasserdampf ab (desorbieren).

In der riesigen Oberfläche des Zeolith lagert sich das Wasser ein. Wenn der Speicher erhitzt wird, entlädt sich das Mineral unter der Wasserdampfbildung. Die nötige Vorwärmer-temperatur wird von einem Gasbrenner erzeugt. Um diesen Prozess noch effektiver zu gestalten, läuft der Prozess in einem evakuierten Behälter, dem Wärmepumpenmodul ab. Vakuum deshalb, weil bei einem Unterdruck die Verdampfungstemperatur beinahe um eine Zehnerpotenz von 100 °C liegt, d. h. also auf ca. 4 oder 5 °C und darunter abfällt. Der Gasbrenner erhitzt das Prozesswasser auf ca. 200 °C bei einem Druck bis 15 bar. Dieses Heiß-

medium strömt durch die Wendeln des ersten Zeolithwärmeübertragers, der nur auf der Außenseite mit Zeolith beschichtet ist. Die Zeolithporen sind beim Start mit destilliertem Wasser, das eigentliche Kältemittel, gefüllt. Dieses Kältemittel wird aufgrund der hohen Temperatur vom Zeolith abgegeben, kondensiert in wenigen Augenblicken wieder an der zweiten Wendel in ein und dem gleichen Modul. In Folge gibt es die Kondensationswärme über den Sekundärkreis an den Heizkreis ab. Das Prozesswasser im Primärkreis tritt mit ca. 100 °C aus dem Zeolithwärmeübertrager und ein Teil davon gelangt in den Heizungskreis. Die Ausgangsseite steuert mit ca. 50 °C den zweiten Zeolithwärmeübertrager an, wobei hier folgender Prozess abläuft: Im Vakuumbehälter wirkt das Zeolith im Moment des Starts als Desorber. Station B dagegen fungiert zu diesem Punkt als Adsorber, denn hier auf der »kalten« Seite des Primärkreises nimmt der Zeolith das im Modul A kondensierte Kältemittel in Form von Wasserdampf wieder auf. Die dabei frei werdende Adsorptionswärme erhitzt das Prozesswasser im Primärkreis auf ca. 150 °C, das im Anschluss erneut zum Brenner-Wärmeübertrager gelangt. Hier erfolgt noch mal eine Temperaturerhöhung um ca. 50 °C, also auf 200 °C durch den Gasbrenner. Die zur Verdampfung des Kältemittels erforderliche Verdampfungswärme wurde seitens des Umweltwärmekreises (Luft oder Wasser) zur Verfügung gestellt. Wenn im jeweiligen Modul die Desorptions- und die Adsorptionsphasen beendet sind, schaltet eine Hydraulik den Kreislauf um.

Wenn der Kreislauf nicht im Rhythmus umgekehrt würde, müsste die gesamte Anlage intermittierend betrieben werden. Die Folge wären lange Wartezeiten und infolge dessen Leistungseinbußen. Die zwei Vakuumbehälter garantieren dagegen eine kontinuierliche Betriebsweise. Wenn der eine Zeolith trocken und der andere feucht ist, schaltet die Hydraulik um. Hierdurch wird der Kondensator zum Verdampfer und umgekehrt.



**Abb. 5-10:** Funktionsprinzip eines Zeolith-Wärmepumpenheizgeräts (Quelle: Vaillant, Remscheid)

Ein weiterer Vorteil der Zeolithwärmepumpe liegt darin begründet, weil der Wärmeverbund Zeolith/Wasser durch die hohen Adsorptionstemperaturen garantiert hohe Vorlauftempera-

turen für das Warmwasser zur Verfügung stellt. Hiermit übertreffen die Vorteile der Zeolith-Wärmepumpe sogar die der Elektrowärmepumpe. Die Elektrowärmepumpe kann wegen ihres Einstoffkältemittels entweder nur mit niedrigen Temperaturen heizen oder aber mit hohen Kältemitteln den Bedarf an Warmwasser garantieren. Der entsprechend dimensionierte Kältemittelkreislauf lässt nicht beides zu. Ausnahme wäre nur, wenn es sich um eine reine Warmwasserwärmepumpe handeln würde, die evtl. Überschusswärme ins Heizungsnetz überträgt. Um die Spitzentemperaturen für die Warmwasserseite zu garantieren, werden die Elektrowärmepumpen von der Herstellerseite mit einer elektrischen Zusatzheizung bestückt.

Es lässt sich natürlich auch der umgekehrte physikalische Effekt technisch anwenden.

Die Zeolithkugeln werden durch ein Ventil mit einem Behälter mit wenig Wasser getrennt. In dem Moment, wenn der Ventilhahn geöffnet wird gefriert das Wasser in Sekundenbruchteilen zu Eis. Begierig hat das Zeolith den Wasserdampf aufgesaugt und dem Wasser hierbei soviel Energie entzogen, dass es gefriert. Dieser Effekt wurde zur Entwicklung einer besonders energieeffizienten Wärmepumpe verwendet, die gleichzeitig auch kühlt.

Analog zum Gaswärmeerzeuger, mit dem Unterschied, dass die Gasflamme nicht direkt das Wasser erhitzt, sondern das hier ein Behälter mit Zeolith verwendet wird. Diese heißen Zeolithbehälter geben ihre Wärme dann an den Heizungskreislauf ab. Im gleichen Prozessablauf saugt zudem das strohtrockene Mineral begierig den Wasserdampf auf, der in einem Verdampfer bereitgehalten wird. Durch den Energieverlust gefriert das Wasser zu Eis, das nun zur Klimatisierung oder für den Kühlschrank genutzt werden kann. Die hierbei frei werdende Wärme fließt erneut in den Heizungskreis.

## 5.7 Anlagenvarianten (Hybridsysteme)

### 5.7.1 Wärmepumpe und Solarthermie

Mithilfe der Geo-Solarthermischen Systeme, die in den Erdwärmekreis mit eingebunden ist, wird die überschüssige Solarenergie im Untergrund gespeichert und somit die Wärmequellen-temperatur angehoben. Die Innovationen der Hybridsysteme binden die Solarthermie direkt in das Wärmepumpensystem ein, wobei die Strahlungsenergie je nach Temperatur-niveau direkt oder zur Anhebung der Wärmequellentemperatur der Wärmepumpe genutzt wird.

Da eine Nachfrage nach Wärmepumpen-Solarthermie-Hybridsysteme zu verzeichnen ist, werden von verschiedenen Herstellern unterschiedliche Systemlösungen mit Nutzung von niedrigen Kollektortemperaturen zur Quelltemperaturanhebung der Wärmepumpe angeboten.

Die Hybridsysteme mit hocheffizienter Wärmepumpe sind für Neubauten oder für gut gedämmte Bestandsgebäude einsetzbar. Erdwärme mit einer Solarthermieanlage zu kombinieren wobei die überschüssige Solarwärme den Untergrund regeneriert. Um den Temperaturhub der Wärmepumpe, d.h. die Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und Wärmesenke zu verringern und somit elektrische Antriebsenergie einzusparen. Da hier lediglich zwei völlig eigenständige Systeme miteinander kombiniert werden, handelt es sich



im eigentlichen Sinne nicht um eine Hybridtechnologie. Der Energieentzug aus dem Untergrund im Winter kann mit dem überschüssigen Solarenergieeintrag im Sommer kompensiert werden. Im Heizfall wird dann eine Energiesenke aufgebaut, die durch Einlagerung der Solarenergie wieder regeneriert wird.

**Tab. 5-10:** Wärmepumpen-Solarthermie-Hybridsysteme zum Einsatz in Neubauten

(Quelle: IB-THEISS, München)

| Hersteller  | technisches Prinzip  | WP-Leistung (kW) | Solarwärmenutzung   | Besonderheiten   |
|---|--|------------------|---|--|
| Roth-Werke GmbH, 35232 Dautphetal                 | »Solargeo« Energiesystem                                       | 9                | Sole/Wasser-Wärmepumpe »TerraCompact«, spez. Solarkollektor »Heliostar+«, spez. Erdkollektor, Fläche ca. 10 m <sup>2</sup> , Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung, 800 Liter-Schichtkombispeicher             | Das »Solargeo-Energiesystem« bietet den Vorteil, dass sich aufgrund der solaren Unterstützung und den kompakten »Heliostar+«-Solarkollektor die Anlageneffizienz erhöht. Einsatz in Neubauten und Bestandsbauten mit ausgewogenem Wärmedämmungsstandard.                 |
| Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig                | Sole/Wasser-Wärmepumpe   | 6                | Kollektorfläche ca. 12 m <sup>2</sup> , Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung,   | 650 bzw. 750 Liter Schichtkombispeicher mit Frischwasserstation, Solarthermiekreis in Wärmepumpe integriert. Option: Regeneration der Sole durch Solarkreis.   |
| Schüco International KG, Bielefeld                | Kombination Sole/Wasser-Wärmepumpe »HPSol 05« mit Solarthermie | 7                | Kollektorfläche ca. 10 m <sup>2</sup> , Solarvorrangschaltung über den solaren Energiegehalt des Kombispeichers. Der Solarregler regelt die solare Erdreichregeneration. Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung | Sole/Wasser-Wärmepumpe »HPSol«, ist auch in der Lage, die Temperatur des Erdreichs zu regenerieren. Mit dem Einsatz als Wärmequelle zur aktiven Solarthermie-Erdreich-Kopplung, lässt sich die Systemtechnologie deutlich effizienter gestalten. 750 Liter-Kombispeicher |
| Hinweis: technische Angaben der Produkthersteller |  |                  |   |  |

In der Praxis erweist sich eine Anbindung der Solarthermie über einen Speicher als eine einfache Möglichkeit einer Solarthermie-Wärmepumpenkombination, weil hier die Solarthermie und die Wärmepumpe unabhängig von einander arbeiten. Eine andere, jedoch kompliziertere Lösungsvariante besteht in der Kopplung des Solarthermiekreises mit einer hocheffizienten Wärmepumpe über einen Latent- oder Schichtenwärmespeicher. Da die Sonnenenergie in der Regel zur kompletten Deckung des Heiz- und Brauchwarmwasserbedarfs für ein Gebäude in monovalenter Betriebsweise nicht ausreicht, ist hier eine Kombination der Solarthermie mit einer weiteren Heizquelle vorteilhaft. Mithilfe einer hocheffizienten Wärmepumpe wird ein möglichst hoher Anteil der regenerativen Energie zur gebäudeinternen Wärme genutzt. Hierbei wird eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl mit einem entsprechend niedrigen elektrischen Strombedarf angestrebt. Voraussetzung ist jedoch, dass auch eine ganzjährig höher temperierte Wärmequelle zur Verfügung steht.

### **Systemhersteller Solarer Wärmepumpensysteme:**

#### *1. Westfa GmbH: »Therma-Exklusiv« Kombination der Solarthermie und Wasser/Wasser-Wärmepumpe*

Das neu entwickelte und patentierte Komplettsystem »Therma-Exklusiv« der Westfa GmbH verbindet für die Heizung und Warmwasserbereitung eine hocheffiziente Wärmepumpe mit der Solarthermie. Die Extrotherma-Wärmepumpen können mit Erdsonden, Erdkollektoren oder Außenluftmodulen als Wärmequelle arbeiten. Die Wärmepumpen mit Außenluftmodul lassen sich darüber hinaus bei sehr niedrigen Außentemperaturen zusätzlich mit einem kleinen Spitzenlasterd Kollektor kombinieren.

Mit der Kombination von Wärmepumpe und Hybridkollektor lassen sich hohe Solarerträge erzielen. Um auch bei niedrigen Außentemperaturen einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, arbeitet das »Therma-Exklusiv« mit zwei Speichern:

- Wenn die Sonne scheint, hält der Kombispeicher die Energie bzw. die für Heizung und Warmwasserbereitung erforderlichen Temperaturen bereit.
- Bei einer zu geringen Sonneneinstrahlung wird der Solarkreis durch einen 320 Liter fassenden Latentwärmespeicher geleitet, der auf Wasser-/Eisbasis arbeitet und der Wärmepumpe als Wärmequelle zur Verfügung steht.

Darüber hinaus nutzen die »WPK-Hybridröhrenkollektoren« zusätzlich die Enthalpie der Umgebungswärme als Energiequelle. Die so gewonnene Wärme wird ebenfalls durch den Solarthermiekreis zum Latentspeicher der Wärmepumpe geleitet.

Da in beiden Fällen der Solarkreis als Medium genutzt wird, wird die Wärme je nach Bedarf an den Kombispeicher oder an den Latentwärmespeicher abgegeben.

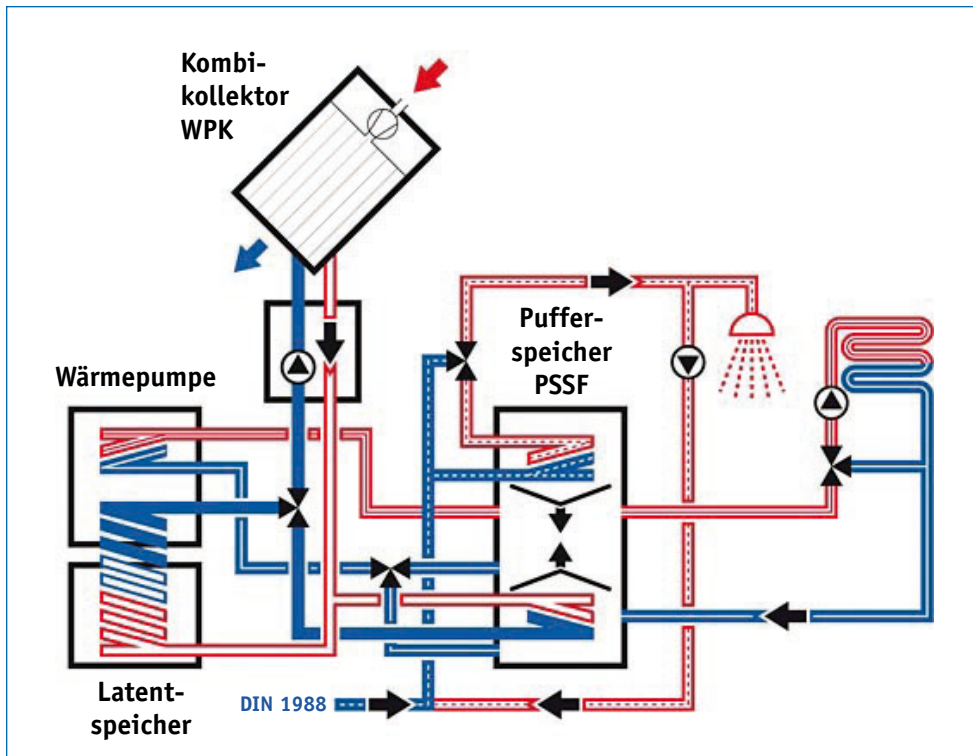


Abb. 5-11: Funktionsprinzip »Therma-Exklusiv« (Quelle: Westfa GmbH)

## 2. Ratiotherm: »OSKAR-MAX-SOL<sup>2</sup>«

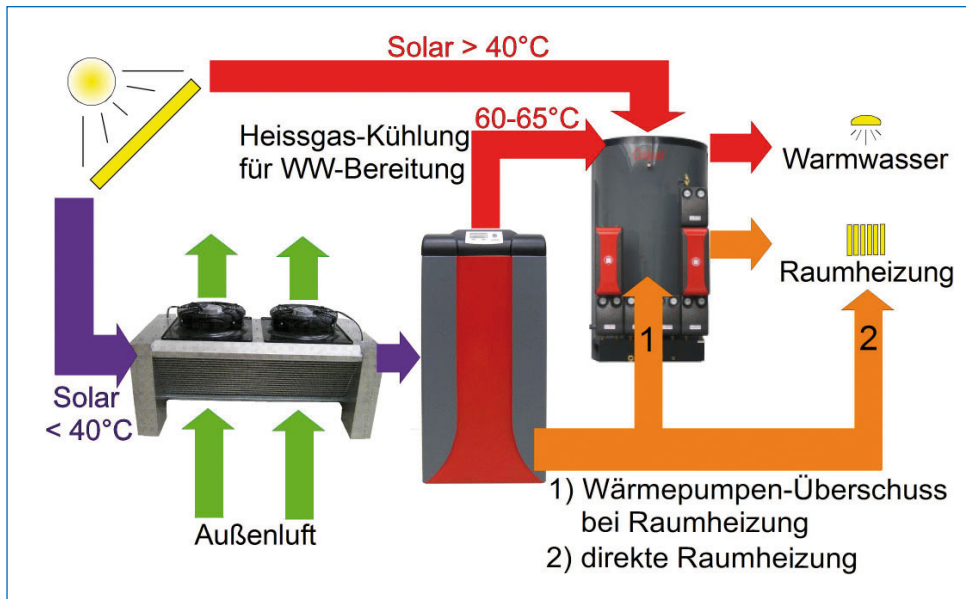
Bei der »OSKAR-MAX-SOL<sup>2</sup>« von Ratiotherm handelt es sich um ein Wärmepumpensystem mit hybrider Wärmequelle.

Die Luft-/Wasser-Wärmepumpe wurde mit einem speziell entwickelten Hybridverdampfer ausgerüstet. Das Außenteil dieser Hybrid-Wärmepumpenanlage kann die Solarenergie direkt auf den Kältekreis übertragen und somit die Wärmequellentemperatur anheben.

### Funktionsprinzip:

Nach den Herstellerangaben erlaube die Nutzung von Niedertemperaturwärme des konventionellen Solarthermiekreises von -5 bis 40 °C und erwirtschaftet in Verbindung mit einer entsprechenden Regelstrategie eine Steigerung des Kollektorertrages. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Sole und Umgebung steigt im Wärmepumpenbetrieb als Folge auch der Kollektorwirkungsgrad stark an.

Zudem werden die Solarerträge bei Kollektortemperaturen über 40 °C zur Direktbeladung des Schichtenspeichers bzw. des Heizsystems genutzt und infolge dessen auch höhere solare Deckungsraten erreicht.



**Abb. 5-12:** Funktionsprinzip der »Oskar-Max-SOL²« (Quelle: Ratiotherm)

### 3. Powertank GmbH, Sonneberg/Thüringen: WKS-PowerTank

Der Systemhersteller »Power Tank GmbH« in Sonneberg/Thüringen hat mit den neu konzipierten Kompressoren ein innovatives Energieumwandlungssystem entwickelt. Die Kombinationseinheit soll die Heizungsanlagen mit fossilen Brennstoffen und herkömmlicher Sole-/Wasserwärmepumpe ersetzen. Das Powertank-Energieumwandlungssystem kann optional auch mit einer Kühlfunktion ausgerüstet werden. Das WKS-Energiesystem besteht aus der Solarthermieanlage, Compressor Unit (Wärmepumpe), Kondensatorzellen mit Paraffin als Speichermedium, Verdampferzellen.

Die Produktlinie WKS (Wärme-Kälte-System) arbeitet nach dem Funktionsprinzip einer Wärmepumpe mit Direktverdampfung in Verbindung mit dem eingeführten Latentspeicher von Powertank sowie einer eingebundenen Solarthermieanlage. Die Latenzellen werden als Verflüssiger und die entstehende Kälte zur Klimatisierung genutzt. Das System kombiniert die Wärmepumpe, Latentspeicher und Solarthermie. Weil die Verdampferzellen durch den Wärmeentzug des Kompressors ständig gekühlt sind, arbeiten die Solarkollektoren mit einem optimalen Wirkungsgrad.

Die Solarthermieanlage stellt die Wärme für die Heizung und Brauchwasserbereitung sowie für die Direktverdampferzellen zur Verfügung. Als Wärmequelle für die Verdampferzellen kann außer der Solarthermie alternativ auch jede beliebige Wärmequelle bzw. Abwärmenutzung eingebunden werden. Zudem kann in der Kompakteinheit auch für einen autarken Betrieb zusätzlich um eine Photovoltaikanlage erweitert werden.



**Abb. 5-13:** WKS-Efficiency  
(Quelle: PowerTank)

#### *Funktionsprinzip:*

Das im Kompressor genutzte Kältemittel (spezielles Gas), wird nach dem Wärmepumpenprinzip verdichtet und zur Wärmeerzeugung als Heißgas direkt in die Latenzellen der Wärme- und Kältespeicherung eingespritzt (Prinzip der Direktverdampfung). Dieser Prozess wird zur Kälteerzeugung umgekehrt.

Innerhalb der Verdampferzellen wird das Kältemittel durch Wärmezufuhr verdampft und anschließend im Kompressor zu Heißgas umgewandelt. Insofern ist die Verdampferzelle die Wärmequelle für die Kompressoreinheit, d. h. für die Wärmepumpe. Die Solaranlage führt zudem die komprimierte Sonnenenergie in die Verdampferzellen und ermöglicht so eine weitere Wärmezufuhr für den Verdampfungsvorgang des Kältemittels. Insofern entzieht die Verdampferzelle nicht nur Wärme aus der Umgebung, sondern es wird zusätzlich noch Solarwärme direkt durch die doppelte Wärmeübertragung dem Verdampfungskreislauf zugeführt.

Innerhalb der Kondensatorzellen wird das Heißgas wieder verflüssigt, über das Expansionsventil entspannt und erneut dem Kreislauf zugeführt. Die Kondensatorzellen dienen zudem gleichzeitig als Latentspeicher zur Gebäudeheizung. In den Kondensatorzellen sind zwei Wärmeübertrager integriert, einer zur Umwandlung des Heißgases und der zweite zur Wärmeentnahme für das Heizsystem.

## 5.8 Förderungen und normative Rahmenbedingungen

Der effiziente Betrieb von Wärmepumpen wird auch bei der finanziellen Förderung immer wichtiger: Die BAFA hat seit 1. Juli 2008 die Anforderungen verschärft. Damit die finanziell geförderten Wärmepumpen tatsächlich effizient arbeiten, hat das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) jetzt nach einer Übergangsfrist die Förderbedingungen verschärft. Seit dem 1. Juli müssen neben dem Einbau eines Stromzählers für die Wärmepumpe und alle Zusatzaggregate auch alle durch die Wärmepumpe abgegebenen Wärmemengen gemessen werden können. Falls notwendig sind hierzu mehrere Wärmemengenzähler einzubauen. Die Zähler sind die Voraussetzung für die Überprüfung der Jahresarbeitszahl. Außerdem wurde die Berechnungsgrundlage der Jahresarbeitszahl (JAZ) geändert.

Nicht mehr nur der Heizungsbetrieb ist für die Ermittlung maßgeblich, sondern der Betrieb des Gesamtsystems inklusive Warmwasserbereitung. Um eine finanzielle Förderung zu erlangen, müssen Erdreich- und Wasserwärmepumpen im Gebäudebestand eine Jahresarbeitszahl von mindestens 3,7 aufweisen. Luftwärmepumpen benötigen eine Jahresarbeitszahl von 3,3. Dass dieses Ziel nicht einfach zu erreichen ist, haben zwei Feldtests in Baden-Württemberg 2007 und 2008 bei neuen Ein- und Zweifamilienhäusern gezeigt: Erdreich- und Wasserwärmepumpen kommen hier auf Durchschnittswerte zwischen 2,7 und 3,7, Luftwärmepumpen auf Durchschnittswerte von 2,5 bis 3,0.

Die Anträge auf eine Wärmepumpenförderung können in der Zeit von der Herstellung der Betriebsbereitschaft bis sechs Monate danach gestellt werden. Die beim Förderantrag nachzuweisende Jahresarbeitszahl berechnet der Fachunternehmer im Voraus. Das BAFA überprüft die Richtigkeit, indem sie stichprobenweise Antragsunterlagen auswertet und Untersuchungen vor Ort durchführen lässt. Die Anforderungen sollen sicherstellen, dass die geförderten Wärmepumpen auch tatsächlich einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Für besonders effiziente Wärmepumpen gibt es deshalb einen Bonus:

- Erreichen Wärmepumpen im Gebäudebestand eine Jahresarbeitszahl von mindestens 4,5, dann erhöhen sich die Fördersätze und Fördergrenzen um 50 %.
- Wenn die Gebäudeeigner gleichzeitig eine thermische Solaranlage integrieren, gibt es einen Kombinationsbonus in Höhe von 750 €.

Die Informationen zu Fördermitteln stellt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle zur Verfügung ([www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare\\_energien/waermepumpen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/waermepumpen/index.html)).

Da pro Jahr immer weniger neue Privathäuser errichtet werden, kann sich der Wärmepumpenmarkt nur weiterentwickeln, wenn hier auch ein neuer Weg beschritten wird. Hierzu bieten sich zwei Einsatzbereiche an. Einmal der umfangreiche Altbausektor mit 75 % sämtlicher Gebäude in Deutschland, die vor 1978 gebaut und etwa 85 % der gesamten Heizenergie in diesem Sektor verbrauchen. Zum anderen der große Bedarf für die Industriewärmepumpen mit mittleren und großen Leistungen, die in Produktionsbetrieben, Gewerbe sowie in mehrgeschossigen Wohngebäuden ideal zur Raumheizung und Warmwasserbereitung eingesetzt und im Sommer auch zum Kühlen genutzt werden können.

Untersuchungen an ausgeführten Beispielen verdeutlichen, dass primär im Altbau die Jahresarbeitszahl nicht die tatsächlichen Vorteile der Wärmepumpe im Vergleich zur Brennstoffheizung darstellt. Wichtiger ist die im Vergleich zur bisherigen Heizung erzielte absolute Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen.

Insofern bestätigt die Praxis, dass die Wärmepumpen im Altbau lediglich mit Jahresarbeitszahlen zwischen 2,5 und 3,0 erreichen. Im Vergleich zur konventionellen Gasheizung wird eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 bis 60 % erreicht.

### 5.8.1 Förderung für Wärmepumpen und RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) hat als Kreditbank des Bundes und der Länder ihre beiden wohnwirtschaftlichen Programme zur CO<sub>2</sub>-Einsparung in Wohngebäuden vereinheitlicht und zusätzlich die elektrische Gebäudewärmetechnik berücksichtigt. Die Darlehensstruktur und Laufzeitvarianten wurden anderen wohnwirtschaftlichen Programmen angepasst. Mit dem aus Eigenmitteln finanzierten KfW-Programm zur CO<sub>2</sub>-Minderung werden Maßnahmen an bestehenden und neuen Wohngebäuden zur Nutzung erneuerbarer Energien einschließlich der unmittelbar durch die Nutzung der Anlage veranlassten Maßnahmen gefördert. Hierzu zählen Wärmepumpen und Anlagen zur Wärmerückgewinnung. Neu ist, dass sämtliche Wärmepumpenanlagen und RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung als Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie (Umweltwärme) gleichberechtigt zu Brennwert- und Niedertemperaturwärmeerzeugern und KWK-Anlagen aufgenommen wurden.

### 5.8.2 Förderungen im Marktanreizprogramm

Seit 1. Januar 2008 gibt es neue Fördermöglichkeiten für den Einsatz von Wärmepumpen.

Die BAFA-Richtlinie enthält neben den neuen Förderungen, auch ein Kombinations- und Effizienzbonus. Für die Marktanreizprogramme wurden die bisherigen Zuschüsse verändert und die Förderfähigkeit für Wärmepumpen aufgenommen. Durch ein neues Bonussystem können deutlich höhere Förderbeträge bezogen werden.

Wenn der Gebäudeeigner z. B. Solarkollektoren in Verbindung mit Biomasse-Wärmeerzeuger oder eine Wärmepumpe oder Gas- bzw. Ölbrennwert-Wärmeerzeuger installieren lässt, erhält er einen zusätzlichen Kombinationsbonus. Für bestehende Gebäude, deren Transmissionswärmeverlust bestimmte Werte nicht überschreitet, kann zusätzlich ein Effizienzbonus geltend gemacht werden.

#### Basisförderungen

Die Basisförderungen umfassen nachfolgend aufgeführte Bereiche:

- Luft/Wasser-Wärmepumpen:  
bezogen auf die Wohnfläche bzw. beheizte auf die beheizte Nutzfläche beträgt die Förderung 5 €/m<sup>2</sup>,  
für EFH/ZFH maximal 850 €/Wohneinheit im Neubau bzw. 10 €/m<sup>2</sup>  
für EFH/ZFH maximal 1500 €/Wohneinheit im Bestand.



- Sole-/Wasser-oder Wasser/Wasserwärmepumpen:  
bezogen auf die Wohnfläche bzw. beheizte auf die beheizte Nutzfläche beträgt die Förderung 10 €/m<sup>2</sup>,  
für EFH/ZFH maximal 2000 €/Wohneinheit im Neubau bzw. 20 €/m<sup>2</sup>  
für EFH/ZFH maximal 3000 €/Wohneinheit im Bestand.

Als Förderungsvoraussetzung müssen nach der Richtlinie jeweils bestimmte technische Bedingungen erfüllt werden bei:

- Luft-/Wasserwärmepumpen muss die Jahresarbeitszahl im Neubau über 3,5 und im Bestand über 3,3 liegen.
- den anderen elektrischen Wärmepumpen muss eine Jahresarbeitszahl im Neubau von 4,0 und im Bestand von 3,7 erreicht werden.
- den Wärmepumpenanlagen ist der hydraulische Abgleich und der Einbau eines Strom- und Wärmemengenzählers verpflichtend.

*Förderungsbeispiel* für eine Wärmepumpe im Wohnungsbestand eines Einfamilienhauses mit einer Wohnfläche von 120 m<sup>2</sup>:

- Die Basisförderung beträgt beim Einsatz einer Sole-/Wasserwärmepumpe 2400 €
- Die Basisförderung beträgt beim Einsatz einer Luft/Wasserwärmepumpe 1200 €.

### Effizienzbonus

Der Effizienzbonus kann bei Systemen mit Wärmepumpen nicht in Anspruch genommen, sondern nur bei thermischen Solaranlagen und Holzheizungen beantragt werden.

Einerseits besteht jedoch beim Einsatz von Gasklimageräten die Rückerstattung der Mineralölsteuer. Andererseits zeigt sich ein weiterer Vorteil in der Klimatisierung mit Erdgas aufgrund der steuerlichen Gleichbehandlung mit den Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung. Insofern wird beim Einsatz von gasmotorischen Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen bei einem jährlichen Nutzungsgrad von mehr als 70 % die Mineralölsteuer zurückerstattet. Vor der Inbetriebnahme der Anlage ist dazu eine Erlaubnis vom zuständigen Hauptzollamt einzuholen, um dort später die Rückerstattung beantragen zu können.

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) hat als Kreditbank des Bundes und der Länder ihre beiden wohnwirtschaftlichen Programme zur CO<sub>2</sub>-Einsparung in Wohngebäuden vereinheitlicht und die elektrische Hauswärmetechnologie berücksichtigt. Die Darlehensstruktur und Laufzeitvarianten wurden anderen wohnwirtschaftlichen Programmen angepasst. Mit dem aus Eigenmitteln finanzierten KfW-Programm zur CO<sub>2</sub>-Minderung werden Maßnahmen an bestehenden und neuen Wohngebäuden zur Nutzung erneuerbare Energien einschließlich der unmittelbar durch die Nutzung der Anlage veranlassten Maßnahmen gefördert. Hierzu zählen Wärmepumpen und Anlagen zur Wärmerückgewinnung. Darüber hinaus wird die Errichtung von neuen Wohngebäuden gefördert, die nach der EnEV weniger als 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. 40 kWh/(m<sup>2</sup>a) Primärenergiebedarf aufweisen. Die Höchstförderung liegt bei 30.000 bzw. 50.000 € pro Wohneinheit. Die Kredite haben Laufzeiten zwischen 10 und 30 Jahren, werden zu 96 % ausgezahlt und sind zwei bis fünf Jahre tilgungsfrei. Das KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm fördert Maßnahmen zur Energieeinsparung im Gebäude-



bestand. Darunter fallen auch Heizungserneuerungen im Zusammenhang mit unterschiedlichen Dämmmaßnahmen.

Neu ist, dass alle Wärmepumpenanlagen und RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung als Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie (Umweltwärme) gleichberechtigt zu Brennwert- und Niedertemperaturwärmeerzeugern und KWK-Anlagen aufgenommen wurden.

## 5.9 Wirtschaftlichkeit

Durch den Einbau einer Wärmepumpe lassen sich die Energiekosten eines Haushaltes um bis zu 30 % senken. Eine Kilowattstunde Wärme kostet bei der Erzeugung über eine Wärmepumpe aufgrund des staatlich geförderten Sondertarifs derzeit 3 Cent, mit konventioneller Heiztechnik sind diese mindestens 6 Cent. Bei einem vierköpfigen Haushalt können, in Abhängigkeit von der Gebäudegröße und dem Heizverhalten, z. B. bei einem Verbrauch von ca. 20.000 kWh/a) um bis zu 1300 €/a eingespart werden.

Der Einsatz von monoenergetischen Luft-/Wasserwärmepumpe in Verbindung mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist in der Regel relativ preisgünstig. Bei einer monoenergetischen Betriebsweise wird die Wärmepumpe bei sehr tiefen Außentemperaturen durch die Zuschaltung eines elektrischen Heizstabes unterstützt. Dieser Heizstab übernimmt ca. 5 % der Jahresheizarbeit. Vor allem bei gut wärmedämmenden Häusern mit kleinem spezifischen Wärmebedarf sind die Systemlösungen, bestehend aus Wärmepumpe und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, eine preiswerte Alternative zu den Sole/Wasser-Wärmepumpen.

**Tab. 5-11:** BAFA-Förderungen für Wärmepumpen-Heizungsanlagen (Quelle: IB-THEISS, München)

| Bauart Energiequelle                  | Gebäudeart      | JAZ | Förderung                                  | Innovationsbonus   |
|---------------------------------------|-----------------|-----|--|--|
| Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen      | Neubau bis ZFH  | 4,0 | € 10,00/m <sup>2</sup> ; max. € 2000,--/WE | Bei einer nachgewiesenen JAZ von 4,7 können die Fördersätze um 50 % angehoben werden |
|                                       | Neubau ab MFH   | 4,0 | 10 % der Nettoinvestition                  |  |
|                                       | Bestand bis ZFH | 3,7 | € 20,00/m <sup>2</sup> ; max. € 3000,--/WE | Bei einer nachgewiesenen JAZ von 4,5 können die Fördersätze um 50 % angehoben werden |
|                                       | Bestand ab MFH  | 3,7 | 15 % der Nettoinvestition                  |  |
| Außenluft-geführte Wärmepumpenanlagen | Neubau bis ZFH  | 3,5 | € 5,00/m <sup>2</sup> ; max. € 850,--/WE   | Bei einer nachgewiesenen JAZ von 4,7 können die Fördersätze um 50 % angehoben werden |
|                                       | Neubau ab MFH   | 3,5 | 8 % der Nettoinvestition                   |  |
|                                       | Bestand bis ZFH | 3,3 | € 10,00/m <sup>2</sup> ; max. € 1500,--/WE | Bei einer nachgewiesenen JAZ von 4,5 können die Fördersätze um 50 % angehoben werden |
|                                       | Bestand ab MFH  | 3,3 | 10 % der Nettoinvestition                  |  |

Beim Einsatz von Abluft/Wasser-Wärmepumpe nimmt die Anlagenaufwandszahl mit steigendem Heizwärmebedarf zu. Dies liegt darin begründet, weil der Energieinhalt der Abluft-Wärmequelle von der Größe der Wohnung und nicht von ihrem spezifischen Heizwärmebedarf abhängt. Hierdurch wird die zur Nutzung durch die Wärmepumpe verfügbare Energie begrenzt. Mit wachsendem spezifischem Wärmebedarf des Gebäudes steigen daher der Anteil der elektrischen Direktheizung an der bereitgestellten Heizwärme und somit auch die Anlagenaufwandszahl. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Abluftwärmepumpen in ausreichend wärmedämmten Gebäuden sehr energieeffizient und bietet zudem wegen der geringen Investitionskosten und der einfachen Installation eine interessante Alternative zu den anderen Wärmeerzeugern.

Mit effizienten Anlagentechniken wie Wärmepumpen oder Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden erhebliche energetische Verbesserungen erreicht. Da lediglich der maximal zulässige Transmissionswärmebedarf einzuhalten ist, lässt sich beim Einsatz dieser Anlagentechniken die EnEV leicht erfüllen. Die günstigen Vermeidungskosten werden mit einer Elektrowärmepumpe erzielt. Sie zählt zu den wenigen Energiesparmaßnahmen, die sich nach heutigen Investitionskosten und Tarifen überhaupt rechnet. Selbst die kostenintensivste Wärmepumpenvariante, die Grundwasserwärmepumpe, ist immer noch deutlich günstiger als der Austausch von Fenstern oder die Wärmedämmung des Daches. Sie liegt in der gleichen Größenordnung wie eine Außenwanddämmung oder die photovoltaische Stromerzeugung nach dem Stromeinspeisegesetz. Wobei anzumerken ist, dass das technische Potenzial der verschiedenen Energiesparmaßnahmen sehr unterschiedlich ausfällt; Die Elektrowärmepumpe kann in jedem Neubau (oder Einfamilien- oder Mehrfamilienhaus) eingesetzt werden und eignet sich auch zur Nachrüstung vieler bestehender Heizungs-systeme.

Die EnEV beinhaltet zudem auch eine Nachrüstspflicht für den Gebäudebestand, wie sie in dieser Weise bislang nur aus der Heizungsanlagenverordnung bekannt war. So mussten Wärmeerzeuger, die vor dem 01.10.1978 eingebaut wurden, bis zum 31.12.2006 ausgetauscht werden, mit Ausnahme, dass es sich um Niedertemperatur- oder Brennwertwärmeerzeuger handelte. Diese Frist verlängerte sich um 2 Jahre, wenn nach dem 01.11.1996 der Brenner ausgetauscht worden ist. Für Gebäude mit nicht mehr als zwei Wohnungen ist jedoch keine umfassende Nachrüstverpflichtung vorgesehen.

Ebenso für den Altbaubestand stellt die Wärmepumpe eine praktikable Lösung da, den Anforderungen der EnEV gerecht zu werden. Besonders die Luft-/Wasserwärmepumpe bietet sich hier an, weil hier der bauliche Aufwand gering ist.

Die Wärmepumpe reduziert also nicht nur die jährlichen Energiekosten erheblich, sondern hilft zusätzlich beider Wärmedämmung Geld zu sparen. Mit der ausgereiften Wärmepumpentechnik sind die hohen Energieeinsparziele der EnEV bzw. der Bundesregierung zu erfüllen.

## Kostenvergleich

Neben den technischen Aspekten spielen auch wirtschaftliche Erwägungen bei der Auswahl des Heizungssystems und der Qualität der Gebäudehülle eine Rolle. Dabei sollte der Bau-

herr jedoch nicht nur auf die Investitionskosten achten, sondern auch die laufenden Kosten betrachten. So kann sich ein in der Anschaffung etwas teureres Heizsystem in kürzerer Zeit amortisieren, wenn es dafür deutlich weniger Energie benötigt. Gerade mit einer Wärmepumpe ist eine weitgehend von der Entwicklung des Öl- oder Gaspreises unabhängige Betriebsweise möglich. Im Hinblick auf die Umwelt und das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel liegen die Vorteile eindeutig auf Seiten der Wärmepumpe. Ebenso verhält es sich mit den jährlichen Energie- und Betriebskosten, da dreiviertel der erforderlichen Heizungsenergie aus der Umwelt stammen. Anders sieht es bei den Anschaffungskosten aus. Die Wärmepumpe allein ist noch kein vollwertiges Heizsystem. Es muss zusätzlich die Wärmequelle erschlossen werden. Dies wiederum ist mit baulichem Aufwand und Kosten verbunden. Um z. B. mit der Erdwärme heizen zu können, müssen Erdsonden gebohrt oder ein waagerechtes Rohrschlängensystem etwa 20 cm unter Frostgrenze im Garten verlegt werden. Damit Grundwasser genutzt werden kann, werden ein Förderbrunnen und ein Schluckbrunnen gebohrt. Trotz dieses Aufwands lohnt sich der Einsatz einer Wärmepumpe immer.

Sollen verschiedene Heizsysteme fair miteinander verglichen werden, darf nicht der Fehler gemacht werden, ausschließlich die Energiepreise von Öl, Gas oder Strom als Grundlage heranzuziehen. Dies führt zu verzerrten Ergebnissen. Es müssen alle anfallenden Kosten, also Verbrauchs-, Kapital- und Betriebskosten, berücksichtigt werden. Insgesamt kostet eine Wärmepumpenheizung nur etwas mehr wie ein konventionelles Heizsystem. Neben der Wärmequellenerschließung kann ein weiterer Grund für Mehrkosten in der komfortablen Fußbodenheizung liegen. Die niedrigeren Betriebs- und Energiekosten gleichen diese Mehrkosten jedoch innerhalb weniger Jahre aus.

Die Kosten für eine Wärmepumpenheizungsanlage variieren je nach Größe und Wärmebedarf des einzelnen Hauses sowie nach Art der gewählten Wärmequelle und der individuell verschiedenen Gegebenheiten. Zur Bereitstellung der Wärme für Heizung und Warmwasserebereitung durch eine Wärmepumpe sind 1 kWh elektrischer Strom mit 0,45 bis 0,75 Ct zu bezahlen, mit dem der Betreiber andererseits das Vierfache an Wärme erhält. Je nach Leistung kostet eine Wärmepumpe ca. zwischen 4500 und 7800 €.

Hinzu kommen die Kosten für einen Warmwasserspeicher, den Pufferspeicher sowie die Regelung und die Kosten für die Wärmequellenerschließung. Das heißt, der Gesamtpreis für eine Wärmepumpenheizungsanlage schwankt zwischen 8500 und 20.000 €. Allerdings entfallen Kosten wie z. B. für einen Schornstein oder einen Öltank. Eventuelle Fördermittel sind hierbei nicht berücksichtigt.

Die neue EnEV schafft optimale Voraussetzungen für den Einsatz einer Wärmepumpe, weil die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe gegenüber Öl- oder Gasheizungen mit sinkendem Heizenergiebedarf steigt.

Dass dies durchaus im Bereich des Möglichen liegt, zeigt auch die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie, die aus Gas Wärme und elektrische Energie gewinnt. Der Gasanschluss übernimmt die Stromversorgung und gleicht somit die Wirtschaftlichkeitsverluste wieder aus. Der Trend zur integrierten Gebäudetechnik wird also auch versorgungsseitig bereits vorgegeben. Um die Möglichkeit integrierter elektrischer Gebäudetechnikssysteme in die Entscheidungsphase zu bringen, spielen neben dem o. a. Zeitpunkt der Beratung natürlich auch die Inhalte eine Rolle.

## Jahreskosten

Für den Fall einer Bilanzierung der Jahreskosten genügt ein Ansatz über die Investitionskosten allein nicht, denn neben dem anfallenden Kapitaldienst müssen hier auch die Betriebs- und Verbrauchskosten berücksichtigt werden. Dennoch stellt sich auch bei den Jahreskosten der Einsatz einer Wärmepumpe bei Gebäuden mit dem Wärmedämmstandard nach WSchV 95 als günstige finanzielle Variante dar. Das Verhältnis des Investitionsaufwandes zur Primärenergieeinsparung ist nach der EnEV sowie zur allgemeinen Betriebskostensparnis sehr günstig.

Die elektrischen Systeme werden in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt in die Planungs- und Realisierungsphase aufgenommen. Andererseits ist der Beratungs- und Orientierungsbedarf beim Bauherrn jedoch ein halbes Jahr vor Baubeginn am größten. Hier werden bereits die Weichen für den Einsatz der späteren Systeme gestellt. Gerade beim Niedrigenergiehaus ist ein Systemwechsel in der Heizungstechnik durchaus realisierbar. Je günstiger das Verhältnis von Wärmeverlusten und Fremdwärmezufuhr in einem Gebäude wird und so die Leistung einer Heizungsanlage geringer ausfallen kann, desto mehr fallen Bereitstellungsaufwendungen ins Gewicht. So ist es auch vorstellbar, dass sich die Verlegung eines Gasanschlusses gar nicht mehr lohnt und auch die kleinste gas- bzw. ölgefeuerte Heizanlage überdimensioniert ist.



## 6.0 Glossar

### A

#### **Abwärme**

Umfasst alle ein System verlassenden, fühlbaren und latenten Wärmeströme, einschließlich der Verluste, mit Ausnahme der erzeugten Zielenergie. Soweit Abwärme nicht benutzt wird, geht sie an die Umgebung fort und wird dann Fortwärme genannt.

Thermische Energie, die am Ende eines Prozesses von einem System abgegeben wird, mit Ausnahme der Nutzwärme. Wird die Abwärme nicht noch genutzt, ist sie Fortwärme.

Der Begriff »Abwärme« umschreibt sämtliche ein System verlassender, fühlbarer und latenter Wärmeströme, einschließlich der Verluste, mit Ausnahme der erzeugten Zielenergie.

Wenn die Abwärme ungenutzt bleibt, geht sie in die Umgebung über und wird als Fortwärme bezeichnet.

#### **Adiabatisch**

(griech. a = nicht/diabaínein = hindurchgehen)

Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung.

#### **Adsorption**

(lat. adsorbere = ansaugen)

Aufnahme von Gasen oder Dämpfen an der Oberfläche von festen Körpern als Folge starker Oberflächenaktivität der Substanz bzw. großer Molekularkräfte.

#### **Anlagenstromkennzahl**

Der Quotient der elektrischen Leistung eines Heizkraftwerkes und der gleichzeitig abgegebenen Wärmeleistung.

#### **Arbeit**

Energie, die infolge der Wirkung einer Kraft auf eine bewegliche Systemgrenze dem System zu- oder aus ihm abgeführt wird. Die mechanische Arbeit ist das Produkt aus der Kraft und der gleichgerichteten Verschiebung ihres Angriffspunktes; sie ist eine (wegabhängige) Prozessgröße und hat keinen Einfluss auf die Entropie.

Energie zum Transport einer elektrischen Ladung im elektrischen Feld zwischen zwei Raumpunkten. Die elektrische Arbeit ist das Produkt aus der elektrischen Ladung und der Potenzialdifferenz (Spannung) der beiden Raumpunkte.

### B

#### **Betriebspunkt**

Nach DIN EN 14511 der Zustand der Wärmepumpe, bei dem die Leistungszahl gemessen wird. Bei einer Soletemperatur von 0 °C und Heizungsvorlauftemperatur von 35 °C wird der Betriebspunkt mit »B0/W35« definiert.

**Brennwert**

Der Brennwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, wenn es auch zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs. Siehe auch »Heizwert«.

**C****Contracting**

Vorfinanzierung einer Energiesparmaßnahme durch ein externes Unternehmen, das über das erforderliche Know-how verfügt. Der Eigentümer zahlt über einen gewissen Zeitraum eine Art Miete für diese Energieeinsparmaßnahme.

**COP-Wert (Coefficient of Performance)**

Der COP-Wert definiert den thermischen Wirkungsgrad von Wärmepumpen; gebräuchlich ist auch die Bezeichnung als Leistungszahl.

**D****DEC-Klimatechnik**

Abkürzung für »Desiccant and Evaporative Cooling«, engl. für »Kühlen durch Trocknung und Verdunstung« (solarer Absorptions-Kühlprozess).

**Diaphragma**

Poröse Trennwand zur Gastrennung bei der kalten Verbrennung innerhalb einer Brennstoffzelle.

**E****Endenergie**

Bezugsenergie, vermindert um den nicht energetischen Verbrauch und um die Umwandlungsverluste und den Eigenbedarf bei der Strom- und Gaseigenerzeugung beim Endverbraucher. Es handelt sich daher um die Energie, die vom Endverbraucher eingesetzt wird. Hierzu gehört in der Regel die meisten Sekundärenergien, wie Kohle-, Mineralöl- und Gasprodukte, Strom und Fernwärme, aber auch direkt nutzbare Primärenergie, wie z. B. Erdgas.

**Energiedienstleistung (energiebezogene Dienstleistung)**

Die durch Nutzenergie dem Endverbraucher zur Verfügung stehenden Dienstleistungen, wie z. B. warme oder kühle Räume; helle Straßen, Arbeitsplätze und Wohnräume; Kraftunterstützung in Produktion, Transport und Verkehr oder Kommunikation und Information.

### **Energieerhaltungssatz**

Physikalisches Gesetz, nach dem Energie weder hervorgebracht noch vernichtet, sondern nur von einer Erscheinungsform in eine andere umgewandelt werden kann.

### **Erdreichkolektor**

Kennzeichnung für ein Rohrnetz aus Kunststoffschläuchen, die als Wärmeübertrager (Erdregister, für den Entzug und die Nutzbarmachung von »kalter«, nur noch Anergie enthaltener Wärme aus dem Erdreich für den Wärmepumpenbetrieb in Tiefen von 0,80 m bis ca. 2,00 m verlegt werden.

### **Erdreichwärme**

Die in oberflächennahen Schichten der Erde enthaltene thermische Energie. Die geothermische Energie (Erdwärme) der oberen Bodenschichten bis etwa 100 m Tiefe ist in Oberflächennähe gespeicherte Sonnenenergie, in tieferen Schichten Wärmeenergie aus dem Erdinneren. Bis zu einer Tiefe von etwa 10 m unter Geländeoberkante ist die herrschende Temperatur vom Verlauf der Jahreszeiten geprägt. Ab ca. 15 m ist die Erdtemperatur über das Jahr hinweg nahezu konstant.

### **Erneuerbare Energie (Regenerative Energie)**

Energie (= Wärme, Kälte, Strom) aus Energieträgern, die sich ständig erneuern bzw. nachwachsen (Wind, Sonne, Wasser, Biomasse, Erdwärme).

Energie ist die Fähigkeit oder Möglichkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Gemessen wird Energie in der Einheit Joule (J) als Produkt von Zeit und Leistung. Ein Joule entspricht einer Wattsekunde (Ws). Physikalisch werden unterschiedliche Energieformen unterschieden:

- mechanische Energie (Bewegungs- oder kinetische Energie, potenzielle Energie der Lage)
- Wärmeenergie (thermische Energie)
- chemische Energie
- elektrische Energie
- Strahlungsenergie
- Kernenergie und Fusionsenergie.

## **F**

### **Feuerungsbetriebszeit**

Zeitspanne, in der die Feuerung während der Betriebsbereitschaftszeit in Betrieb ist, z. B. Brennerlaufzeit.

### **Fremdenergie (-aufwand)**

Zusatzenergie für die Hilfskomponente bzw. Nebenantriebe.



## G

### Gesamtwirkungsgrad

Verhältnis der in einem stationären Betriebszustand abgegebenen Nutzungsenergie zu der zugeführten Primärenergie.

### Gradtage

Die Gradtage bilden die Summe der täglichen Differenzen zwischen der mittleren Raumtemperatur ( $t_{i,m}$ ) 20 °C und dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur  $t_a$  über alle Heiztage.

### Gradtagszahl ( $G_t$ )

Die Gradtagszahl ( $G_t$ ) stellt den Zusammenhang dar zwischen der Außenlufttemperatur zur gewünschten Raumtemperatur. Wenn es beispielsweise draußen kalt und innen warm ist, dann erreicht die Gradtagszahl hohe Werte. Wenn es dagegen draußen fast so warm ist wie drinnen, dann ist die Gradtagszahl niedrig. Analog dazubildet die Gradtagszahl ( $G_t$ ) das Maß für den Wärmeverbrauch in der Heizperiode nach VDI 2067 als Produkt aus der Zahl der Heiztage und der Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur (20 °C fest angenommen) und der mittleren Außentemperatur. Die Gradtagszahl ist eine statistische Größe, das kleinste Messintervall wird aus Tagesmittelwerten gebildet. Sinnvoll in Monatsberichten.

Als physikalische Messgröße ist die Gradtagszahl ( $G_t$ ) das Produkt aus der Temperaturdifferenz ( $\Delta\delta$ ) und der Zeitdauer ( $\Delta t$ ) in der Integration der Wärmeflussgleichung.

Einheit: Kelvin Tage (Kd) mit 1 Kd = 24 Kh.

$$G_t = \sum_1^z (t_i - t_{am})$$

Hier bedeutet:

$G_t$ : Gradtagszahl

z: Anzahl Heiztage in der Heizperiode

$t_i$ : mittlere Raumtemperatur (20 °C)

$t_{am}$ : mittlere Außentemperatur eines Heiztages.

### Geo-Solarthermische Systeme

Mithilfe einer Solarthermieranlage, die in den Erdwärmekreis mit eingebunden ist, wird die überschüssige Solarenergie im Untergrund gespeichert und somit die Wärmequellentemperatur angehoben.

## H

### Heißwasser

Wärmeträger in flüssigem Zustand mit einer Temperatur über 100 °C.

### Heizgradtagzahl

Produkt aus sämtlichen Heiztagen eines definierten Zeitabschnitts, multipliziert mit der Differenz zwischen 20 °C Raumlufttemperatur und der mittleren Außenlufttemperatur. Auch als Gradtagzahl ( $G_t$ ) bezeichnet.

### **Heizgrenztemperatur**

Außenlufttemperatur, bei der unter normalen Verhältnissen im Wohngebäude aufgrund von internen Wärmequellen und evtl. passiv-solarer nicht mehr geheizt zu werden braucht.

### **Heizlast**

Auf den Wärmebedarf eines Gebäudes abgestimmte Nennwärmeleistung.

Die neue DIN EN 12831 führte 2004 für den »Wärmebedarf« den Begriff »Heizlast« ein. Auf diese Definition hat sich die europäische Fachwelt geeinigt, um das Verwechseln mit dem Heizwärmebedarf aus der EnEV zu vermeiden.

### **Heizperiode**

Zeitspanne, mit dem Beginn, wenn die Außenlufttemperatur  $t_a = 15\text{ °C}$  (Heizgrenztemperatur) im übergreifenden Fünftagesmittel unterschritten wird, und dem Ende, wenn die Außenlufttemperatur  $t_a = 15\text{ °C}$  im übergreifenden Fünftagesmittel wieder überschritten wird. Zeit der Beheizung eines Gebäudes, so lange die mittlere Außentemperatur kleiner ist, als die Heizgrenztemperaturen sind. Abhängig von meteorologischen Größen und von den thermischen Gebäudeeigenschaften.

### **Heiztag**

Entsprechend der Richtlinie VDI 2067 gelten hier als Heiztage sämtliche Tage mit einer Tagesmitteltemperatur unter  $t_a = 15\text{ °C}$ .

### **Heizwert**

Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs.

### **Hilfsenergie**

Energie (Strom), die nicht zur unmittelbaren Deckung des Heizenergiebedarfs bzw. zur Trinkwassererwärmung verwendet wird, beispielsweise für den Antrieb von Systemkomponenten, Umwälzpumpen, Regelungsaktoren, etc. sowie die elektrische Energie für die Rohrbegleitheizung bei der Trinkwassererwärmung.

### **Hybridnutzung**

(lat. hybrida = aus zwei Quellen schöpfend)

Doppelnutzung von einzelnen Solarkomponenten oder Solarsystemen, beispielsweise zur gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie in Hybridsystemen. Als Hybridnutzung wird auch die Speicherung von Wärme bei gleichzeitiger Nutzung von zwei Speichermodi, beispielsweise in Salzkeramik-Latentspeichern verstanden.

### **Hybridkollektor**

Ein kombinierter Flach- und Luftkollektor mit integrierten Kleinstventilator, der sowohl der Umgebungsluft Wärme entziehen und zugleich die Strahlungsenergie umwandeln kann. Dieser Kollektortyp dient als alleinige Wärmequelle der Wärmepumpe.

## Hybrid-Verdampfer

Auf Basis von Split-Verdampfern aufgebaute Außeneinheit, die mithilfe einer konventionellen Solarthermianlage die Quellentemperatur anhebt.

## I

### Innere Energie

Energiegehalt (thermische Energie) eines abgeschlossenen thermodynamischen Systems.

### Interner Wärmege Gewinn

Nutzbare Wärmegegewinne (Beleuchtung, Maschinen, Personen Prozesswärme etc.), die bei bestimmungsgemäßer Nutzung eines Gebäudes auftreten.

## J

### Jahresarbeitszahl

Verhältnis der jährlich abgegebenen Nutzwärme zur gesamten aufgenommenen elektrischen Jahresarbeit einschließlich der Hilfsenergie, d. h. inklusive den elektrischen Strom für die Sole- und Heizungspumpen. Dieser Zahlenwert entspricht insofern quasi dem Ergebnis einer Hochrechnung auf das gesamte Jahr auf der Basis der ermittelten Leistungszahlen. Je höher dieser Zahlenwert ist, umso mehr Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung lässt sich bei gleichem Stromverbrauch nutzen.

### Joule (J)

Internationale Maßeinheit für Energie; ersetzt die früher geläufige Einheit Kilokalorie (kcal); Umrechnung: 1 kJ = 0,239 kcal.

## K

### Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL)

Luftaustausch zwischen der (durch Feuchte und Schadstoffe belasteten) Raumluft und der Außenluft über eine mechanische Lüftung. Die Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL) wird als dezentrale (raumweise) oder zentrale Anlage errichtet und mit oder ohne Wärmerückgewinnungssysteme ausgerüstet.

### Kondensation

Phasenwechsel, bei dem ein Gas in einen flüssigen Zustand überführt wird.

Bei der Kondensation wird Wärme frei (latente Wärme). Die Wärmeabgabe erfolgt bei einer konstanten Temperatur.

**Kondenswasser**

Beim Betrieb von Wärmeerzeugern entsteht Kondenswasser, wenn der bei der Verbrennung gebildete Wasserdampf unter die Taupunkttemperatur abgekühlt wird.

**Konvektion**

(lat. con = mit / vehere = führen)

Die Konvektion bildet den Wärmetransportprozess, bei dem infolge eines Temperatur- und Dichteunterschiedes in Gasen oder Flüssigkeiten eine Strömung erzeugt wird. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Strömung eines Mediums, d. h. von Wärmeenergie in Flüssigkeiten und Gasen durch Teilchentransport. Die Konvektion erzeugt Energieverluste, hervorgerufen durch eine Temperaturdifferenz.

Der durch die Konvektion ausgelöste Wärmefluss ist (linear) proportional zur Temperaturdifferenz der betrachteten Volumina:

$$Q_{\text{konv}} = \text{const.} \cdot A \cdot (\delta_i - \delta_o)$$

Hier bedeuten:

const.: Wärmeübergangskoeffizient ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

A: Übertragungsfläche ( $\text{m}^2$ ).

**Konvektive Wärmeübertragung**

Durch Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeübertrager und der umgebenden, ruhenden Flüssigkeit, meist in Brauchwasserspeichern stattfindende, sog. »stille« Wärmeübertragung.

**Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)**

Der Begriff der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet Verfahren, bei denen eine Energieanlage aus den zugeführten Energien gleichzeitig mehrere Zielenergien, beispielsweise elektrischen Strom und Wärme, erzeugt. Aufgrund der gekoppelten Erzeugung, Wandlung oder Umformung dieser Zielenergien unterschiedlicher Wertigkeit können die Primärenergien eingespart und Schadstoffemissionen reduziert sowie Anlagenkosten gemindert werden.

**L****Latente Wärme**

(lat. latens = verborgen, im Verborgenen)

Während sensible Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung fühlbar ist, bleibt die latente Wärme des Phasenübergangs bei konstanten Temperaturen »im Verborgenen«.

**Leistung**

Stärke eines Energiestromes bei Umwandlungsvorgängen, d. h. das Verhältnis der umgewandelten Energiemenge zu der benötigten Zeitspanne. Der Quotient einer von einer Wärmepumpe gelieferten Nutzwärmeleistung und der dafür aufgewendeten elektrischen Leistung.

**Leistungszahl**

Das auf dem Prüfstand in einem bestimmten Betriebspunkt ermittelte Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung zu aufgenommener Antriebsleistung.

**Luftrate**

Luftvolumen, bezogen auf z. B. die Anzahl der Personen pro Zeiteinheit in  $\text{m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$ .

**M****Masse**

Eigenschaften eines Körpers, einer Änderung seines Bewegungszustands einen Widerstand entgegenzusetzen und einen anderen Körper durch Gravitationswirkung anzuziehen bzw. Von einem anderen Körper angezogen zu werden; allg. ein Stück Materie (lat. materia = Bauholz, Stoff), das seine Eigenschaften bei Bewegungen mitführt.

**Massenstrom**

Verhältnis der fortbewegten Masse zu der benötigten Zeitspanne.

**Membran**

In der PEMFC-Brennstoffzelle dient eine Membran aus Polymer-Kunststoff als Elektrolyt. Vergleichbar mit einem Filter lässt Membrane nur Protonen durch.

**Mindestluftrate**

Der auf eine Fläche oder auf eine Personenzahl bezogene Außenluftstrom, als Kenngröße zur Dimensionierung der raumlufttechnischen Anlagen.

**Mindestluftwechsel**

Aus physiologischen Gründen vorgeschriebener kleinster Luftwechsel.

**N****Nennleistung**

Die vom Hersteller festgelegte und im Dauerbetrieb unter Beachtung des vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrads als einhaltbar garantierte größte Wärmeleistung des Wärmeerzeugers in kW.

**Nennwärmeleistung**

Vom Hersteller des Geräts festgelegte Wärmeleistung im Dauerbetrieb. Nennwärmeleistung Höchste nutzbare Wärmemenge, die ein Wärmeerzeuger im Dauerbetrieb je Zeiteinheit abgeben kann. Sie ist wichtig für die Planung der Heizungsanlage und wird auf dem Typenschild des Gerätes in kW (Kilowatt) angegeben.

**Niedertemperaturheizflächen**

Die Niedertemperaturheizflächen werden mit Vorlauftemperaturen unter 55 °C betrieben. Durch das niedrigere Temperaturniveau treten bei der Verteilung der Wärme auch geringere Wärmeverluste auf. Um trotz der niedrigeren Vorlauftemperaturen die Räume ausreichend wärmen zu können, müssen jedoch großflächige Heizkörper, Fußboden- oder Wandheizungen installiert werden. Vorteil: Große Heizflächen sorgen zudem für ein angenehmeres Raumklima. Brennwert-Wärmeerzeuger erreichen mit Niedertemperatur-Heizflächen hohe Wirkungsgrade.

**Normvolumen**

Volumen eines Stoffs im Normzustand (Druck  $p_n = 1,01325 \text{ bar}$ , Temperatur  $t_n = 0 \text{ °C}$ ).

**Normwärmebedarf**

Unter vorgegebenen Extrembedingungen (Norm-Außentemperatur, Norm-Innentemperatur) zu erwartender Wärmebedarf.

**Nutzenergie**

Energie, die vom Verbraucher tatsächlich genutzt wird, d. h. beim Einsatz der Endenergie nach Abzug der Umwandlungsverluste. Nutzenergie sind z. B. Wärme, Licht, Kraft und Nutzenergie. Die Nutzenergie liegt in Deutschland derzeit bei 45 % der Endenergie und bei ca. 33 % der eingesetzten Primärenergie.

**Nutzfläche  $A_N$  (m<sup>2</sup>)**

Festgelegt nach EnEV:  $A_N = 0,32 V_e$ .

**Nutzungsgrad (Jahresnutzungsgrad)**

Der Nutzungsgrad beschreibt die energetische Situation – die für den Brennstoffverbrauch über ein Jahr entscheidende Größe – deutlich besser und kann als energetischer oder exergetischer Nutzungsgrad bestimmt werden. Im Gegensatz zum Wirkungsgrad wird beim Nutzungsgrad das Verhältnis (z. B. ein Jahr) betrachtet. Quotient der in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen Energie und der gesamten zugeführten Energie. Die betrachteten Zeiträume können Pausen-, Leerlauf-, Anfahr- und Abfahrzeiten mit einschließen. Auf Grund vieler Einflussfaktoren ist eine exakte Ermittlung des Jahresnutzungsgrad sehr schwierig (nur optimierte Annäherung).

**Normnutzungsgrad**

Im Gegensatz zum Wirkungsgrad wird beim Nutzungsgrad das Verhältnis von gewonnener zu aufgewendeter Energie über einen bestimmten Zeitraum, z. B. über ein Jahr betrachtet. Um verschiedene Kesseltypen vergleichen zu können, werden 5 typische Teillastwirkungsgrade ermittelt und daraus ein Mittelwert gebildet.

## Nutzungslast

Verhältnis der über eine bestimmte Zeitspanne, z. B. ein Jahr, abgegebenen Nutzenenergie zu dem Energieaufwand. Umkehrung: Bezogener Energieaufwand.

## O

### ORC-Anlagen

Es handelt sich um eine Turbine mit zwei Kreisläufen (Binärmachine). Die Turbine wird mit einem Arbeitsmittel angetrieben das bereits bei geringen Temperaturen verdampft. Über einen Wärmeübertrager nimmt dieses Arbeitsmittel thermische Energie z. B. aus dem Thermalwasser auf. Das Thermalwasser selbst gelangt dabei nicht in die Turbine.

### Oxidation

Chemischer Vorgang, bei dem Moleküle mit Sauerstoff eine chemische Reaktion eingehen, selbst zu anderen Molekülen umgewandelt werden und gleichzeitig Energie (z. B. Wärme) freisetzen. Alle Verbrennungen sind Oxidationsvorgänge.

## P

### Passive Nutzung der Sonnenenergie

Nutzung der auf Gebäude auftreffenden Sonnenstrahlung »passiv«, d. h. völlig ohne technische Hilfsmittel, wie Absorber, Kollektor oder Solarmodul. Erreicht wird dieses durch rein bauliche Maßnahmen (Solararchitektur), wobei große Glasflächen, beispielsweise ein Südfenster-Flächenanteil von bis zu 70 % oder ein Wintergarten, als Strahlungssammler wirken und die Gebäudemassen als Wärmespeicher dienen.

### pH-Wert

Das Maß der Säurehaltigkeit von Flüssigkeiten wird im Allgemeinen mit dem pH-Wert ausgedrückt. Neutralen Flüssigkeiten wie Wasser ist ein pH-Wert von 7 zugewiesen.

Stoffe mit niedrigerem pH-Wert werden als sauer, Stoffe mit höherem pH-Wert als basisch bezeichnet. Die Differenz des pH-Wertes um eine Einheit, entspricht einer Änderung des Säuregrades um den Faktor 10. Flüssigkeiten reagieren mit höher werdender Säurekonzentration und abnehmendem pH-Wert zunehmend ätzend. Starke Säuren können besonders unedlere Metalle unter Wasserstoffentwicklung auflösen sowie verschiedene andere Materialien zersetzen.

### Performance Ratio (Anlagennutzungsgrad)

Der Performance Ratio ist ein Maß für die Energieverluste, die im Vergleich zu optimalen Betriebsbedingungen der Anlage auftreten.

### Primärenergie

Als Primärenergie wird die Energie vor der ersten Umwandlungsstufe definiert. Bei den Rohstoffen, die zur Energiegewinnung verwendet werden, handelt es sich um Primärenergie-

träger die natürlich vorkommen, wie z. B. die fossilen Brennstoffe Stein- und Braunkohle, Erdgas und Erdöl, Ölschiefer, Teersande oder die Kernbrennstoffe Uran, Thorium sowie die regenerativen Energiequellen, wie z. B. Biomasse, Erdwärme, Sonnenenergie, Wasser und Windkraft.

### **Primärenergie-Aufwandszahl (Anlagen-Aufwandszahl) $e_p$**

Die Primärenergie-Aufwandszahl umschreibt den Energiestrom, der noch keine Umwandlung erfahren hat, z. B. chemischer oder nuklearer Brennstoffenergiestrom. Dementsprechend wird die benötigte Primärenergie über eine bestimmte Zeitspanne, z. B. über ein Jahr als Quotient aus Primärenergiebedarf zur Erzeugung von Heizwärme und Trinkwasser und Heizwärme- und Trinkwasserbedarf des Gebäudes definiert.

Mit der Aufwandszahl werden sämtliche Anlagenverluste für Trinkwassererwärmung, Heizungs- und Lüftungstechnik beschrieben. In der DIN V 4701-10 sind entsprechende Kennwerte für diverse Anlagensysteme hinterlegt.

### **Primärenergiefaktor**

Die Primärenergiefaktoren für die Energiebereitstellung enthalten sämtliche Faktoren der Primärenergieerzeugung mit den Vorketten für die Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, den Transport und die Verteilung der betrachteten Energieträger.

## **Q/R**

### **Reformer**

Der Reformer gehört zur Peripherie einer Brennstoffzelle. Er bildet das Zentrum der Brenngasaufbereitung. Hier wird mit katalytischen und thermischen Verfahren aus dem eingesetzten Brenngas (z. B. Erdgas) wasserstoffreiches Prozessgas erzeugt.

Teil der Peripherie von (Niedertemperatur-) Brennstoffzellen. Er bildet das Zentrum der Brenngasaufbereitung mittels katalytischer und thermischer Verfahren.

### **Regeln der Technik**

Technische Regeln für Entwurf und Ausführung, die in der Praxis als richtig und bewährt anerkannt sind (DIN-Normen, VDI-Regelwerke).

### **Regenerative Energie**

Energieträger und -formen, die sich ständig auf natürliche Weise erneuern.

### **Rechnerische Nutzungsdauer ( $T_N$ )**

Die rechnerische Nutzungsdauer stellt einen Erfahrungswert dar und beginnt mit der erstmaligen Inbetriebnahme der Anlage. Die tatsächliche Nutzungsdauer kann davon nach oben und unten abweichen. Die rechnerische Nutzungsdauer nach VDI 6025 ist beendet, wenn Reparaturen und Instandsetzung sowie die Kosten für die Erneuerung einzelner Anlagenteile einen so hohen Aufwand erfordern, dass er in keinem vertretbaren Verhältnis mehr zu einer Neuanschaffung steht.



## Ressourcen

Unter dem Begriff »Ressourcen« werden alle Bestände der Produktionsfaktoren Arbeit, Boden und Kapital verstanden, die bei der Produktion von Gütern eingesetzt werden können. Im engeren Sinne werden unter Ressourcen die Rohstoffe und Energieträger verstanden.

## S

### Solare Warmegewinne

Durch Sonnenstrahlung nutzbare Warmegewinne; neben internen Warmegewinnen Kenngröße zur Ermittlung des Jahres-Heizwärmeverbedarfs.

### Sole

Gemisch aus Glykol (Frostschutzmittel) und Wasser. Dieses Medium zirkuliert bei Sole-Wasser Wärmepumpen auf der Wärmequellenanlage (WQA), wenn das Erdreich als Wärmequelle erschlossen wird.

### Sommerlicher Wärmeschutz

Planerische und bauliche Maßnahmen zur Verringerung solarer Wärmeeinträge durch Fenster und andere transparente Bauteilflächen.

### Spitzenlastbrenner

Brennstoffzellen, die in der Hausenergieversorgung eingesetzt werden, decken in der Regel die Grundlast des Wärmeverbedarfs. Bei Bedarfsspitzen stellt ein konventionelles Zusatzheizgerät die erforderliche Wärme bereit (Brennstoffzellenheizgerät).

### Stirlingmotor

Der Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine zur Umsetzung von Wärme in mechanische Arbeit. Der Stirlingmotor ist ein Heißgasmotor, in dem ein Arbeitsgas (z. B. Helium, Luft, ...) in einem geschlossenen Arbeitsraum erwärmt wird, Volumenänderungsarbeit auf einen Arbeitskolben überträgt und in mechanische Arbeit umsetzt. Das Gas wird danach abgekühlt und wieder komprimiert. So entsteht ein Kreisprozess.

## T

### Taupunkt

Temperatur, bis zu der man feuchte Luft abkühlen muss, bis sie gesättigt ist. Unterhalb tritt Kondensation des Wasserdampfes ein.

Temperatur, bei der die relative Luftfeuchte ihren Sättigungsdampfdruck erreicht. Bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur Ausscheidung von Wasser (Taufwasser, Kondensatwasser).

**Teillast**

Das Verhältnis zwischen der Nutzleistung eines intermittierend oder eines mit einer Leistung unterhalb der Nennleistung gefahrenen Wärmeerzeugers und der Nennleistung in %.

**Transmissionswärmebedarf**

Wärmestrom, der aus einem Raum oder einem Gebäude unter bestimmten Bedingungen (Bauweise, Außen- und Innentemperaturen) durch Wärmeübertragung an die Umgebung abgegeben wird und wieder ersetzt werden muss. Der Transmissionswärmebedarf kann sich auf ein Bauteil oder durch Summierung auf den Raum oder das Gebäude beziehen und bildet so den durch den Wärmedurchgang der Wärme übertragenden Umfassungsfläche verursachte Anteil des Jahresheizwärmebedarfs.

**Transmissionswärmeverluste**

Der Wärmestrom durch die Außenbauteile je °K Temperaturdifferenz. Es gilt: Je kleiner der Wert, umso besser ist die Dämmwirkung der Gebäudehülle. Durch zusätzlichen Bezug auf die Wärme übertragende Umfassungsfläche liefert der Wert einen wichtigen Hinweis auf die Qualität des Wärmeschutzes. Ein Wärmestrom erfolgt auch aufgrund der Temperaturdifferenz, die eine Wärmepumpe zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der erforderlichen Temperatur der Nutzwärme (Wärmesenke) überwinden muss. Diese Temperatur muss in K (Kelvin) angegeben werden, wobei ein K einem Grad Celsius entspricht.

**U****U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ; alte Bezeichnung k-Wert)**

Der U-Wert eines Bauteils beschreibt dessen Wärmeverlust unter stationären, d. h. zeitlich unveränderlichen Randbedingungen. Die Wärmespeicherfähigkeit und somit die Masse des Bauteils geht nicht in den U-Wert ein. Außerdem beschreibt der U-Wert nur die Wärmeverluste infolge einer Temperaturdifferenz zwischen der Raum- und der Außenluft. Die auch während der Heizperiode auf Außenbauteile auftreffende Sonneneinstrahlung bleibt unberücksichtigt.

**V****Verbrennung**

Bei der Verbrennung wird die in den organischen (brennbaren) Bestandteilen des Brennstoffes gebundene chemische Energie durch Oxidation mit Sauerstoff in Wärme umgewandelt. Die anorganischen (nicht brennbaren) Bestandteile des Brennstoffes finden sich in Form von Asche wieder.

## W

### Wärme

Thermische Energie, die infolge einer Temperaturdifferenz die Grenze eines thermodynamischen Systems überschreitet. Der Prozess der Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr ist mit Änderungen der inneren Energie und der Entropie verbunden.

### Wärmebedarf

Summe aus dem Transmissionswärmebedarf und dem Lüftungwärmebedarf; die Wärmegewinne aus inneren und/oder äußeren Wärmequellen werden nicht angerechnet, mit Ausnahme des Gewinns aus der diffusen Himmelsstrahlung.

### Wärmebilanz

Summenbildung und Gegenüberstellung der in einem Prozess zugeführten (bzw. erzeugten) und abgeführten (bzw. verbrauchten) Wärmen.

### Wärmebrücke

Bauteil mit erhöhtem Wärmetransport nach außen. Bauteilfugen etwa zwischen Decke und Außenwand, Heizkörpernischen, etc.

### Wärmedämmverbundsystem

Außenseitige Dämmschicht mit einem Putz im Verbund. Dämmstoff z. B. aus Hartschaum, Faserdämmstoff, Kork, etc.

### Wärmedurchgang

Wärmeübertragung zwischen zwei Fluiden, die durch eine Wand (Heizfläche, Kühlfläche) voneinander getrennt sind. Der Wärmedurchgang setzt sich aus den Wärmeübergängen an den beiden Oberflächen der Trennwand und der Wärmeleitung innerhalb der Trennwand zusammen. Das Maß für den Wärmedurchgang ist der Wärmedurchgangskoeffizient.

### Wärmeinhalt der Luft

Der Wärmeinhalt der Luft ist gekennzeichnet durch die Temperatur und den Feuchtegehalt, fachtechnisch auch als Enthalpie mit kJ/kg definiert.

### Wärmekonvektion

(lat. *convehere* = mitfahren, mitführen). Transport bzw. Ausbreitung von Wärme durch Fluide in dem Grenzbereich zu den Oberflächen ruhender, angeströmter oder strömender Festkörper.

### Wärmerückgewinnung

Hiermit wird allgemein ein reiner Temperaturwirkungsgrad definiert, der aussagt, inwieweit die Außentemperatur durch den Luft-/Luftwärmeübertrager auf die Zulufttemperatur vorgewärmt wird. Hierbei wird die Ablufttemperatur auf die Fortlufttemperatur abgekühlt.

**Wärmerückgewinnungsgrad**

Maß für die Qualität der Rückgewinnung der verschiedenen Energieinhalte an Wärme und Feuchte.

**Wärmestrom**

Verhältnis der fortbewegten Wärmemenge in der benötigten Zeiteinheit.

**Wärmetransport**

Transport von Wärmeenergie durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Wärmeströmung (Konvektion) in Richtung des Temperaturgefälles.

**Wärmeübertrager**

Durch einen Wärmeübertrager – umgangssprachlich auch Wärmetauscher – kann ein Medium Wärme an ein anderes Medium übertragen. Bei einer (Biomasse-) Heizung wird die Wärme des Rauchgases z. B. im Wärmeübertrager an das Heizungswasser abgegeben und damit nutzbar gemacht.

## Z

**Zustandsgröße**

Wegunabhängige Größe, die den Zustand eines Systems beschreibt, z. B. mechanische Energie, innere Energie, Enthalpie. Die Zustandsgröße nimmt im gleichen Zustand des Systems immer wieder den gleichen Wert.



## 7.0 Literaturverzeichnis

### 7.1 Online-Berichte

1. Baunetzwissen-Infoline Haustechnik; Autor: Dipl.-Ing. Eric Theiß, München  
[http://www.baunetzwissen.de/index/Haustechnik\\_34472.html](http://www.baunetzwissen.de/index/Haustechnik_34472.html)  
BauNetz Online-Dienst GmbH & Co. KG  
DOCUgroup Company – Architekten Informationssystem (AIS), Berlin  
Schlüterstraße 42, 10707 Berlin  
[www.baunetzwissen.de](http://www.baunetzwissen.de)
2. Baunetzwissen-Infoline Heizung; Autor: Dipl.-Ing. Eric Theiß, München  
[http://www.baunetzwissen.de/index/Heizung\\_34478.html](http://www.baunetzwissen.de/index/Heizung_34478.html)

### 7.2 Fachbücher

Eric Theiß: »Regenerative Energietechnologien«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008; ISBN 978-3-8167-7514-0  
Eric Theiß: »Brennwerttechnik für den Praktiker«, Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, München 2001; ISBN 978-3-7905-0818-7

### 7.3 Fachartikel

Eric Theiß: Wärmeschutz der nächsten Generation »Vakuumdämmung«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 11/2008, Seite 4 bis 8  
Eric Theiß: »Hocheffiziente Erdwärme-Erschließung«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 02/2009, Seite 34 bis 37  
Eric Theiß: »Klein KWK-Module für flüssige Brennstoffe«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 03/2009, Seite 42 bis 47  
Eric Theiß: »Entwicklungsstand bei Brennstoffzellengeräten«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 06/2009, Seite 50 bis 53  
Eric Theiß: »Innovationen: Kleinst-KWK mit Mikrogasturbine«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 07/2009  
Eric Theiß: »Innovativer Stand der Hybridsysteme. Sole/Wasser-Wärmepumpen und Gas-Absorptionswärmepumpen für ganzjährigen Betrieb«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 08/2009, Seite 58 bis 61  
Eric Theiß: »Kleinst KWK für Biobrennstoffe (Hackschnitzel/Pellets/Stückholz)«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 01/2010  
Eric Theiß: »Energieeffiziente Solare Kühlung mittels Adsorptionstechnologie«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 01/2010  
Eric Theiß: »Energieeffiziente Wärme- und Kaltwasserversorgung durch innovative Anlagenhydraulik«; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 02/2010  
Eric Theiß: »Stirling-KWK-Wärme und Strom aus Holz«, Gentner-Verlag, Stuttgart, TGA-Fachplaner, Heft 09/2008, Seite 48 bis 50



## 8.0 Kontaktadressen (Weiterführende Weblinks)

### 8.1 Architekten

agn Niederberghaus & Partner GmbH  
Groner Allee 100, 49479 Ibbenbüren  
[www.agn.de](http://www.agn.de)

4a Architekten GmbH  
Hallstr. 25, 70376 Stuttgart  
[www.4a-architekten.de](http://www.4a-architekten.de)

Cavadini Architektur- und Planungs GmbH  
Gerhard-Koch-Str. 2, 73760 Ostfildern  
[www.cavadini.de](http://www.cavadini.de)

Conplaning GmbH  
Eberhardtstr. 60, 89073 Ulm  
[www.conplaning.ng.de](http://www.conplaning.ng.de)

Gatermann + Schossig  
Architekten-Generalplaner  
Richartzstr. 10, 50667 Köln  
[www.gatermann-schossig.de](http://www.gatermann-schossig.de)

Festo AG & Co. KG  
Ruiter Str. 82, 73734 Esslingen-Berkheim  
Tel. 0711/3473618 | [www.festo.com](http://www.festo.com)

Hascher Jehle und Assoziierte GmbH  
Kantstr. 17, 10623 Berlin  
[www.hascherjehle.de](http://www.hascherjehle.de)

Henn Architekten  
Augustenstr. 54, 80333 München  
[www.henn.com](http://www.henn.com)

Hofbauer GmbH  
Schanzenweg 27, 94469 Deggendorf  
Tel. 0991/37103-0 | [www.hofbauer-ib.de](http://www.hofbauer-ib.de)

Kampmann GmbH  
Friedrich-Ebert-Str. 128–130, 49811 Lingen/Ems  
Tel. 0591/7108-210



## 8.2 Institute

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.  
German Sustainable Building Council  
Kronprinzstr. 11, 70173 Stuttgart  
Tel. 0711/722322-0 | [www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)

Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL)  
Siegburger Str. 39, 53757 Sankt Augustin  
Tel. 02241/1605-0 | [www.ral-guete.de](http://www.ral-guete.de)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Burggrafenstr. 4–7, 10787 Berlin  
[www.din.de](http://www.din.de)

Beuth Verlag GmbH  
Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin  
[www.beuth.de](http://www.beuth.de)

BINE Informationsdienst  
Kaiserstr. 185–197, 53113 Bonn  
[www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info)

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)  
Frankfurter Str. 29–35, 65760 Eschborn  
Tel. 06196/908-0 | [www.bafa.de](http://www.bafa.de)

Bundesumweltministerium  
Referat-Öffentlichkeitsarbeit  
11055 Berlin  
Tel. 030/18305-0 | [www.bmu.de](http://www.bmu.de)

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
Referat-Öffentlichkeitsarbeit (Förderdatenbank)  
Scharnhorststr. 34–37; 10115 Berlin  
[www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)

Bundeamts für Energie (BFE): Chemische Energiespeicherung  
BFE-Energieforschung  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen  
Tel. 031/3225611 | [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV)  
Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart  
[www.dkv.org](http://www.dkv.org)

EMPA Forschungsinstitution im ETH-Bereich  
Materials Science & Technology (Chemische Energiespeicherung)  
Ueberlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf  
Tel. 0041 44/823 45 92 | [www.empa.ch](http://www.empa.ch)

Institut für Energiewirtschaft & Rationelle Energieanwendung (IER)  
der Universität Stuttgart  
Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart  
Tel. 0711/685-0 | [www.uni-stuttgart.de](http://www.uni-stuttgart.de)

Kreditanstalt für Wiederaufbau  
60325 Frankfurt/Main  
[www.kfw.de](http://www.kfw.de)

DVGW Deutsche Vereinigung der Gas- und Wasserfaches e. V.  
Technisch-wissenschaftlicher Verein  
Postfach 140362, 53058 Bonn  
[www.dvgw.de](http://www.dvgw.de)

Umweltbundesamt der Bundesrepublik Deutschland  
14191 Berlin  
[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

ZAE Bayern  
Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)  
Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien  
Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching  
Tel. 089/329442-0 | [www.zae-bayern.de](http://www.zae-bayern.de)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
Industriestr. 6, 70565 Stuttgart  
Tel. 0711/7870-233 | [www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)

## 8.3 Vereine/Verbände

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE)  
Stauffenbergstraße 24, 10785 Berlin  
Tel. 030/23005092 | [www.asue.de](http://www.asue.de)

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V. (B.KWK)  
Markgrafenstr. 56, 10117 Berlin  
Tel. 030/27019281-0 | [www.bkwk.de](http://www.bkwk.de)

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)  
Chausseestr. 128 a, 10115 Berlin  
[www.deutsche-energie-agentur.de](http://www.deutsche-energie-agentur.de)  
[www.dena.de](http://www.dena.de) | [www.thema-energie.de](http://www.thema-energie.de)

Deutscher Fachverband Solarenergie e. V.  
Bertholdstr. 45, 79098 Freiburg  
[www.dfs.de](http://www.dfs.de)

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V.  
Emmy-Noether-Str. 2, 80992 München  
[www.dgs.de](http://www.dgs.de)

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e. V. (FNR)  
Hofplatz 1, 18276 Gülzow  
Tel. 03843/6930-0 | [www.fnr.de](http://www.fnr.de)

Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. (HEA)  
Reinhardtstr. 32, 10117 Berlin  
Tel. 030/300199-0 | [www.hea.de](http://www.hea.de)

Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (FLiB)  
Gottschalkstr. 28 a, 34127 Kassel  
Tel. 0561/4006825 | [www.flib.de](http://www.flib.de)

GRE-Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e. V.  
Gottschalkstr. 28 a, 34127 Kassel  
Tel. 01805/341273 | [www.gre-online.de](http://www.gre-online.de)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI)  
Postfach 101139, 40002 Düsseldorf  
[www.vdi.de](http://www.vdi.de)

## 8.4 Produkt- und Systemhersteller

Baxi-Innotech  
IMA-Institut  
Hagedornstr. 18, 20149 Hamburg  
[www.ima-gination.de](http://www.ima-gination.de)

E-quad Power Systems GmbH  
Kaiserstr. 100, 52134 Herzogenrath  
[www.microturbine.de](http://www.microturbine.de)

GIESE Energie- und Regeltechnik GmbH  
Huchenstr. 3, 82178 Puchheim  
Tel. 089/800653-0

Hexis AG  
Business Development  
Zum Park 5, CH-8404 Winterthur  
[www.hexis.com](http://www.hexis.com)

KW Energie Technik e. K.  
Neumarkter Str. 157, 92342 Freystadt/Rettelloh  
[www.kw-energietechnik.de](http://www.kw-energietechnik.de)

KWB-Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH  
Industriestr. 235, A-8321 St. Margarethen/Raab  
[www.kwb.at](http://www.kwb.at)

Marewa Holzfeuerungsanlagen Gesellschaft mbH  
Neulandstr. 30, A-6971 Hard/Bodensee  
Tel. 0043 5574/74 301-0 | [www.mawera.com](http://www.mawera.com)

MTU Onsite Energy GmbH  
Fuel Cell Systems  
81663 München-Ottobrunn  
[www.mtu-online.com](http://www.mtu-online.com)

PowerPlusTechnolgies GmbH  
Fasaneninsel 20, 07548 Gera  
Tel. 0365/830403-00 | [www.ecopower.de](http://www.ecopower.de)

PowerTank GmbH  
Am Lindenbach 4, 96515 Sonneberg  
Tel. 03675/406680 | [www.powertank.de](http://www.powertank.de)

ratiotherm  
Heizung + Solartechnik GmbH & Co. KG  
Wellheimer Strasse 34, 91795 Dollnstein  
[www.ratiotherm.de](http://www.ratiotherm.de)

SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH  
Carl-Zeiss-Str. 18, 97424 Schweinfurt  
[www.senertec.de](http://www.senertec.de)

Solar-Consulting  
Agentur für nachhaltige Kommunikation  
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg  
[www.solar-consulting.de](http://www.solar-consulting.de)

Stirling Systems GmbH  
Stuttgarter Str. 41, 71050 Sindelfingen  
[www.stirling-engine.de](http://www.stirling-engine.de)

Stirling Danmarks ApS  
Diplomvej DTU, Building 373 South, DK-2800 Lyngby  
Tel. 0045 4526/9377 | [www.stirling.dk](http://www.stirling.dk)

Stirling Power Module Energieumwandlungs GmbH  
Schönbacher Str. 7, A-8052 Graz-Nikolaus  
[www.stirlingpowermodule.com](http://www.stirlingpowermodule.com)

Sunmachine Vertriebsgesellschaft mbH  
Am Riedbach 1, 87499 Wildpoldsried  
[www.sunmachine.com](http://www.sunmachine.com)

Turbec-Ensolar GmbH  
Laufferweg 11, CH-8006 Zürich  
Tel. 0041 44/3634539 | [www.turbec.com](http://www.turbec.com)

Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG  
42859 Remscheid  
[www.vaillant.com](http://www.vaillant.com)

Viessmann Werke GmbH & Co. KG  
Viessmannstr. 1, 35107 Allendorf  
[www.viessmann.com](http://www.viessmann.com)

Westfa GmbH  
Feldmühlenstr. 19, 58099 Hagen  
Tel. 01801/471147 | [www.westfa.de](http://www.westfa.de)

Zortea  
Rudolf-von-Ems-Str. 32, A-6845 Hohenems  
Tel. 0043 5576/72056 | [www.zortea.at](http://www.zortea.at)

## 8.5 Sonstige Informationsquellen und Weblinks

BauNetz Online-Dienst GmbH & Co. KG  
Schlüterstr. 42, 10707 Berlin  
[www.baunetz.de](http://www.baunetz.de)

Deutsche Energie Agentur  
[www.deutsche-energie-agentur.de](http://www.deutsche-energie-agentur.de)

Eric TheiB

# Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik

## Energieeffiziente Systemtechnologien der Kraft- und Wärmetechnik

### Anlagenkonzepte, Anwendungen und Praxistipps

Aufgrund der steigenden Energiepreise und knapper werdenden Ressourcen, müssen bestehende, energieintensive Systeme überdacht und innovative Lösungsansätze entwickelt werden.

Der Autor beschreibt neue Nutzungsmöglichkeiten der rationellen Energieanwendungen und Forschungsergebnisse bei Neu- und Altbauten. Für jede Technologie, wie Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft, Solarthermie oder Wärmepumpe, werden die entsprechenden Regelwerke, Verordnungen und Richtlinien genannt. Zur Vertiefung finden sich Beispiele, Anlagenbeschreibungen und eine Auflistung von Referenzprojekten. Ein Vergleich von Zusatznutzen mit den finanziellen Möglichkeiten des Förderungs-, Steuer- und Marktanzreizprogramms rundet das Buch ab und macht es so zum idealen Ratgeber für Ingenieure, Architekten und Bauherren.

#### Der Autor:

Dipl.-Ing. Eric TheiB war von 1970 bis 1981 als Gruppen- und Projektleiter für die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) mit Schwerpunkt in der Planung und Ausführung von HKL-Anlagen für Instituts-, Krankenhaus-, Kliniken-, Verwaltungs- und Industriebauten in zwei Großunternehmen tätig; ab 1981 Ingenieurbüro in München für die Technische Gebäudeausrüstung der Gewerke HKLS sowie für Elektro- und Beleuchtungstechnik im Bereich von Wohnanlagen, Einkaufs-, Sportzentren und Kraftwerksbauten mit Schwerpunkt regenerative Energietechnologien und Umsetzung der rationellen Technologien; ab 2003 Lehrbeauftragter für HKL sowie Sachverständiger für RLT-Klima-Kälteanlagen.

ISBN 978-3-8167-8269-8

