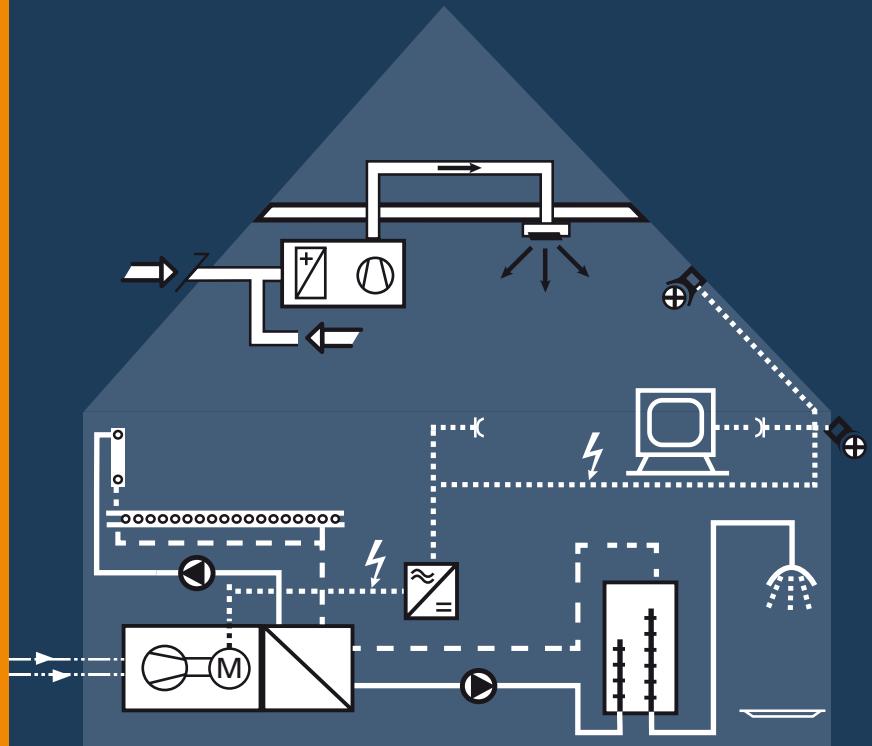


Eric Theiß

# Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik

Energieeffiziente Systemtechnologien  
der Raumluft-, Klima-, Kälte- und  
Beleuchtungstechnik

Anlagenkonzepte, Anwendungen und Praxistipps



Fraunhofer IRB ■ Verlag

Eric Theiß

## Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik



Eric Theiß

# **Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik**

Energieeffiziente Systemtechnologien  
der Raumluft-, Klima-, Kälte- und Beleuchtungstechnik

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.dnb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8529-3

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8696-2

Herstellung: Tim Oliver Pohl

Layout: Dietmar Zimmermann

Umschlagkonzeption: Elisabeth Theiß

Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.

Druck: Gulde Druck GmbH & Co. KG, Tübingen

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 dürfen.

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

Nobelstr. 12, 70569 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 Energieressourcen 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 der knapper werdenden Rohstoffe 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 2 der Rationellen Energieanwendungen in der Gebäudetechnik befasst sich mit der Energieeinsparung und der Steigerung des Nutzerkomforts in der Raumluft-, Klima-, Kälte- und Beleuchtungstechnik.

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 Energiepflählen 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 rationalen 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

Der Autor

# 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	Energieeffizienz: Energieprofil von Gebäuden	14
1.1.4	Energieeinsparverordnung (EnEV)	15
1.1.4.1	Neuerungen in der EnEV 2007	16
1.1.4.2	Neuerungen in der EnEV 2009	16
1.1.5	Blower-Door-Luftdichtigkeit	17
1.1.5.1	Thermografie	22
1.1.5.2	Lüftungswärmebedarf ( $Q_L$ )	23
1.1.6	Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs)	23
1.1.6.1	Nutzungskosten	25
1.1.6.2	Ver- und Entsorgungskosten	25
1.1.6.3	Reinigung, Wartung, Instandsetzung	25
1.1.6.4	Veränderte Randbedingungen	25
1.1.6.5	Objektbeispiel	26
1.2	Maßnahmen zur Energieeinsparung	26
1.2.1	Energieoptimierte Gebäudehülle	27
1.2.1.1	Energieoptimiertes Bauen (EnOB)	28
1.2.1.2	Solararchitektur	28
1.2.1.3	Green-Building-Gebäude	28
1.2.1.4	LowEx-Gebäude	29
1.2.2	Bauphysik	30
1.2.2.1	Wärmeschutz und Energieeinsparung nach DIN 4108	30
1.2.2.2	Innovative Wärmedämmungen	31
1.2.2.3	Thermochemische Speicherung durch Phase Change Material (PCM)	31
1.2.3	Passive Sonnenutzung	35
1.2.3.1	Nutzung der Sonnenenergie ohne technische Umwandlungsprozesse	36
1.2.4	Bauteilaktivierung	37
1.2.4.1	Aktivierbare Speichermasse	37
1.2.4.2	Hybridsysteme	40
1.2.4.3	LowEx-TGA-Systeme	40
1.2.4.4	Nachtlüftung (Gebäudenachtauskühlung)	40
1.2.4.5	Referenzprojekt	42
1.2.5	Energieeffiziente Gebäudeautomatisation	42
1.2.5.1	Vier Effizienzklassen der Gebäudeautomationssysteme	43
1.2.5.2	Die »Weltnorm« DIN EN ISO 16484	44
1.2.5.3	Gebäudeautomation und Feldbustechnologie	46
1.2.5.4	Normierte Standardbussysteme	49
1.3	Contracting	50

1.3.1	Contractinggesellschaftsform	51
1.3.2	Energiesparcontracting (Performancecontracting)	53
1.3.3	Wärmecontracting ohne Eigenkapital	53
1.3.4	Anlagencontracting	54
1.3.5	Betriebsführungs- und/oder Instandhaltungscontracting	54
1.3.6	Referenzprojekte	55
1.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	55
<b>2.0</b>	<b>Regelwerke</b>	<b>59</b>
2.1	Begriffsbestimmungen, Definitionen	59
2.1.1	Normen und Richtlinien in der Europäischen Gemeinschaft	59
2.1.2	Nationales Recht (Bundesrecht)	59
2.1.3	Landesrecht	59
2.2	Regelwerksystematik	60
2.2.1	Normenkenntnis als Notwendigkeit	60
2.2.2	Entstehung der Normen	60
2.2.3	Die Bedeutung des Farbdrucks bei der Normung	61
2.2.4	Gesetzeslage der Normung	61
2.2.4.1	Anerkannte Regel der Technik	62
2.2.4.2	Stand der Technik	62
2.2.4.3	Stand der Wissenschaft und Technik	63
2.2.4.4	Einhaltung der Normen und Vorschriften	63
2.3	Richtlinien und Verordnungen	64
2.3.1	VDI-Richtlinien (Technische Regeln)	64
2.3.2	VDE-Bestimmungen	64
2.3.3	VdS-Richtlinien	64
2.3.4	Sonstige Richtlinien und Merkblätter	65
2.4	Verzeichnis der Normen in Kapitel 1.0 bis 4.0	65
2.5	Verzeichnis der Richtlinien und Verordnungen in Kapitel 1.0 bis 4.0	70
<b>3.0</b>	<b>Energetische Potenziale in der Raumluft, Klima- und Kältetechnik</b>	<b>75</b>
3.1	Grundlagen	75
3.1.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	76
3.1.1.1	Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen nach DIN V 18599-2	76
3.1.1.2	Energetische Bilanzierung von RLT-Klima-Kälteanlagen nach DIN V 18599-3	76
3.1.1.3	Variationen zur Berechnung des Energiebedarfs von RLT-Anlagen	77
3.1.1.4	Energieeinsparpotenzial durch die Anlagenkomponenten	80
3.2	Optimierungsproblematiken	89
3.2.1	RLT-Anlagenoptimierung	89
3.2.1.1	Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs)	89
3.2.1.2	Ventilatorregelung	92
3.2.1.3	Variable-Volumen-System (VVS-System)	93
3.2.1.4	Objektbeispiel und Referenzprojekte	94

3.2.1.5 Energieeinsparpotenzial durch Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR)	96
3.2.1.6 Gebäudeleittechnik (GLT)	99
3.3 Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL)	100
3.3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen	103
3.3.2 Systemlösungen	104
3.3.2.1 Ventilatorsteuerungen	104
3.3.3 Effizienz der kontrollierten Wohnraumlüftung	105
3.3.3.1 Erforderliche Luftwechselrate	106
3.3.3.2 Luftwechselrate nach der EnEV	109
3.3.3.3 Wohnungslüftung im Niedrigenergiehaus	110
3.3.3.4 Wohnungslüftung im Passivhaus	111
3.3.4 Förderungen	111
3.3.5 Wirtschaftlichkeit	112
3.4 Wärme- und Kälterückgewinnungssysteme	112
3.4.1 Grundlagen	112
3.4.1.1 Wärme- und Kälterückgewinnung durch Nutzung von thermischer Energie aus Abwärme	113
3.4.1.2 Wärme- und Kälterückgewinnung durch regenerative und rekuperative Wärmerückgewinnungssysteme	115
3.4.2 Systemvarianten	115
3.4.2.1 Direkte Umluftbeimischung	115
3.4.2.2 Regenerative Wärmerückgewinnungssysteme	116
3.4.2.3 Rekuperative Wärmerückgewinnungssysteme	117
3.4.2.4 Kreislaufverbund (KV-)Wärmerückgewinnungssysteme	121
3.4.2.5 Wechselspeicher-Umschaltregeneratoren	122
3.4.2.6 Doppel-Rekuperative-Wärmerückgewinnung mit adiabatischer Kühlung	125
3.4.2.7 Luftkanal-Erdwärmeübertrager (L-EWÜ)	125
3.4.2.8 Sonstige Wärmerückgewinnungssysteme	128
3.4.3 Förderungen	129
3.5 RLT-Innovationen	130
3.5.1 Fassadengeräte LTG Typ FVM oder TROX-FRL	130
3.5.2 VRV/VRF-Systeme	134
3.5.2.1 VRV: Variable Refrigerant Volume (variables Kältemittelvolumen)	134
3.5.2.2 VRV-Invertersystem mit Wärmerückgewinnung	135
3.5.2.3 Kältemittelbasierte Systeme (VRF-Technologie)	136
3.5.3 Hybride Raumlufttechnik	137
3.5.4 OxyCell-Technology	138
3.5.5 Kombinationssystem: 3 HX-Kälte-Wärmepumpenanlage	141
3.6 Solare Klimatisierung	143
3.6.1 Grundlagen	143
3.6.1.1 Solare Kälteerzeugung (Solar Cooling)	143
3.6.2 Solare Kühlung mit geschlossenen Systemen	147
3.6.2.1 Absorptionstechnologie	147

3.6.2.2	Adsorptionstechnologie	151
3.6.3	Solare Kühlung mit offenen Systemen	155
3.6.3.1	Sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) oder Desiccative and Evaporative Cooling (DEC)	155
3.6.3.2	Sorptions- und Solargestützte Klimaanlagen (SSGK)	160
3.6.3.3	Sorptionsgestützte Klimatisierung mit flüssigen Sorptionsmitteln	161
3.6.4	Referenzprojekte mit offenen Solarkühlsystemen	162
3.6.5	Innovationen in der Solar-KlimaKälte-Technologie	164
3.6.5.1	Kälteerzeugung mit thermomechanischen Systemen	166
3.6.5.2	Langzeitspeicher (thermochemischer Speicher)	166
3.6.5.3	Kleinst-Solarkälteerzeugungsaggregate	167
3.6.6	Förderung und normative Rahmenbedingungen	170
3.6.7	Wirtschaftlichkeit	171
3.7	Eisspeicheranlagen	172
3.7.1	Grundlagen	172
3.7.2	Eisspeichersystemvarianten	176
3.7.2.1	Direkte Systeme	176
3.7.2.2	Eisspeicher als Indirektkühlsysteme (wechselnder, äußerer Übergang)	178
3.7.2.3	Hybrideisspeicher	179
3.7.2.4	Binäreis-System	179
3.7.3	Referenzprojekte	180
3.7.4	Wirtschaftlichkeit	180
<b>4.0</b>	<b>Beleuchtungstechnik</b>	<b>181</b>
4.1	Grundlagen	181
4.1.1	Energetische Anforderungen an die Beleuchtung	183
4.2	Energieeinsparung in der Beleuchtungstechnik	186
4.2.1	Energetische Leuchten- und Lampentechnologie	186
4.2.1.1	Auswahlkriterien für Leuchten	187
4.2.1.2	Auswahlkriterien für Lampen	187
4.2.1.3	EnergyLabel	191
4.2.1.4	Stufenweiser Auslauf der Glühlampen	191
4.3	Innovationen und Systemlösungen	193
4.3.1	Intelligente Betriebsgeräte für zeitgemäße Beleuchtungslösungen	193
4.3.2	Dimmbare elektronische Transformatoren für Hoch- und Niedervoltglühlampen	193
4.3.3	Innovationen aufgrund optischer Beschichtungen	194
4.3.4	Ferroelektrische Kondensatoren (FEC) zur Zündung von Halogenmetalldampf- oder Natriumhochdrucklampen	194
4.4	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	195
4.4.1	Beleuchtungssteuerung	195
4.4.1.1	Leistungselektronik	196
4.4.1.2	Modernes Lichtmanagement	196
4.4.1.3	Das DALI-Lichtmanagement	197

4.4.1.4	Innovationen zur Regelung von Leuchtstofflampen	199
4.5	Gebäudeleittechnik (GLT)	200
4.5.1	Objektbeispiele und Referenzprojekte	200
4.6	Tageslichtsysteme	203
4.6.1	PCM-Tageslichtsystem	205
4.6.2	Lichtregelnde Fenster	206
4.6.3	Lichttransport über größere Strecken	206
4.6.4	Sonnenschutz und Tageslichtlenkung	207
4.6.5	Tageslichtleitung durch Heliostaten	207
4.6.5.1	Lichttransport mittels Spiegelsystemen	207
4.6.5.2	Spiegelschacht zur Raumbelichtung im Untergeschoss	208
4.6.5.3	Lichttransport in fensterlose Räume	208
4.6.6	Intelligente Sonnenschutztechnologie	209
4.6.7	Objektbeispiel	209
4.7	Wirtschaftlichkeit	210
<b>5.0</b>	<b>Glossar</b>	<b>211</b>
<b>6.0</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>221</b>
6.1	Online-Berichte	221
6.2	Fachbücher	221
6.3	Fachartikel	221
6.4	EnEV 2009	221
<b>7.0</b>	<b>Kontaktadressen (Weiterführende Weblinks)</b>	<b>223</b>
7.1	Architekten	223
7.2	Institute	224
7.3	Vereine/Verbände	225
7.4	Produkt- und Systemhersteller	226
7.5	Sonstige Informationsquellen und Weblinks	226
<b>8.0</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>227</b>



# 1.0 Grundlagen

## 1.1 Allgemein

Die weiter steigenden Emissionen der Treibhausgase wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) 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 energieoptimalen 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  $\text{CO}_2$ -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 zur Energiebereitstellung
- Aufbau von Energiekreislaufprozessen.

### 1.1.3 Energieeffizienz: Energieprofil von Gebäuden

Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union haben Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer und bestehender Gebäude festzulegen. Zudem sind für die Erstellung von Energieausweisen für Gebäude Sorge zu tragen und regelmäßige Inspektionen von Wärmeerzeugern, RLT- und Klimaanlagen 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 Klimaanlagen 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 bedarfsoorientierte 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 Raumlufttechnik, Kühlung und Beleuchtung hinzugezogen.

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

- Gesamtkennwerte zur Darstellung der Energieeffizienz von Gebäuden, einschließlich der Heiz-, Raumluft-, 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, 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.

## 1.1.4 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 Raumlufttechnik, 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-Wärmege setz (EEWärmeG) soll eine weitere Reduzierung der Schadstoffemissionen, insbesondere der  $\text{CO}_2$ -Emmissionen erreicht werden.

#### 1.1.4.1 Neuerungen in der EnEV 2007

Die seit 1. 10. 2007 geltende neue EnEV 2007 verpflichtet u. a. schrittweise zur Erstellung und Vorlage von Energieausweisen. Ab 1. 7. 2009 müssen die Energieausweise in öffentlichen Dienstleistungsgebäuden, wie z. B. Hallenbäder, mit einer Nutzfläche über 10.000  $\text{m}^2$  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) wurde in 2009 weiter umgesetzt. Nach der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und der Einführung des Wärmege setzes (EEWärmeG) folgt ab Januar 2009 auch neue Regelungen für die EnEV und die Heizkostenverordnung (HeizkostenV).

#### 1.1.4.2 Neuerungen in der EnEV 2009

Am 18. März 2009 hat die Bundesregierung die Novellierung der EnEV 2009 beschlossen. Um den Baubeteiligten ausreichend Zeit zur Anpassung an die neuen Regeln zu geben, trat die EnEV 2009 erst sechs Monate nach der Verkündigung, also im Herbst 2009 in Kraft. Die energetischen Standards für Gebäude wurden sowohl beim baulichen Wärmeschutz als auch bei der technischen Gebäudeausrüstung verschärft. Die Neuregelungen gelten für den Neubau ebenso wie für den Altbau:

- die primärenergetischen Anforderungen an Neu- und Alt bauten werden durchschnittlich um rund 30 % angehoben. Bis 2012 sollen möglicherweise weitere 30 % folgen
- Dämmung ungedämmter, begehbarer, 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 geläufig, wurde auf Wohngebäude in einer einfacheren Version ausgeweitet
- das bisherige vereinfachte Nachweisverfahren zur Ermittlung des Jahresprimärenergiebedarfs wurde aufgegeben. Für die Gebäudehülle wurden neue Referenzwerte formuliert
- das Nachrüsten von Heiztechnik im Altbau wurde neu geregelt.

### 1.1.5 Blower-Door-Luftdichtigkeit

Die EnEV schreibt einen sorgsamen Umgang mit Heizenergie vor. Der Heizenergieverbrauch lässt sich aber nur dann effektiv einschränken, wenn – unabhängig von einer neuen Heizungsanlage – auch die Gebäudehülle luftdicht ausgeführt wurde.

Die Energieeinsparung und Umweltschutz (Klimaschutz) bedingen somit auch Maßnahmen für eine schützende Gebäudehülle bei einer gleichzeitig zu gewährleistenden Behaglichkeit innerhalb der Nutzungsbereiche und den gewünschten Komfort zu treffen. Jedes Gebäude, insbesondere ein gut gedämmtes, setzt auch eine hohe Wind- und Luftdichtigkeit der Gebäudehülle zum Schutz der Bausubstanz und zur Aufrechterhaltung der Behaglichkeit sowie zur Sicherung der geplanten Energieeinsparung voraus.

Tatsache ist, dass bei sanierten Gebäuden, z. B. durch den Austausch von Fenstern, die Feuchteschäden zunehmen. Entscheidend ist hier aber, dass das Gebäude energetisch in seiner Gesamtheit betrachtet wird. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass die Feuchtigkeit, deren Abtransport durch die dichten Fenster nicht mehr gewährleistet wird, auf andere Art, z. B. mittels manueller natürlicher Lüftung oder durch eine mechanische RLT-Anlage erfolgt. Eine luftdichte Gebäudehülle ist aber aus folgenden Gründen wichtig:

- Vermeidung von Tauwasser in der Konstruktion

Wenn warme, feuchte Luft aus dem Innenraum in den kälteren Bereich der Baukonstruktion gelangt, kann der enthaltene Wasserdampf kondensieren. Kalte Luft kann weniger Wasser halten als warme. Die sich niederschlagende Feuchte ist ein Nährboden für Schimmel und sonstige Pilze. Die Baukonstruktion nimmt Schaden.

- Verringerung der Energieverluste

Während bei der Wärmedämmung (Verringerung der Transmissionswärmeverluste) heute ein hoher Standard erreicht ist, ist die Luftdichtheit (Verringerung der Lüftungswärmeverluste) bisher zu wenig beachtet worden. Bei modernen Häusern kann der Lüftungswärmeverlust anteilmäßig über 50 % erreichen. Die Lüftungswärmeverluste lassen sich mit relativ geringem Aufwand reduzieren.

- Verhinderung des Eintrages von Luftschaudstoffen in die Raumluft

Je nach Windrichtung kann sich die Strömungsrichtung der Luft durch die Leckstellen des Gebäudes umkehren. Wenn die Luft in das Gebäude hinein strömt, können gesundheitsschädliche Fasern des Dämmmaterials in den Innenraum gelangen. Weiter ist zu beachten, dass sich Schimmel ansiedeln kann und durch die Strömungsrichtungs-umkehr schädliche Schimmelsporen in die Atemluft gelangen können.

- Vermeidung von kalten Fußböden im Erdgeschoss

Kalte Außenluft, die durch die Gebäudehülle gelangt, fällt nach unten und bildet eine kalte Luftzone in Fußbodennähe.

- Sicherstellung der Funktion der Lüftungsanlage

Mit einer Lüftungsanlage mit oder ohne Wärmerückgewinnung möchte man den hygienisch notwendigen Lüftungsbedarf decken, ohne die Luft über die undefinierten Leckstellen der Gebäudehülle zu leiten. Luft strömt nur da, wo ein Druckgefälle vorhanden ist. Deshalb baut eine Lüftungsanlage geringe Druckdifferenzen zwischen innen und außen auf. Leckstellen stören dabei. Darum gelten beim Einbau von Lüftungsanlagen erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit.

- Sicherstellung des Schalldämmmaßes von Bauteilen

Bei der Schallübertragung herrschen ganz spezielle physikalische Gesetze. Bereits schmale Schlitze in einer Wand lassen die Wand als schalldurchlässig erscheinen. Die schallleitende Wirkung von kleinen Ritzen wird meist unterschätzt.

- Sicherstellung der Dämmwirkung von Außenbauteilen

Wärmedämmung beruht auf dem Einschluss von Luft in Hohlräumen des Dämmmaterials. Wenn das Dämmmaterial von Luft durchströmt wird, wird ihm die Wärme entzogen und das Dämmmaterial verliert seine Wirkung.

Entsprechend der neuen EnEV 2009, die am 1. Januar 2009 in Kraft getreten ist, sind beim Neubau hinsichtlich der Luftdichtheit Neuerungen zu beachten:

### § 3: Anforderungen an Wohngebäude

- (1) Zu errichtende Wohngebäude sind so auszuführen, dass der Jahresprimärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung den Wert des Jahresprimärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung mit der in Anhang 1 Tabelle 1 angegebenen technischen Referenzausführung nicht überschreitet.
- (2) Zu errichtende Wohngebäude sind so auszuführen, dass die Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungfläche nach Anlage 1 Tabelle 2 eingehalten werden.
- (3) Für das zu errichtende Wohngebäude und das Referenzgebäude ist der Jahresprimärenergiebedarf nach einem der in Anlage 1 Nr. 2 genannten Verfahren zu berechnen. Das zu errichtende Wohngebäude und das Referenzgebäude sind mit demselben Verfahren zu berechnen.

### § 4: Anforderungen an Nichtwohngebäude

- (1) Zu errichtende Nichtwohngebäude sind so auszuführen, dass der Jahresprimärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung und eingebaute Beleuchtung

tung den Wert des Jahresprimärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Nettogrundfläche, Ausrichtung und Nutzung einschließlich der Anordnung der Nutzungseinheiten mit der in Anhang 2 Tabelle 1 angegebenen technischen Referenzausführung nicht überschreitet.

- (2) Zu errichtende Nichtwohngebäude sind so auszuführen, dass die Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche nach Anlage 2 Tabelle 2 eingehalten werden.
- (3) Für das zu errichtende Nichtwohngebäude und das Referenzgebäude ist der Jahresprimärenergiebedarf nach einem der in Anlage 2 Nr. 2 oder 3 genannten Verfahren zu berechnen. Das zu errichtende Nichtwohngebäude und das Referenzgebäude sind mit demselben Verfahren zu berechnen.

#### § 6: Dichtheit, Luftwechsel

- (1) Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend den an den anerkannten Regeln der Technik abgedichtet ist. Die Fugendurchlässigkeit außen liegender Fenster, Fenstertüren und Dachflächenfenster muss den Anforderungen nach Anlage 4 Nr. 1 genügen.  
Wird die Dichtheit nach den Sätzen 1 und 2 überprüft, kann der Nachweis der Luftdichtheit bei der nach § 3 Abs. 3 und § 4 Abs. 3 erforderlichen Berechnung berücksichtigt werden, wenn die Anforderungen nach Anlage 4 Nr. 2 eingehalten sind.
- (2) Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass der zum Zweck der Gesundheit und Beheizung erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt ist.

Anlage 4 (zu § 6): Anforderungen an die Dichtheit und den Mindestluftwechsel. [...]

#### Nachweis der Dichtheit des gesamten Gebäudes

Wird bei der Anwendung des § 6 Abs. 1 Satz 3 eine Überprüfung der Anforderungen nach § 6 Abs. 1 durchgeführt, darf der nach DIN EN 13829:2001-02 bei einer Druckdifferenz zwischen innen und außen von 50 Pa gemessene Volumenstrom – bezogen auf das beheizte oder gekühlte Luftvolumen – bei Gebäuden

- ohne Raumlufttechnische Anlagen das dreifache Gebäudevolumen
- mit Raumlufttechnischen Anlagen das anderthalbfache Gebäudevolumen

nicht überschreiten. Im Sinne der EnEV bedeutet dies generell, dass die Gebäude luftundurchlässig, d. h. dicht sein müssen, um Feuchteschäden mit Folgen einer Schimmelpilzbildung vorzubeugen.

Aufgrund der Luftdurchlässigkeitsmessung kann festgestellt werden, warum z. B. die Bezugshelligkeitsanforderungen nicht erreicht werden und wo die Schwachstellen und Undichtigkeiten zu lokalisieren sind. Mit der Blower-Door-Messung steht ein standardisiertes Verfahren zur Verfügung, die Luftdichtheit eines Gebäudes quantitativ zu erfassen. Es wird dabei ermittelt, wie oft das Luftvolumen des Gebäudes bei einer bestimmten Druckdifferenz zur Außenluft pro Stunde ausgetauscht wird. Um diesen Differenzdruck aufzubauen, wird in eine offene Außentür (Eingangstür oder Balkontür) ein Rahmen eingesetzt, der mit ei-

ner Folie bespannt ist. In einer Öffnung der Folie befindet sich ein Ventilator. Die Drehzahl des Ventilators wird so geregelt, dass sich ein definierter Druck zwischen Außen- und Innenraum einstellt. Um diesen Druck aufrechtzuerhalten, muss der Ventilator einen so hohen Volumenstrom fördern wie durch Leckstellen des Gebäudes entweicht. Um zu einer aussagekräftigen Kenngröße ( $n_{50}$ ) der Luftdichtheit, d. h. analog einem Luftdruck einer nur 5 mm hohen Wassersäule zu gelangen, wird der gemessene Volumenstrom durch das Volumen des Gebäudes geteilt.

Nachdem die Druckdifferenz aufgebaut wurde (Unterdruck im Haus) können die Leckagen in der Gebäudehülle leicht mit Rauchrörchen (Dräger), Luftgeschwindigkeitsmessgeräten und mithilfe von Thermografie geortet werden.

Seit Februar 2001 ist die DIN EN 13829 veröffentlicht, die die Durchführung der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden regelt. Damit ist die Durchführung von Blower-Door-Messungen (Luftdichtheitsmessungen) weitgehend geregelt, wobei die hierzu erforderlichen, in einer europäischen Norm nicht festzulegenden Randbedingungen im Rahmen der Tätigkeiten des FLIB vereinheitlicht und als »FLIB-Beiblatt« veröffentlicht werden. Der Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen (FLIB) fördert die Forschung und Entwicklung, konkretisiert den Stand der Technik durch Erstellung von Fachregeln und unterstützt die Gesetzgebung und Normungsarbeiten. Aufgrund dieser Aktivitäten wird langfristig die Qualitätssicherung am Bau gefördert und eine Vergleichbarkeit von Messverfahren erreicht.

Das Luftdurchlässigkeitsverfahren bietet die Möglichkeit, die Ausführungsabschnitte bereits während der Neubau- oder Sanierungsphase zu kontrollieren, zu dokumentieren und zu beheben.

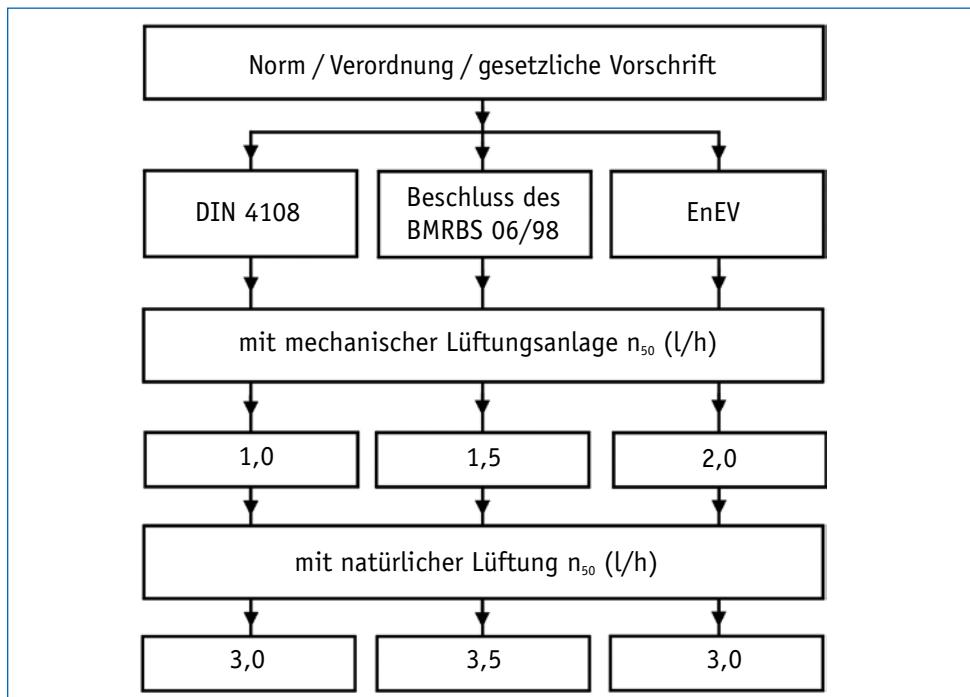


Abb. 1-1: Anforderungen an die Gebäudedichtheit (Quelle: IB-THEISS, München)

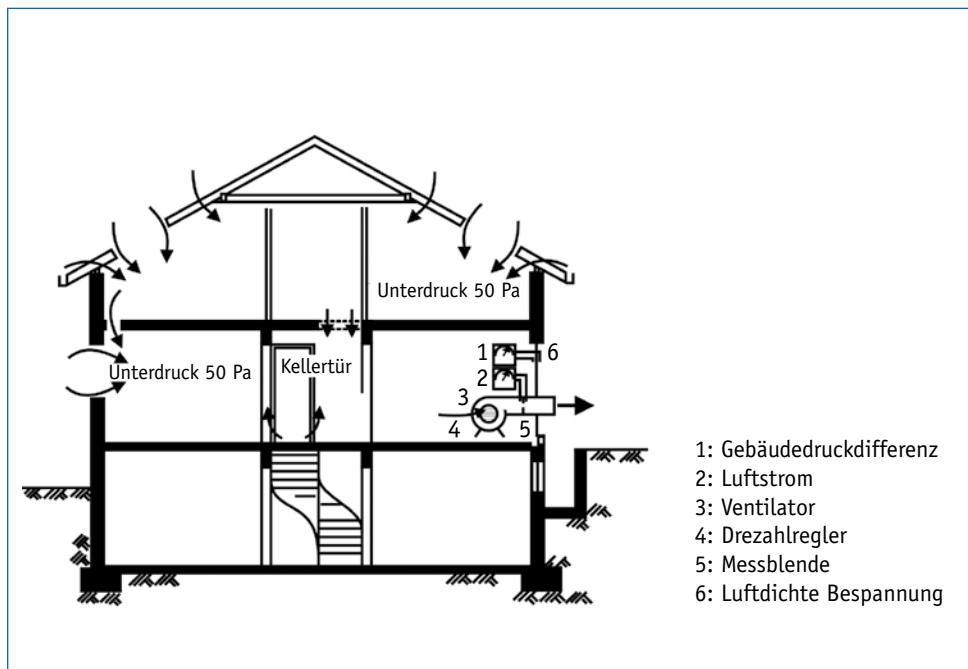


Abb. 1-2: Funktionsprinzip: Blower-Door-Messung (Quelle: IB-THEISS, München)

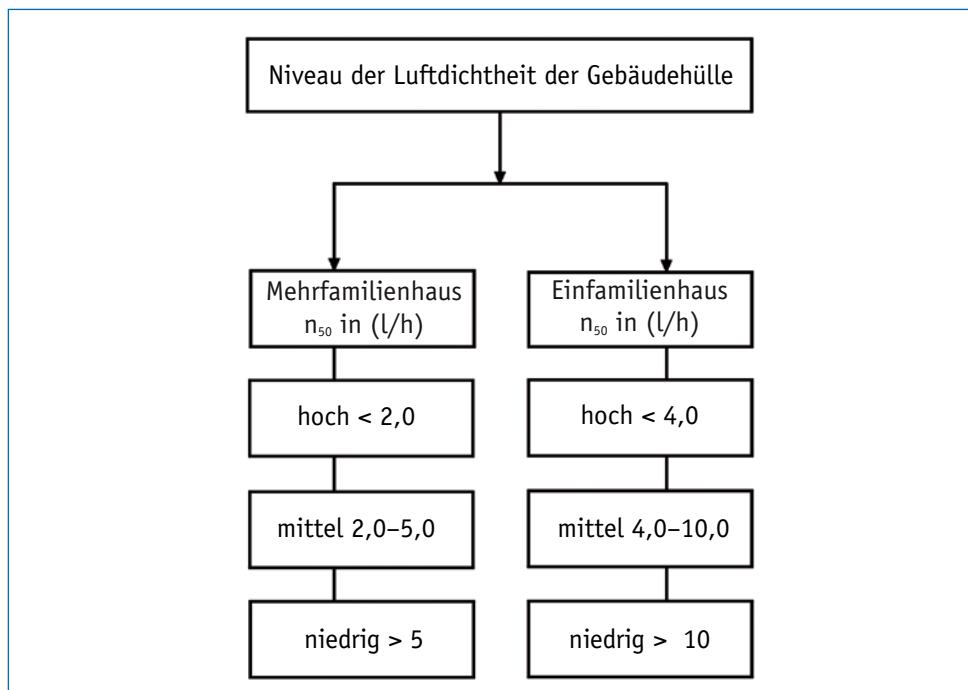


Abb. 1-3: Bewertung der Luftdichtigkeitsprüfung nach DIN EN 832 (Quelle: IB-THEISS, München)

Die Grundlage zur Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle oder von Gebäudeteilen ist die DIN EN 13829. Das in dieser Norm beschriebene Verfahren kann angewendet werden, um

- die Luftdurchlässigkeitsanforderung eines Gebäudes oder Gebäudeteils nachzuweisen
- die relative Luftdurchlässigkeit verschiedener ähnlicher Gebäude oder Gebäudeteile zu vergleichen
- Undichtigkeiten zu lokalisieren sowie
- die Verringerung der Luftdurchlässigkeit zu bestimmen, die durch einzelne, nacheinander ausgeführte Verbesserungsmaßnahmen an einem Gebäude oder Gebäudebauteil erreicht wurde.

Als Grundlage für ein Luftdurchlässigkeits-Messverfahren sollte auch die DIN 4108-7: 2001-08 beachtet werden, die Hinweise auf die bauliche Ausführung der Luftdichtheit enthält. Zudem kann mithilfe des Berechnungsverfahrens nach DIN V 18599-7 eine Qualifizierung durchgeführt und die energetische Wirkung der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen festgestellt werden.

### 1.1.5.1 Thermografie

Als ideale Ergänzung zur Blower-Door-Messung bietet sich zur Lokalisierung von Luftundichtigkeiten die Thermografie an. Der Einsatz der Thermografie setzt eine Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Gebäude und außerhalb des Gebäudes voraus. Ideal ist eine Temperaturdifferenz von mindestens 8 bis 10 °C. Die Thermografie ermöglicht mit einer hochauflösenden Infrarotkamera eine zerstörungsfreie Überprüfung und eine aussagefähige Beurteilung über die Materialien und Bauteile. Die Gebäude werden hierbei von innen oder von außen mit der Infrarotkamera aufgenommen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Arbeit sind winterliche Außentemperaturen, günstige Witterungsbedingungen und beheizte Innenräume. Die Thermografie bildet dann die für das menschliche Auge unsichtbare Wärmestrahlung eines Objektes ab, kennzeichnet die Temperaturunterschiede an der Gebäudehülle durch unterschiedliche Farbbereiche und analoger Farbskala und lokaliert die Wärmebrücken aufgrund der baulichen Mängel oder in Bezug auf die bekannten wärmetechnischen Schwachstellen, z. B. Fenster, Rolläden, Türen. Je wärmer die Temperatur an der Außenseite der Außenwand gemessen wird, umso mehr Wärme gelangt an dieser Stelle durch die Gebäudehülle ins Freie.

Da mit der Blower-Door-Ausrüstung eine Druckdifferenz von z. B. 50 Pa (Pascal) aufgebaut wird, strömt durch die Leckagen kalte Luft in das Gebäude nach, wobei die Luftströme auf dem Strömungsweg Bauteile auskühlen. Diese Auskühlung wird mit der Thermokamera sichtbar gemacht und die Örtlichkeit der Leckage und der Strömungsweg werden lokaliert. Entscheidend ist stets, dass die von der Thermokamera gesehene Oberfläche ausköhlt. Je länger der Unterdruck ansteht, desto deutlicher werden die Ergebnisse sichtbar. Wenn die Temperatur außen höher als innen ist, was im Hochsommer der Fall ist, erwärmen sich die Strömungswege entsprechend. Sie sind dann ebenfalls sichtbar.

### 1.1.5.2 Lüftungswärmebedarf ( $Q_L$ )

Durch den Lüftungswärmebedarf ( $Q_L$ ) wird Wärmebedarf zur Regenerierung und Erwärmung der verbrauchten Raumluft definiert. Der Lüftungswärmebedarf setzt sich aus dem Anteil für den konstruktionsbedingten Mindestluftaustausch, bei relativ dichten Gebäuden rechnerisch  $\approx 0,2$  pro Stunde ( $h^{-1}$ ), zusammen sowie der aus hygienischen Gründen insgesamt erforderlichen Mindest-Luftwechselrate von  $0,5 h^{-1}$ . Eine erwachsene Person benötigt im Ruhezustand  $\approx 20 l/h$  an Sauerstoff. Dieses entspricht einer Luftmenge von  $\approx 100 l/h$ . Der Lüftungswärmebedarf ist zudem vom Luftvolumen  $V$  ( $m^3$ ), der Luftwechselrate  $V_L$  ( $h^{-1}$ ) und von der Gradtagzahl ( $G$ ) des Standorts ( $K_d$ ) abhängig und wird mathematisch wie folgt erfasst:

$$Q_L = V \cdot V_L \cdot c_L \cdot G \text{ (kWh)}$$

Hier bedeutet:

$c_L$ : spezifische Wärmekapazität der Luft (Wh/kg K).

Der Lüftungswärmebedarf kann durch Vorwärmung der Außenluft im Erdreich oder durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnungsanlage reduziert werden.

### 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 Erstellungs-, 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.

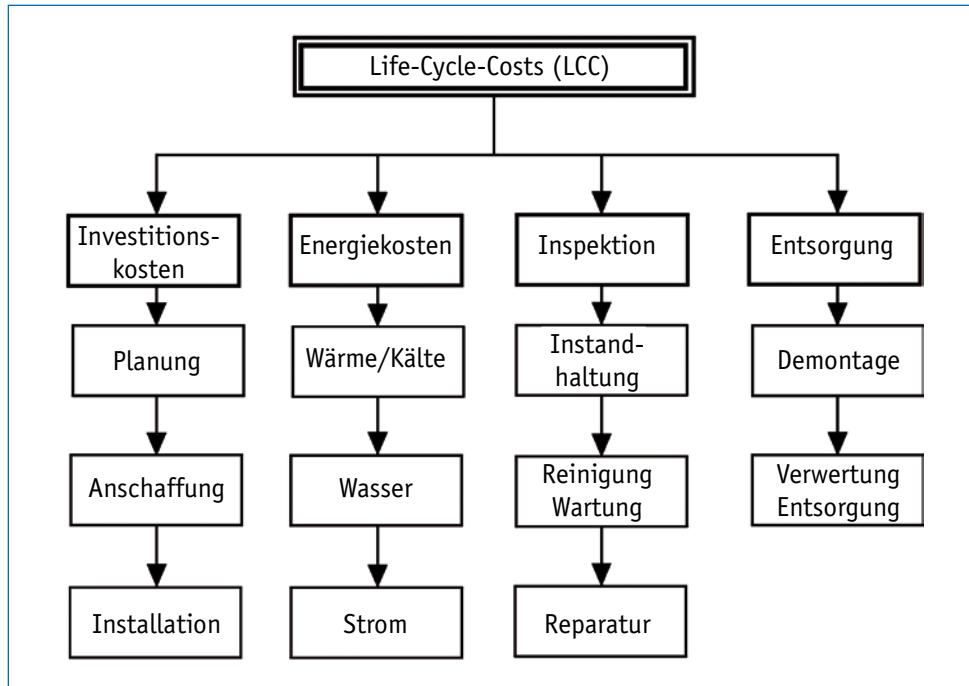


Abb. 1-4: Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs) (Quelle: IB-THEISS, München)

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 ( $m^3$  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 somit 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. Folglich 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 Gewerke Wärme-, RLT- und Klima-Kältetechnik sollten auf jeden Fall die Hygienerichtlinien nach VDI 6022 und die darin geforderten Reinigungs-, Wartungs- und Instandsetzungintervalle 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 Zugrunde-

legung 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 vermieterseitige Kosten aufgesplittet werden.

#### 1.1.6.5 Objektbeispiel

*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 1.280 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 durch den Einsatz regenerativer Energien und rationeller Energieanwendungen zur Effizienzsteigerung führen. Vorrangig gilt es jetzt, die Ungereimtheiten und Widersprüche innerhalb der Gesetzgebung, Verordnungen und Förderprogramme zu beseitigen.

### 1.2.1 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 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 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.

### 1.2.1.1 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, Vakuumisolationspaneele, 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.

### 1.2.1.2 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.

### 1.2.1.3 Green-Building-Gebäude

Bei den Green-Building-Bauten 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 Qua-

lität 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, Gebäudetechnik 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 auch eine größtmögliche Sicherheit hinsichtlich der Investitionen und der Wirtschaftlichkeit erreicht wird.

#### 1.2.1.4 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  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für Fenster unter  $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingehalten werden. Gute LowEx-Gebäude stellen ein gutes Raumklima (Komfortklasse A) mit möglichst geringem Energieaufwand (Kühlenergieverbrauch unter  $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) 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. Folglich ergeben sich für die Raumheizung Vorlauftemperaturen von maximal  $30^\circ\text{C}$  und für klimatisierte Gebäude ein Kaltwassertemperatur von mindestens  $12^\circ\text{C}$ . Mit diesen Temperaturen werden sehr gute Leistungsziffern erreicht, wobei hier auch die regenerativen Energiequellen besser genutzt werden können. Somit 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 Energieanteil (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. Brennstoffverschwendungen. 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 ein großer Anergieanteil veredelt und nutzbar gemacht werden.

Die effizientesten Systeme zum Heizen und Kühlen ergeben sich durch die Kombination von thermoaktiven Bauteilen (TAB) und Geothermie durch Nutzung der konstanten Erdreich-temperatur 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.

## 1.2.2 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 Speicherfähigkeit 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.

### 1.2.2.1 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
- Wärmedämmverbundsysteme
- Wirtschaftlichkeit der Außendämmung
- Raumklima in außenseitig gedämmten Häusern
- Schäden an außenseitig gedämmten Außenwänden

- Schäden an Außenwänden mit Kerndämmung oder Innendämmung
- Wärmebrücken.

### 1.2.2.2 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  $g_{eff}$  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 Sonnenenergie Nutzung durch Hauswände mit opaker Wärmedämmung ist jedoch nicht möglich.

### 1.2.2.3 Thermochemische Speicherung durch 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 verkapselfter 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.

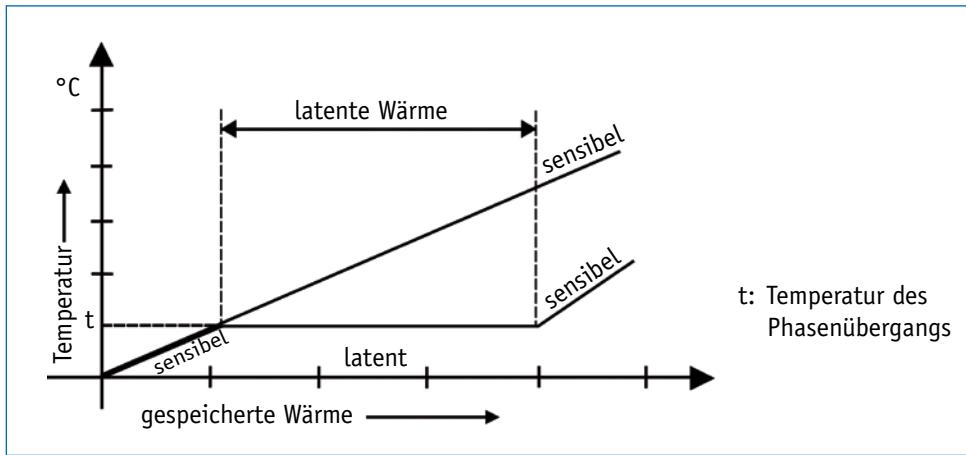


Abb. 1-5: Wärmespeicherung durch sensible und latente Wärme (Quelle: IB-THEISS, München)

Die Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) 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 z. B. Salzhydrate oder Salzhydratmischungen verwendet werden, die auch zunehmend zum Ersatz bzw. zur Reduzierung von Klimaanlagen 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 Kristallisierungsprozess 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. 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 zugrunde. 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 PCM nur für bestimmte Nutzungen vorgesehen sind, bei denen Wärme auf relativ geringem Temperaturniveau gespeichert wird, gehen die Entwicklungsbestrebungen in Richtung einer Leistungssteigerung, 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 integriert, die feuchtehemmend wirkt.

### **Vakuumdämmung**

Die Vakuumdämmssysteme stellen eine relativ neue Entwicklung in der Dämmstoffbranche dar. Bei der Verwendung dieser neuen Dämmssysteme können erhebliche Einsparungen erzielt werden. Wände, Böden oder Decken im Querschnitt wesentlich dünner ausgeführt werden und infolgedessen 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 Vakuumpaneelen, die bis zu 2 cm dünn sein können, ist die Wärmeleitfähigkeit zehnmal geringer als bei den konventionellen Dämmssystemen. Damit ermöglichen die luftleeren Platten, z. B. bei Passivhäusern, konstruktiv genauso dünne Außenwände wie bei durchschnittlich gedämmten Häusern.

### **Vakuumisolationspaneel**

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 Vakuumisolationspaneel bestehen prinzipiell aus einem offenporigen Kernmaterial (z. B. hitzebeständige Kieselsäure) mit niedrigem Innendruck und einer gasdichten Hülle. Der Vorteil der Vakuumisolationspaneel 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. 1-1:** Referenzprojekte – Vakuumdämmung (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Ensemble Capricorn Haus in Düsseldorf, Architekten: Gatermann + Schossig, Köln	Das siebengeschossige Büro- und Gewerbegebäude der Capricorn-Gruppe wurde auf einem mäanderförmigen 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 Vakuumisolationspaneele 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 »02-Village«, Studentenstadt-Freimann, 80805 München	Vakuumisolierung der Dachflächen wurde von der Vaku-Isotherm GmbH	Kleinsiedlung aus modernen Wohnwürfeln für Studierende
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 außenliegendem 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. Bauteilaktivierung (BTA) mit Heizen/Kühlen. Ca. 800 Gründungspfähle (9 m tief) wurden 593 mit Absorberregister ausgerüstet. Gebäudelaittechnik

### 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 Umgebungs-temperatur 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-Pannele gegenüber einer transparenten Wärmedämmung (TWD) besteht darin, dass kein mechanischer Sonnenschutz benötigt wird.

### 1.2.3 Passive Sonnenutzung

Die Nutzung der Sonnenenergie kann prinzipiell aktiv oder passiv erfolgen.

Die passive Sonnenenergienutzung kann mit oder ohne dem 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 Sonnenenergienutzung 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).

### 1.2.3.1 Nutzung der Sonnenenergie ohne technische Umwandlungsprozesse

#### Strahlungskühlung

Unterschieden wird in passive Systeme und Hybridsysteme. Die ausschließliche Anwendung passiver und hybrider Kühlmaßnahmen setzt eine systematische und konsequente Detail-optimierung 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 energieoptimalen und zukunftsfähigen Gebäudekonzepts 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 gewonnenen 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 Berechnung des Daches eingesetzt, wobei durch die Verdunstung ein zusätzlicher Kühlungseffekt erreicht wird.

### 1.2.4 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 Klimaanlagen unter sommerlichen Temperaturen. Die Heiz- und Kaltwasserströme sowie die Luftströme für Raumluft- und Klimaanlagen 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. Infolgedessen 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 differenzierteren Bedingungen mit mehreren kleinen Leistungseinheiten, miteinander verbinden.

#### 1.2.4.1 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 (Bau-physik)
- 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 Gebäude-speichermassen erfolgt über ein in die Decken (Fußböden) integriertes wasser- oder luft-führendes Rohrsystem. Als Wärmesenke dient das Grundwasser bzw. das Erdreich oder die Außenluft. Bei der Verwendung von Grundwasser als Wärmesenke besteht die größte Unab-hängigkeit 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. Zuluft-kühlung über Grundwasser/Erdreich), konditioniert werden. In Kombination mit einer Wär-mepumpe ist das System auch als Niedertemperaturheizung im Winter einsetzbar, die De-cken (Fußböden) dienen hierbei als Strahlungsheizfläche.

**Tab. 1-2:** Referenzprojekte – Bauteilaktivierung (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Bürogebäude Energon, Ulm, Architektur: oehler & archkom	Passive Kühlung (Bauteiltemperie-rung), Erdsonden, Wärmepumpe, RLT-Anlagen mit Wärmerückge-winnung und Erdreichwärmeüber-trager Gesamtprimärenergie-verbrauch 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, Architekt: Gatermann+Schossig Architekten; Generalplaner, Köln	In dem sechsgeschossigen Büro- und Geschäftsgebäude wurden ca. 82 % der Nutzungszenen mit Betonkernaktivierung ausgeführt.	Die Grundwasserentnahme erfolgt mittels zweier Saugbrunnen zum Heizen und Kühlen des Gebäudes, d. h. mit 100 % Redundanz.

Fortsetzung Tab. 1-2

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  $200\text{W}/(\text{m}^2\text{d})$  abgeführt werden. Mit einem Erdreichwärmeübertrager können ca.  $200\text{W}/(\text{m}^2\text{d})$  sowie über eine Betonkernaktivierung bis zu ca.  $250\text{W}/(\text{m}^2\text{d})$  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 Kühlturn 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.

#### 1.2.4.2 Hybridsysteme

Ziel einer zeitgemäßen und ganzheitlichen Planung ist es unter anderem, Gebäude mit optimiertem thermischen 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 unterscheiden, 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 reaktionsschnellen Bauteilaktivierung mit Betondecken. Ein wesentliches Systemmerkmal ist dabei fast immer die Abtrennung der Funktionen »Heizen« und »Kühlen« von den raumlufttechnischen Anlagen. Im Ergebnis können auf diese Art komfortablere und energiesparendere raumlufttechnische Anlagen bei geringeren Luftmengen sowie ein Optimum an Komfort, Funktion und Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

#### 1.2.4.3 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.

#### 1.2.4.4 Nachtlüftung (Gebäudenachtauskühlung)

Mit der freien Nachtauskühlung wird ein Lüftungskonzept definiert, dass in den Sommermonaten die nächtliche Kühle der Außenluft nutzt, um die Bauteile mit großer Wärmespeicherfähigkeit auszukühlen und diese gleichzeitig über den Tag als »Wärmepuffer« nutzen zu können (Night-Flushing).

Mit einer Nachtlüftung wird die Enthalpie der niedrigen Außentemperaturen als natürliches Kühlpotenzial genutzt, das in Mitteleuropa selbst über die heißen Sommermonate im Mittel 15 °C unterschreitet und daher direkt zur Entladung der tagsüber erwärmten Speichermassen dient. Hierzu muss lediglich ein ausreichend großer Luftwechsel im Gebäude erzeugt werden. Die aufgrund der natürlichen Thermik aktivierte Nachtlüftung eignet sich zur Abfuhr der täglichen Wärmeeinträge von bis zu ca. 150 Wh/(m<sup>2</sup>d). Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Dimensionierung und Zugänglichkeit der massiven Bauteile. Dieses

lässt sich technisch am einfachsten über ausreichend groß dimensionierte, nachts geöffnete Fensterflügel bzw. wetter- und einbruchssichere Lüftungsflügel realisieren. Komplexere Lüftungskonzepte beziehen das ganze Gebäude mit ein und nutzen zum Antrieb der nächtlichen Durchlüftung die Schachtwirkung über die Gebäudehöhe (Atrien, etc.) oder den anstehenden Wind.

Für eine wirksame Nachtlüftung ist ein ausreichender Luftaustausch in den einzelnen Räumen sicherzustellen. Diese kann entweder der freie Auftrieb aufgrund der Temperatur- bzw. Druckdifferenz (Thermik) zwischen innen und außen genutzt werden oder eine mechanische Abluftanlage. Mit dem »Stack-Effekt« wird die thermisch wirksame Kraft für den Luftaustausch definiert, d. h. die Auftriebskraft, die über mehrere Geschosse entsteht, sobald eine Temperaturdifferenz zwischen innen und außen vorhanden ist. Der Stack-Effekt kann erheblich zu einem komfortablen Sommerklima beitragen. Da der maximale und der mittlere Luftwechsel durch den Stack-Effekt kaum größer werden, ergeben sich auch wesentlich höhere Komfortkenngrößen. Der Grund liegt darin, dass in den entscheidenden Heizperioden unter Nutzung des Stack-Effekts eine weit wirksamere Nachtauskühlung stattfinden kann, weil die Außenluft einen längeren Weg durch das Gebäude zurücklegt. Infolgedessen kann die Außenluft mehr Wärme aus den Innenlasten aufnehmen. Zudem wirkt der Luftwechsel in höherem Maße temperaturgetrieben und erfolgt genau zu dem Zeitpunkt, bei dem die Außenluft viel Wärme aus dem Gebäude aufnehmen kann. Im Verlauf der Heizperiode sind die verfügbaren Luftwechselraten größer als ohne Nutzung des Stack-Effekts.

Bei größeren Innenlasten ist auch eine Kombination der mechanischen RLT-Anlage mit einem Erdreich/Luft-Wärmeübertrager (E/LWÜ) möglich, um während der Zeit des direkten Wärmeeintrags einen zusätzlichen Kühleffekt zu erreichen. Beim Einsatz eines Erdreich/Luft-Wärmeübertragers müssen auf jeden Fall die Regenerationszeiten beachtet werden. Der Erdreich/Luft-Wärmeübertrager kann zudem während der Heizperiode zur Vorwärmung der Zuluft und primär zur Eisfreiheit von Wärmeübertragern verwendet werden. Hierdurch kann u. a. auf die kostenintensiven wasser- und luftseitigen Frostschutzregelungen verzichtet werden. Die Räume müssen tags und nachts gut zu lüften sein. Tagsüber ist ein erhöhter Luftwechsel sinnvoll, solange die Lufttemperatur außen unter der Raumlufttemperatur liegt. Nachts sollte eine Gebäude-, bzw. Raumdurchspülung mit einem Luftwechsel von mindestens  $2 \text{ h}^{-1}$ , besser jedoch  $4 \text{ h}^{-1}$  erreicht werden.

Eine wirksame Nachtlüftung muss über die Nachtstunden bei ausreichend tiefer Temperatur erfolgen, d. h. bei Außentemperaturen unter  $21^\circ\text{C}$  mindestens über 5 Stunden.

Eine freie Lüftung setzt voraus, dass das Gebäude in sämtlichen Nutzungsbereichen mit einem möglichst geringen Druckverlust durchspült wird. Sollte dies aufgrund der Gebäudekubatur nicht möglich sein, können die Funktion und ein energetischer Effekt nur durch den Einsatz einer mechanischen Lüftung gewährleistet werden.

Bei einer Nachtlüftung müssen in jedem Fall, egal ob bei freier oder mechanischer Lüftung, die brandschutz- und sicherheitstechnischen (Entrauchung, Fluchtwege, Öffnen von Fenstern über Nacht, etc.) Belange beachtet werden.

### 1.2.4.5 Referenzprojekt

**Tab. 1-3:** Referenzprojekte – Gebäudenachtauskühlung (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Justus von Liebig Schule in Waldshut	Raumkühlung mittels Nacht-kühlung (Thermik)	Passivhausstandard; RLT-Erdluft-kanäle; WRG Photovoltaikanlage
Nord/LB-Zentrale in Hannover	Raumkühlung mittels Nacht-kühlung (Thermik)	Heliostat-Tageslichtlenksysteme, Solarthermie; BKT mittels ober-flächennaher Geothermie über Gründungspfähle
Stadtwerke Bochum, Architekten: Gatermann + Schossig, Köln	Raumkühlung mittels Nacht-kühlung (Thermik)	Oberflächennahe Geothermie über Gründungspfähle. Die gewonnene regenerative Energie wird zum Kühlen bzw. Heizen über Change Over Systeme genutzt.

### 1.2.5 Energieeffiziente Gebäudeautomation

Der steigende Kostendruck zwingt die Besitzer und Betreiber von Gebäuden im privatwirtschaftlichen und im öffentlichen Bereich immer mehr, beim Gebäudebetrieb nach Kosten-einsparpotenzialen 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 den 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 Bussysteme 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 erken-

nen, dass selbst hochkomplexe Gebäude auf unter 20 verschiedene Raumtypen reduzierbar sind.

Die neue Europanorm EN 15232 »Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement« 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 Bestimmung 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 für die 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.

### 1.2.5.1 Vier Effizienzklassen der Gebäudeautomationssysteme

Auf Initiative der Gebäudetechnikindustrie veranlasste das CEN auch die Erarbeitung einer Richtlinie für die Gebäudeautomation, aus der die EN 15232 »Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement« 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 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 Thermo- grafie lassen sich mit den Softwaretools die Extremwerte und Korrelationen entdecken. Die Assimilation dieser Werte kann versteckte Einsparpotenziale zwischen 20 und 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 erfolgte 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).

#### **1.2.5.2 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 (Europnorm) sowie 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 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 kommunikative Automatisationsanwendungen und spezielle Geräte, wie z. B.:

- Optimierung der Automatisierung
- Heizung
- Gebläsekonvektoren und Induktiongeräte
- Einzelraumregelung für Konstantvolumen und variable Luftvolumenanlagen 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 co-dierte 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 2010 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- sowie Klima- und Kälteanlagen, 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. Der

Trend in Richtung »intelligentes Gebäude« gilt auch für den Gebäudebestand, z. B. für die energie- und kostenintensiven Gebäude der Universitäten, Hochschulen und Verwaltungen.

### 1.2.5.3 Gebäudeautomation und Feldbustechologie

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 benennt 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 EIB die gleichen Aussagen auch für den LON. 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 unwesentlich. Größere Unterschiede sind allerdings bei der Programmierung ersichtlich. Hier bieten sich für die verschiedensten Anforderungen sehr unterschiedliche Programmertools 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 Gebäudemerkmalen. So lassen sich z. B. neben der Beleuchtung auch die innen und außen liegenden Jalousien und Markisen der Fassadenfenster sowie Verdunkelungsbehänge in der Tagessichtdecke integrieren. Das multifunktionale, Gewerk übergreifende Zusammenspiel reduziert die erforderlichen Steuerungssysteme und insofern auch die Investitions- und Folgekosten. Wie auch bei anderen Bustechnologien, so können mit der LON-Bustechnologie für Heizungs-, RLT- und Klimaanlagen, Überwachungs- und Meldeanlagen, Beleuchtungs- und Sonnenschutzsteuerungen sowie 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 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 kostenoptimaler 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 Bestanteil 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.

#### 1.2.5.4 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, als 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-, Jalousiesteuierungen 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 erkannt werden, um letztlich auch die erforderlichen bzw. gewünschten Raumkonditionen effizient sicherstellen zu können.

Diese Schnittstellen erweitern sich dynamisch, da zunehmend auch die Gebäudestruktur (multifunktionale Fassaden, Tageslichtlenksysteme, 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 Gebäudeauto-

mation 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 Kältemaschine 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 Überwaltungsfunktionen 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.

## 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 -verteilsystemen 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.

#### 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-Kälte-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 vorzogener
- 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.

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, Preisangepassungsmechanismen, Vertragslaufzeiten und die Endschafsstbestimmungen, 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 Contractingraten 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 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
- 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 Energieeinsparung mitfinanziert werden können. Um auch bei knappen Budgets notwendige Sanierungen, Modernisierungen, Optimierungen und hygienische Verbesserungen realisieren zu können, wurden von der Industrie spezielle Energiesparcontractingmodelle 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 Gebäudetreibern die Möglichkeit, Maßnahmen zur effizienten Energienutzung im Wege einer Drittmittelfinanzierung 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.

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. 1-4: Referenzprojekte – Contracting (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt	Rationale Energietechnologien	Besonderheiten
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 1.500 kg/h auf 2 x 600 kg/h	Energiesparcontracting Erdgasbedarf um 23 % reduziert

## 1.4 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 Vorteile 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 Grundlage dient hier die Norm DIN EN 15459:2008-06 »Heizsysteme in Gebäuden; Erforderliche Daten für einheitliche wirtschaftliche Betrachtungsverfahren in Verbindung mit Energiesystemen in Gebäuden, einschließlich erneuerbarer Energiearten; Deutsche Fassung prEN 15459:2006«. Die DIN EN 15459:2008-06 ist Teil der Berechnungsmethode für die Wirtschaftlichkeit von Energieeinsparmöglichkeiten in Gebäuden, z. B. Isolierung, effizientere Erzeugungs- und Verteilungssysteme, effizientere Beleuchtung oder den Einsatz von erneuerbaren Quellen sowie die rationale Energieanwendungen mittels Brennwerttechnologie, Brennstoffzellen, Kraft-Wärme-Kopplung, etc.

In der Norm 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 Gebäudearten und enthält primär die Definitionen und Strukturen der Kostentypen, die für die Berech-

nung 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 somit dem zum Kalkulationszins anzulegenden Gesamtbetrag, der erforderlich ist, um zusammen mit den Zinsen sämtliche Investitions- und laufenden Kosten, die also auch über den späteren Nutzungszzeitraum 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. Folglich 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 künftigen 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 somit 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:

- $K_o$ : 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  
(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

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

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. Z. B. 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
- 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 mit 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, als 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 verhindert zudem,

- dass die Leistungen 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
- dass aufgrund von Personen- oder Sachschäden strafrechtliche oder zivilrechtliche Probleme wegen mangelnder Sicherheit drohen, weil nur die normativen Anforderungen erhöht wurden.

Der Aufwand der Normenarbeit wird folglich 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. das letztlich auch der Nutzen der Normung indirekt Geld spart.

### 2.2.2 Entstehung der Normen

Beim Hinweis »Stand der Technik« handelt es sich 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, dass es von einer Gruppe von Fachleuten in einem öffentlichen Konsensverfahren erstellt wurde.

An der Normenarbeit kann sich jeder beteiligen, der sich für kompetent hält, bei der Erarbeitung des Normvorschlages, bei dem nachfolgenden öffentlichen Einspruchsverfahren und/oder bei späteren Überarbeitungen der Norm mitzuwirken. 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. Somit 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, die, 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 für den Fall danach verfahren werden, dass die neuen Festlegungen als gut und richtig zu betrachten sind. Um hier jedoch eine Rechtssicherheit zu erhalten, muss gegenüber dem Auftraggeber schriftlich begründet und verantwortet werden, warum sich der Auftragnehmer an der im Entwurf formulierten Vorgabe orientiert hat.

Bei sämtlichen Diskussionen über die Gültigkeit der Normenvorgaben auf Basis der unterschiedlich gefärbten Papiere 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 nicht um Gesetze, d. h. es gibt keine gesetzliche Grundlage bestimmte Normen anzuwenden. Die Anwendung von Normen basiert daher auf freiwilliger Basis. Der Ausführende darf somit praktisch frei entscheiden, ob und welche Normen er anwendet oder dieses auch mit seinem Kunden vertraglich vereinbart. Dieser Grundsatz gilt für sämtliche Normen, gleichgültig ob VDE-, DIN-, EN-, IEC- oder ISO-Normen, und ist weltweit verbindlich. Dies bedeutet aber andererseits nicht, dass die Normen von Planern, Ausführenden, etc. unbeachtet bleiben dürfen, vielmehr sprechen viele gute Gründe für eine Anwendung der Normen.

In den Gesetzen, Verordnungen, Durchführungsverordnungen, 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 die allgemein anerkannten Regeln der Technik widerspiegeln, da diese Normen aufgrund einer intensiven Gemeinschaftsarbeit von Experten – bei Europanormen 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 Sachverständigungsgutachten. 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 Status 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 Gesetzesgebers 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 der Wissenschaft und Technik

Die Definition »Stand von Wissenschaft und Technik« trägt den Status der Fortschriftlichkeit in sich, d. h. 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 schon nicht mehr jeder erreicht. Die »anerkannte Regeln der Technik« bilden die unterste Sprosse; auf diese Regel 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 berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft die Pflicht sich z. B. an die BGV A2 zu halten (BGV – Berufsgenossenschaftliche Vorschrift).

Eine fachgerechte Durchführung von Revisionsarbeiten wird von den Fachfirmen festgelegt und ist von den Fachkräften mit festgelegten Tätigkeiten durchzuführen. Die Verantwortung liegt natürlich bei dem verantwortlichen Meister, staatlich geprüften 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 (Haftpflichtversicherung) 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 naturwissenschaftlichen Erkenntnissen 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.

Bei den VDI-Regeln handelt es sich im juristischen Sinne lediglich um private Regelungen mit einem Empfehlungscharakter. Da sich die VDI-Richtlinien durch besonders qualifizierte technische Erfahrungssätze auszeichnen, kommen sie bei Gericht der Bedeutung eines »objektiven Sachverständigungsgutachtens« 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 z. B. 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

Bei den VDE-Bestimmungen handelt es sich um Empfehlungen. Diese Empfehlungen 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. Folglich 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 Industriebauten handelt.

## 2.3.4 Sonstige Richtlinien und Merkblätter

Hierzu fallen Technische Regeln, wie

- DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
- TAB – Technische Anschlussbedingungen (VDN e. V. beim VDEW)
- TA-Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
- VDMA-Einheitsblätter – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer

## 2.4 Verzeichnis der Normen in Kapitel 1.0 bis 4.0

### Kapitel 1.0 – Grundlagen

#### **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 V 18599-1, Vornorm, 2011-12**

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, 2011-12**

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 15232, Norm, 2012-04**

Energieeffizienz von Gebäuden; Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement; Deutsche Fassung EN 15232:2012

**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 15727, Norm, 2010-10**

Lüftung von Gebäuden – Luftleitungen und Luftleitungsbauteile, Klassifizierung entsprechend der Luftpertinenz und Prüfung; Deutsche Fassung EN 15727:2010

*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 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

**Kapitel 3.0 – Energetische Potenziale in der Raumluft-, Klima- und Kältetechnik****DIN 1946-4, Norm, 2008-12**

Raumlufttechnik; Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens

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

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

**DIN V 18599-3, Vornorm, 2011-12**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung

**DIN V 18599-7, Vornorm, 2011-12**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau; mit CD-ROM

**DIN EN**

**DIN EN 13053, Norm, 2012-02**

Lüftung von Gebäuden; Zentrale raumlufttechnische Geräte; Leistungskennwerte für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006+A1:2011

**DIN EN 13779, Norm, 2007-09**

Lüftung von Nichtwohngebäuden; Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007

**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 15221-1, Norm, 2007-01**

Facility Management; Teil 1: Begriffe; Deutsche Fassung EN 15221-1:2006

**DIN EN 15239, Norm, 2007-08**

Lüftung von Gebäuden; Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden; Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 15239:2007

**DIN EN 15240, Norm, 2007-08**

Lüftung von Gebäuden; Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden; Leitlinien für die Inspektion von Klimaanlagen; Deutsche Fassung EN 15240:2007

**DIN EN 15241, Norm, 2011-06**

Lüftung von Gebäuden; Berechnungsverfahren für den Energieverlust aufgrund der Lüftung und Infiltration in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 15241:2007 + AC:2011

**DIN EN 15242, Norm, 2007-09**

Lüftung von Gebäuden; Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration; Deutsche Fassung EN 15242:2007

**DIN EN 15243, Norm, 2007-10**

Lüftung von Gebäuden; Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlagen; Deutsche Fassung EN 15243:2007

**DIN EN 15251, Norm, 2007-08**

Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden; Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007

### **Kapitel 3.3 – Kontrollierte Wohnungslüftung**

#### **DIN 1946-6, Norm, 2009-05**

Raumluftechnik; Teil 6: Lüftung von Wohnungen; Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung

#### **DIN 1946-7, Norm, 2009-07**

Raumluftechnik; Teil 7: Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien

#### **DIN V 18599-6, Vornorm, 2011-12**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau

#### *DIN EN*

#### **DIN EN 13141-4, Norm, 2011-09**

Lüftung von Gebäuden; Leistungsprüfungen von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen; Teil 4: Ventilatoren in Lüftungsanlagen für Wohnungen; Deutsche Fassung EN 13141-4:2011

#### **DIN EN 13141-7, Norm, 2011-01**

Lüftung von Gebäuden; Leistungsprüfungen von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen; Teil 7: Leistungsprüfung von mechanischen Zuluft- und Ablufteinheiten (einschließlich Wärmerückgewinnung) für mechanische Lüftungsanlagen in Wohneinheiten (Wohnung oder Einfamilienhaus); Deutsche Fassung EN 13141-7:2010

#### **DIN EN 13141-8, Norm, 2006-05**

Lüftung von Gebäuden; Leistungsprüfung von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen; Teil 8: Leistungsprüfung von mechanischen Zuluft- und Ablufteinheiten ohne Luftführung (einschließlich Wärmerückgewinnung) für ventilatorgestützte Lüftungsanlagen von einzelnen Räumen; Deutsche Fassung EN 13141-8:2006

#### **DIN EN 13141-8, Norm-Entwurf, 2011-10**

Lüftung von Gebäuden; Leistungsprüfung von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen; Teil 8: Leistungsprüfung von mechanischen Zuluft- und Ablufteinheiten ohne Luftführung (einschließlich Wärmerückgewinnung) für ventilatorgestützte Lüftungsanlagen von einzelnen Räumen; Deutsche Fassung prEN 13141-8:2011

#### **DIN EN 13142, Norm-Entwurf, 2010-11**

Lüftung von Gebäuden; Bauteile/Produkte für die Lüftung von Wohnungen; Geforderte und frei wählbare Leistungskenngrößen; Deutsche Fassung prEN 13142:2010

**SN EN 13465, SIA 382.201, Norm, 2004-08**

Lüftung von Gebäuden; Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Luftvolumenströmen in Wohnungen

**DIN EN 13779, Norm, 2007-09**

Lüftung von Nichtwohngebäuden; Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007

**DIN EN 15665, Norm, 2009-07**

Lüftung von Gebäuden; Bestimmung von Leistungskriterien für Lüftungssysteme in Wohngebäuden; Deutsche Fassung EN 15665:2009

**Kapitel 3.6 – Solare Kühlung**

**DIN EN 12975-1, Norm, 2011-01**

Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile; Kollektoren; Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12975-1:2006+A1:2010

**DIN EN 12975-1, Norm-Entwurf, 2011-08**

Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile; Kollektoren; Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung prEN 12975-1:2011

**DIN EN 12975-2, Norm, 2006-06**

Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile; Kollektoren; Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 12975-2:2006

**Kapitel 4 – Beleuchtungstechnik**

**DIN 5035-3, Norm, 2006-07**

Beleuchtung mit künstlichem Licht; Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen

**DIN 5035-6, Norm, 2006-11**

Beleuchtung mit künstlichem Licht; Teil 6: Messung und Bewertung

**DIN V 18599-4, Vornorm, 2011-12**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung

**DIN EN**

**DIN EN 12665, Norm, 2011-09**

Licht und Beleuchtung; Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2011

**DIN EN 15193, Norm, 2008-03**

Energetische Bewertung von Gebäuden; Energetische Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 15193:2007

**DIN EN 61231, Norm, 2010-12**

Internationales Lampenbezeichnungssystem (ILCOS) (IEC 61231:2010); Deutsche Fassung EN 61231:2010

## **2.5 Verzeichnis der Richtlinien und Verordnungen in Kapitel 1.0 bis 4.0**

### **Kapitel 1.0 – 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 Anlagen-technik 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)

## **Kapitel 3.0 – Energetische Potenziale in der Raumluft-, Klima- und Kältetechnik**

### **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 21, Technische Regel, 2003-05**

Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Energieaufwand der Nutzenübergabe – Raumlufttechnik

### **VDI 2071, Technische Regel, 1997-12**

Wärmerückgewinnung in Raumlufttechnischen Anlagen

### **VDI 2078, Technische Regel, 1996-07**

Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)

### **VDI 2078 Blatt 1, Technische Regel, 2003-02**

Berechnung der Kühllast klimatisierter Gebäude bei Raumkühlung über gekühlte Raumumschließungsflächen

### **VDI 2078, Technische Regel, Entwurf, 2012-03**

Berechnung der Kühllast und Raumtemperaturen von Räumen und Gebäuden (VDI-Kühllastregeln)

### **VDI 3803 Blatt 1, Technische Regel, 2010-02**

Raumlufttechnik; Zentrale Raumlufttechnische Anlagen; Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)

### **VDI 3803 Blatt 1 Berichtigung, Technische Regel, 2010-10**

Raumlufttechnik – Zentrale Raumlufttechnische Anlagen – Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Berichtigung zur Richtlinie VDI 3803 Blatt 1:2010-02

### **VDI 6012 Blatt 1.1, Technische Regel, Entwurf, 2011-11**

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

### **VDI 6022 Blatt 1, Technische Regel, 2011-07**

Raumlufttechnik, Raumluftqualität; Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln)

**VDI 6022 Blatt 1.1, Technische Regel, Entwurf, 2011-07**

Raumluftechnik, Raumluftqualität; Hygieneanforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte; Prüfung von Raumluftechnischen Anlagen (VDI-Lüftungsregeln)

**VDI 6022 Blatt 3, Technische Regel, 2011-07**

Raumluftechnik; Raumluftqualität; Beurteilung der Raumluftqualität

**VDI 6022 Blatt 4, Technische Regel, Entwurf, 2011-07**

Raumluftechnik, Raumluftqualität; Qualifizierung von Personal für Hygienekontrollen, Hygieneinspektionen und die Beurteilung der Raumluftqualität

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

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Grundlagen

**VDI 6028 Blatt 4.1, Technische Regel, 2006-02**

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

**VDI 6028 Blatt 4.2, Technische Regel, 2007-04**

Bewertungskriterien für die Technische Gebäudeausrüstung; Anforderungsprofile und Wertungskriterien für Kälteanlagen (zu Kostengruppe 430 Raumluftechnik)

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

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

**VDI 6035, Technische Regel, 2009-09**

Raumluftechnik; Dezentrale Lüftungsgeräte; Fassadenlüftungsgeräte (VDI-Lüftungsregeln)

**VDMA 24197-1, Technische Regel, Entwurf, 2011-02**

Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen; Teil 1: Klima- und lüftungstechnische Geräte und Anlagen

**VDMA 24197-3, Technische Regel, Entwurf, 2011-02**

Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen; Teil 3: Kältetechnische Geräte und Anlagen zu Kühl- und Heizzwecken

**VDMA 24247-1, Technische Regel, 2011-11**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 1: Klimaschutzbeitrag von Kälte- und Klimaanlagen; Verbesserung der Energieeffizienz; Verminderung von treibhausrelevanten Emissionen

**VDMA 24247-2, Technische Regel, 2011-05**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 2: Anforderungen an das Anlagenkonzept und die Komponenten

**DMA 24247-5, Technische Regel, 2011-05**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 5: Industriekälte

**VDMA 24247-6, Technische Regel, 2011-05**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 6: Klimakälte

**VDMA 24247-7, Technische Regel, 2011-04**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 7: Regelung, Energiemanagement und effiziente Betriebsführung

**VDMA 24247-8, Technische Regel, 2011-05**

Energieeffizienz von Kälteanlagen; Teil 8: Komponenten; Wärmeübertrager

**Kapitel 4.0 – Beleuchtungstechnik**

**EGV 244/09, Ausgabe: 2009-03-18**

Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltlampen mit unbündeltem Licht

**EGV 245/09, Ausgabe: 2009-03-18**

Verordnung (EG) Nr. 245/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu ihrem Betrieb und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates

**EGV 278/09, Ausgabe: 2009-04-06**

Verordnung (EG) Nr. 278/2009 der Kommission vom 6. April 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an die Leistungsaufnahme externer Netzteile bei Nulllast sowie ihre durchschnittliche Effizienz im Betrieb



## 3.0 Energetische Potenziale in der Raumluft, Klima- und Kältetechnik

### 3.1 Grundlagen

In der Gebäudetechnischen Ausrüstung (TGA) bieten sich auch im Bereich der RLT-, Klima- und Kältetechnik enorme Möglichkeiten an, den Energieverbrauch zu reduzieren und parallel hierzu die Umwelt von zusätzlichen Schadstoffemissionen zu entlasten. Hierbei handelt es sich sowohl um die einzelnen Komponenten als auch um das jeweilige Gesamtsystem. In Bezug auf die steigenden Energiepreise und knapper werdenden Rohstoffe wird fortwährend nach technisch neuen Wegen gesucht, um die konventionellen und energieintensiven Systeme zu überdenken und innovative Lösungen zu entwickeln, die bei gleicher Funktionalität erheblich weniger Energie erfordern. Dies gilt auch für die Kälteerzeugung und hier insbesondere für den Bereich der Raumklimatisierung. Eine Vielzahl von Einflüssen bestimmt den Energieverbrauch und die Höhe des Energierückgewinns bei RLT-Anlagen. Die hohen Energiepreise bedeuten kurze Amortisationszeiten für zusätzliche Aufwendungen zur Energieeinsparung und Energierückgewinnung.

Die Umsetzung der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD, Verordnung 2002/91/EG vom 16.12.2002) erfordert eine Limitierung des Energieeinsatzes für den Betrieb von RLT-Anlagen bzw. einen Energieeffizienznachweis für zu erstellende Anlagen.

Das Kennwertverfahren zur energetischen Bewertung von RLT- und Klima-Kälteanlagen ermöglicht eine zeitsparende Einschätzung der energetischen Effizienz der RLT- und Klima-Kältesysteme unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussparameter. Hierzu sind unterschiedliche Ansätze bekannt. Zum einen werden energetische Kennwerte für einzelne Anlagenkomponenten gefordert. Dieses hat jedoch den Nachteil, dass eine Wertung des eigentlichen Gesamtsystems nicht erfolgen kann. Zum anderen werden die berechneten Energiebedarfswerte mit den Zielwerten verglichen. Das Kennwertverfahren berücksichtigt die am Markt verfügbare Standardtechnologie und enthält ein ausführliches Verfahren zur Bilanzierung nicht berücksichtigten oder neuen Kälteerzeuger. Als wichtigste Einflussgrößen auf die Energiebilanz der Kältetechnik wurden die Teillastregelung der Kältemaschine, die Art der Rückkühlung sowie das Nutztemperaturniveau definiert und mit umfangreichen Anlagenbeispielen dokumentiert. Dieses Verfahren kann allerdings eine detaillierte Simulationsrechnung nicht ersetzen, um z. B. spezielle technische Konzepte, wie Eisspeicher, DEC-Technologie, etc. bewerten zu können.

Das International Institute of Refrigeration (IIR) geht davon aus, dass für Kühltechnologien weltweit ca. 15 % der Elektroenergie verbraucht werden. Das Ergebnis der Europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) ist, dass nun eine Vielzahl von Normen, teilweise in Doppelungen und in der Regel leider ohne gegenseitige Bezugnahme, existiert. Folglich ergibt sich sowohl für den Fachplaner und Anlagenentwickler als auch für den Auftraggeber bzw. Nutzer ein undurchdringliches Regelungsdickicht.

### 3.1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

#### 3.1.1.1 Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen nach DIN V 18599-2

Der Teil 3 der DIN V 18599 wurde aus dem Grund als Bewertungsverfahren eingeführt, weil die Einbeziehung der raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in die energetische Bewertung von Gebäuden Anweisungsunterlagen erfordern, die auch die Aufbereitung der Zuluft innerhalb des Klimagerätes bewerten. Entsprechend der DIN V 18599-2 wird in der Bilanz der Gebäudezone, die zentral auf ein vorgegebenes Temperaturniveau vorerwärmte oder gekühlte Zuluft als Wärmequelle oder Wärmesenke in die Bilanzierung einbezogen. Bei dem ermittelten Heizwärme- bzw. Kühlbedarf handelt es sich somit jeweils um den zusätzlich anfallenden Bedarf in der Gebäudezone der z. B. über statische Heizsysteme oder dezentrale Nacherwärmung oder Nachkühlung gedeckt werden kann. Die Schnittstelle zwischen der DIN V 18599-2 und DIN V 18599-3 wird mit der Zulufttemperatur und mit dem Volumenstrom der mechanischen Lüftung herbeigeführt.

Das monatliche Bilanzverfahren ermöglicht den Einbezug von Kühlung, von raumlufttechnischen Anlagen sowie der Rückkopplung mit gebäudetechnischen Anlagen und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, die Energieeffizienz nicht nur für Wohngebäude, sondern auch für Nichtwohngebäude zu ermitteln. Für die Kältebedarfsberechnung muss die Temperatur in der ungekühlten angrenzenden Gebäudezone über eine Bilanz bestimmt werden. In der DIN V 18599-2 wurde zudem eine neue Formulierung zum »Bagatellfall« bei der Kältebilanz aufgenommen, wonach die Wärmeströme von oder in angrenzende ungekühlte Gebäudezonen nicht zu berücksichtigen sind, wenn in der angrenzenden ungekühlten Gebäudezone die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 eingehalten werden.

Ferner wurde die zur Einstufung der Gebäudedichtheit einer Gebäudezone vorgesehene Kategorie I (zu errichtende Gebäude oder Gebäudeteile, bei denen eine Dichtheitsprüfung und die Einhaltung der Anforderungen an die Gebäudedichtheit nach DIN 4108-7 vorgesehen sind) in die Fälle »Gebäude ohne raumlufttechnische Anlage« und »Gebäude mit raumlufttechnische Anlage« mit den Bemessungswerten  $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$  bzw.  $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$  unterteilt. Abschließend wurden wichtige redaktionelle Änderungen bei der Zusammenstellung der Standardwerte für die Kennwerte von Verglasungen und Sonnenschutzvorrichtungen und der Umrechnung von mittleren Tageswerten von Wärmeeinträgen auf die jeweiligen Betriebszeiten in Anhang C »Maximale Kühlleistung in der Gebäudezone« eingebunden.

#### 3.1.1.2 Energetische Bilanzierung von RLT-Klima-Kälteanlagen nach DIN V 18599-3

Die steigenden Energiekosten und die Anforderungen nach reduzierten CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen bilden die Grundlage, den Energieverbrauch eines Gebäudes auf ein Minimum zu begrenzen. Die Basis zur Umsetzung der Vorgaben liefert die EnEV, die die Grenzwerte für den Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Gebäudeart- und Gebäudenutzung vorgibt. Die EnEV findet Anwendung auf Wohn- und Nichtwohngebäude und bezieht auch RLT- und Klima-Kälteanlagen ein.

Durch das komplexe Berechnungsverfahren bei der Energieeffizienz und die Aushangpflicht des Energieausweises für größere öffentliche Gebäude werden sowohl die zukünftigen Energieausweisersteller als auch die Gebäudeeigner und Investoren von Nichtwohngebäuden vor besondere Herausforderungen gestellt. Aufgrund standardisierter Verfahren und architektonischer Ansätze trägt die 10-teilige Vornormenreihe DIN V 18599 mit dazu bei, dass die Systeme der Bautechnik und die Gebäudetechnische Ausrüstung energetisch miteinander vergleichbar sind.

### 3.1.1.3 Variationen zur Berechnung des Energiebedarfs von RLT-Anlagen

Die Vornormenreihe DIN V 18599 wurde bereits 2005 entwickelt. Im Teil 3 dieser Vornorm wird das Verfahren zur Bestimmung des Energiebedarfs von RLT-Anlagen beschrieben, das auf Simulationsrechnungen für viele verschiedene Anlagentypen basiert und die Ergebnisse über ein Tabellenverfahren darstellt. Die DIN V 18599-3 behandelt den Nutzenergiebedarf für das Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten in zentralen RLT-Anlagen sowie den Energiebedarf für die Luftförderung durch diese Anlagen. Die Bezeichnung »Nutzenergiebedarf« wird an dieser Stelle aus dem Grund verwendet, weil der Energieeinsatz nicht nur der Temperierung von Gebäuden dient, sondern auch der Sicherstellung der Raumluftqualität und der Raumluftfeuchte. Es handelt sich insofern um die erweiterten Nutzungsanforderungen gegenüber den bisher üblichen rein thermischen Betrachtungen. Die Berechnung setzt daher voraus, dass die Grundsätze der Prozessführung bekannt sind und als Basis nachfolgend aufgeführte wesentliche Eingangsgrößen berücksichtigt werden:

- System und Dimensionierung der Energierückgewinnungsanlagen
- Qualität der Feuchteanforderungen
- System des Befeuchtungssystems.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde in der DIN V 18599 eine Matrix von 46 sinnvollen Anlagenkombinationen erstellt, die den überwiegenden Teil der in der Praxis umgesetzten Anlagensysteme abdecken. Das Berechnungsverfahren basiert auf der Umrechnung der tabellierten Energiebedarfskennwerten für diese Variantenmatrix sowie den darauf aufbauenden einfachen Interpolationen und Korrekturen, durch die auch die nachfolgend aufgeführten Einflüsse berücksichtigt werden können:

- frei wählbare Zulufttemperaturen im Bereich von 14 bis 22 °C
- frei wählbare Rückwärmzahlen im Bereich von 0 bis 75 %
- tägliche Betriebszeiten.

Zu beachten ist, dass zwischen in der Vornorm »Energetische Bewertung von Gebäuden«, der DIN V 18599-3 »Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung« und der DIN V 18599-2 »Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen« enge Verknüpfungen bestehen, da der Zuluftvolumenstrom und die Zulufttemperatur in die Gebäudebilanz einfließen. Aufgrund der Kombination beider Normenteile sind die Anforderungen an die raumluftechnischen Grundsysteme detailliert berechenbar, so z. B.

- Quellluftanlagen (Nutzenergiebedarf aus der DIN V 18599-3) mit Kühldecken (Nutzenergiebedarf aus DIN V 18599-2)
- variable Volumenstromanlagen (nach DIN V 18599-3).

Für die Konstant-Volumenstromanlagen kann die Berechnung in einem Jahresschritt von Hand durchgeführt werden. Im Zusammenhang mit den anderen Teilen der Vornormenreihe DIN V 18599 ist auch eine Berechnung auf monatlicher Basis gegeben. Das Monatsverfahren bietet zudem den Vorteil, dass die Eingangsgrößen differenzierter vorgeben werden können.

Zur Berechnung der temperaturgeregelten Variable-Volumenstromanlagen muss im ersten Schritt die Bestimmung der durchschnittlichen und maximalen Monatskühllasten nach DIN V 18599-2 erfolgen.

Aus diesen Vorgebissen werden dann nach der DIN V 18599-3 der durchschnittliche monatliche Luftvolumenstrom und der Ventilatorstrombedarf ermittelt. Mit diesen Ergebniswerten lässt sich letztlich der thermische Nutzenergiebedarf in gleicher Weise wie bei den Konstant-Volumenstromanlagen bestimmen. Zur Bewertung des Energieaufwandes, d.h. zur Berücksichtigung der Wirkungsgrade oder der Kälteerzeugung wird allerdings noch ein zusätzlicher Verfahrensschritt erforderlich, der durch die Anwendung der DIN V 18599-7 »Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klima-Kältesystemen für den Nichtwohnungsbau« erfolgt. Die DIN V 18599 liefert hierzu die Berechnungsgleichungen zur Ermittlung der Maximalleistungen und die näherungsweise zu erwartenden Betriebsstundenzahlen der einzelnen Einbaukomponenten.

Aus den Anhängen A bis D der DIN V 18599-3 ist zu entnehmen, welche Anforderungen an alternative Berechnungsverfahren gestellt werden. Diese können bei ganz speziellen Anlagenschaltungen sinnvoll und notwendig werden.

Mit der gesamten Vornormenreihe DIN V 18599 können die Fachplaner die Berechnung für die Baugenehmigung eines Nichtwohngebäudes durchführen und auch den Energieausweis im Baubestand verlegen. Die KfW-Förderbank vergibt seit 1.1.2007 die Projektunterstützung für die energetische Sanierung öffentlicher Gebäude nach Vorlage eines nach DIN V 18599 berechneten Energieausweises.

In der DIN V 18599-7 wird die Berechnung des Endenergiebedarfs für die Raumlufttechnik und Klima-Kälteerzeugung definiert. Ausgehend vom Nutzenergiebedarf für die Raumkühlung nach DIN V 18599-2 und der Außenluftaufbereitung nach DIN V 18599-3 werden die Übergabe- und Verteilverluste für die Raumkühlung und RLT-Kühlung sowie die RLT-Heizung berechnet und die Randbedingungen für die Komponenten der Raumlufttechnik erläutert.

Aufgrund der sehr umfangreichen Komponenten- und Systemvariationen innerhalb der Raumlufttechnik und Klima-/Kältetechnik wurde hier die Systembewertung in den Vordergrund gestellt. Dies ist für den Nichtwohnbereich ein angemessenes Verfahren, weil in diesem Bereich zum Zeitpunkt der Genehmigungsplanung keine konkreten Produktdaten vorliegen, sondern hier im Prinzip nur ein Konzept über das gewählte System existiert. Diese Vorgehensweise ist daher angemessen, weil der Energiebedarf im Nichtwohnbereich wesentlich durch die geplanten Systeme und Betriebsparameter und weniger durch die konkreten Produkte beeinflusst wird. Als wesentlicher Bestandteil ist die Berechnung des Hilfsenergie-

bedarfs für die Kühl- und Kaltwasserverteilung in der Raumlufttechnik (Wärmerückgewinnung, Befeuchtung und Sekundärventilatoren) sowie bei der Kälteerzeugung (Rückkühlung) und die erforderlichen Nebenantriebe und der Endenergiebedarf zur Kälteerzeugung zu berücksichtigen.

Der Elektroenergiebedarf für die Kühl- und Kaltwasserleitungen hat aufgrund den gegenüber der Heizungstechnik geringeren Temperaturdifferenzen und aufwendigeren Bemessung einen größeren Stellenwert. Aus diesem Grund wurde in der DIN V 18599-7 auf der Basis des Verfahrens nach DIN V 18599-5 ein etwas detaillierteres Verfahren beschrieben, mit dem die wesentlichen Einflussparameter berücksichtigt werden können. Zudem können hiermit auch die verfügbaren Regelkonzepte abgebildet werden und es ist die Berechnung individueller Rohrnetze möglich. Die Berechnung der erforderlichen Endenergie für die Klimakältetechnik erfolgt anhand spezifischer technologie- und nutzungsabhängiger Kennwerte, die tabellarisch zusammengestellt sind. Grundlage für dieses Kennwertverfahren bilden die Nennkälteleistungszahl (EER) und ein mittlerer Teillastfaktor ( $PLV_{av}$ ) auf der Basis stündlicher Berechnungen des Teillastverhaltens der in der Praxis üblicherweise verwendeten Kälteerzeuger. Die Handhabung des Verfahrens ist aus dem Grund vereinfacht, weil hier lediglich diese beiden Werte aus den zur Verfügung gestellten Tabellen für die gewählte Kälteerzeugung ermittelt werden müssen.

Für die nicht dokumentierten Verfahren zur Kälteerzeugung wird ein Stundenverfahren zur Ermittlung der Teillastfaktoren angegeben. Dieses Verfahren ist für Absorption- und Kompressionskältemaschinen dokumentiert und universell einsetzbar.

Zur Bewertung der Dampfbefeuchtungssysteme werden Kennwerte für die einfache Berechnung der Endenergie, in Abhängigkeit von der Konstruktion der Dampferzeuger, angegeben, die die wesentlichen Energieaufwände für die Abschlämmung und Verteilverluste enthalten.

## DIN EN 15251

Die DIN EN 15251 »Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik« legt die Wirkmechanismen und/oder die Kriterien für das Innenklima fest und enthält Angaben dazu, wie sie zu verwenden sind, um der Anwendung der Europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) zu entsprechen. Die Norm legt fest, wie die Eingangsparameter für das Innenraumklima festzulegen sind, die beim Entwurf und bei der Auslegung bzw. bei der Dimensionierung von Gebäudeanlagen sowie bei den Energieeffizienzberechnungen verwendet werden sollen.

Die DIN EN 15251 gilt primär für nicht-industrielle Gebäude, bei denen die Kriterien für das Innenraumklima durch die personelle Nutzung bestimmt werden und bei denen die darin stattfindenden Produktions- oder sonstigen Prozesse keine größeren Auswirkungen auf das Innenraumklima haben. Aus diesem Grund ist die DIN EN 15251 auf die nachfolgend angeführten Gebäudearten anwendbar:

- Einfamilien- und Mehrfamilienwohnhäuser
- Büro- und Verwaltungsgebäude

- Instituts-, Schul- und Hochschulgebäude
- Kliniken und Krankenhäuser
- Hotels und Restaurants
- Sportgebäude
- Verkaufsgebäude.

### 3.1.1.4 Energieeinsparpotenzial durch die Anlagenkomponenten

Die Energieeinsparpotenziale im Bereich der Anlagenkomponenten erstrecken sich hier über:

- Austausch von Ventilatoren, Erneuerung von Antrieben
- elektronisch geregelte Ventilatoren und Pumpen mittels Frequenzumrichter
- Anpassung der Sollluftmengen
- der Einbau von Energierückgewinnungssystemen
- Umstellung von Konstantvolumenstrom auf variable Volumenstromregelung
- Umstellung auf eine mehr am Bedarf orientierte Betriebsweise
- Austausch der Regelungstechnologie.

#### Ventilatorenaustausch

Ein Ventilatorenaustausch reduziert die Energiekosten und verbessert die Raumlufthygiene.

Erfahrungen haben gezeigt, dass durch Verwendung neuerer an das Anlagensystem angepasster Ventilatoren der Gesamtwirkungsgrad einer RLT-Anlage um bis zu 50 % verbessert werden kann. Die neueren Ventilatorbauarten haben einen wesentlich besseren Wirkungsgrad als die älteren Systeme. Die früher verwendeten Keilriemen haben den Nachteil, dass durch die Drehbewegung und durch die mechanische Beanspruchung Abrieb entsteht, der einerseits zur Zerstörung des Keilriemens führen kann und andererseits zur Verschmutzung der RLT-Anlage bzw. des Luftverteilssystems. Diese Nachteile können durch die Verwendung von Flachriemenantrieben weitestgehend vermieden werden. Zudem haben Flachriemen gegenüber den Keilriemen einen deutlich höheren Wirkungsgrad und eine bis zu 5-fach längere Standzeit.

#### Konventionelle Methoden zur Leistungsanpassung

Vergleich der verschiedenen Regelungsmöglichkeiten von Ventilatoren:

- Bypass-, Drossel- und Drallregelungen ändern 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 jedoch aufgrund der reduzierten Betriebskosten bereits innerhalb weniger Monate. Z. B. benötigt ein Ventilatorantrieb bei halber Förderleistung nur ein Achtel der Energie wie beim Vollastbetrieb. 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.

Abhängig vom Außenklima und der Raumnutzung verändern sich die Raumtemperatur, Raumluftfeuchte und die Raumluftqualität. Um diese Lastschwankungen auszugleichen, benötigen RLT-Anlagen eine spezielle Regelungstechnik. Druck-, Differenzdruck-, Volumenstrom-, Temperatur- und Feuchtemessungen dienen hierbei als Regelgrößen. Welche Art der Regelung verwendet wird, muss jeweils nach anlagentechnischen und wirtschaftlichen Aspekten entschieden werden.

Aufgrund der innovativen Entwicklung in der Mikro- und Leistungselektronik stehen derzeit spezielle Drehzahlregler als Frequenzumrichter zur Verfügung, mit denen sich die elektrische Leistung eines Elektromotors (Asynchronmotor) innerhalb eines großen Arbeitsbereichs verändert. Durch diese einfache Ventilatordrehzahlanpassung, lassen sich die Luftmengen energieeffizient an den jeweiligen Bedarf anpassen. Konventionelle Volumenstromregelungen, wie sie noch im großen Umfang in den bestehenden RLT-Anlagen vorzufinden sind, arbeiten über Dralldrosseln oder Drallregler und sind reine Energievernichter.

### **Drehzahlregelung mittels Frequenzumformer**

Da die Ventilatoren in der RLT- und Klima-Kältetechnik oft mit hoher Einschaltzeit betrieben werden, machen sich hier Energieeinsparungen, z. B. aufgrund eines hohen Motorwirkungsgrades, deutlich bemerkbar. In vielen Anwendungsfällen werden heute für die Ventilatoren Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufer eingesetzt. Dieses Motorprinzip hat sich nicht nur seit seiner Erfindung im Jahre 1889 bewährt, sondern zeichnet sich durch den robusten und im Prinzip verschleißfreien Aufbau aus.

Im Bereich der kleineren Leistungen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Drehzahlstellung von Asynchronmotoren verwendet. Die traditionellen Schlupfsteuerungen können jedoch den heutigen Anforderungen an einen Antrieb im kW-Bereich nicht mehr gerecht werden. Als Stand der Technik werden daher Frequenzumrichterbetriebe (FU-Betrieb) eingesetzt.

Eine wesentliche Voraussetzung zur verbrauchsmäßigen Anpassung bzw. zu einer variablen Betriebsweise und damit zur Reduzierung des Energieverbrauchs ist der Einsatz von Frequenzumrichtern zum Betrieb von

- Brandgas-, Entrauchungs- und RLT-Ventilatoren
- Kühlurmventilatoren
- Kältemittelverdichtern
- Luftherwärmer- und Kühlwasserpumpen.

## **Elektromotoren mit optimiertem Wirkungsgrad**

Zum Betrieb der Ventilatoren werden in der Regel preiswerte Energiesparmotoren als Asynchronmotoren, mit Wirkungsgraden von 73 bis 89 % bei Leistungen von 0,75 bis 15 kW verwendet. Diese Motoren wurden in den letzten Jahren hinsichtlich der verwendeten Materialien, ihrer mechanischen, magnetischen und elektrischen Eigenschaften laufend optimiert. Die Motoren erfüllen die aktuellen internationalen Normen und zeichnen sich zudem durch die hohe Betriebssicherheit, verlängerte Wartungsintervalle, hohe Überlastreserven im Dauerbetrieb sowie durch eine längere Lebensdauer aus.

Die etwas erhöhten Investitionskosten gegenüber einem konventionellen Elektromotor amortisieren sich bereits nach wenigen Monaten. Da handelsübliche Elektromotoren nur in festgelegten, normierten Abstufungen gefertigt werden, ist für die Anpassung an die benötigte Luftfördermenge ein Riemenantrieb erforderlich. Mit Leichtmetallriemenscheiben lassen sich sehr feine Abstufungen bei geringster mechanischer Belastung erzielen. Diese Anpassung ist wichtig, um eine energievernichtende Leistungsdrosselung im Luftkanalnetz zu vermeiden.

## **Wärmerückgewinnung**

Beim leistungsgeregelten Enthalpiewärmeübertrager wird der erzielbare Jahreswärmerückgewinn von der Fortlufttemperatur nur unbedeutend beeinflusst, da zu mehr als 90 % der Betriebszeit innerhalb der Heizperiode der Austauschwirkungsgrad dieses Wärmerückgewinners ohnehin heraufgeregelt wird. Die Fortlufttemperatur hat in diesem Fall daher im Wesentlichen nur einen Einfluss auf die Auslegung des Wärmerückgewinners. Geeignet sind hierfür Regenerativ- und Rekuperativwärmeübertrager. Die Vor- und Nachteile dieser Systeme sind umfangreich, doch lassen sich einige grundsätzliche Unterschiede herausstellen, die den erzielbaren Jahresenergierückgewinn wesentlich beeinflussen.

## **Einfluss der Befeuchtungsart**

Mit einer Dampfbefeuchtung lässt sich generell ein höherer Jahreswärmerückgewinn erreichen als dieses mit einer Wässcherbefeuchtung möglich wäre. Mit einem Enthalpiewärmeübertrager lassen sich im Jahresmittel, bei einer Taupunktanlage mit Wässcherbefeuchtung, ca. 50 % der Fortluftenthalpie zurückgewinnen. Randbedingungen: Raumluftzustand 22 °C, 45 % r. F., Fortlufttemperatur 24 °C. Bei einer Nichttaupunktanlage mit Dampfbefeuchtung beträgt dieser Anteil annähernd 80 %, wenn die mittlere Zulufttemperatur in der Heizperiode bei 20 °C liegt. Analog verhalten sich die Verhältnisse bei Temperaturübertragern.

Der jährlich erzielbare Wärmerückgewinn ist hier beim Einsatz einer Dampfbefeuchtung ebenfalls höher. Allerdings nur für den Fall, dass die Zulufttemperatur nicht zu extrem niedrig liegt. Eine Ausnahme bildet die geregelte Wässcherbefeuchtung. Hier kann der Austauschwirkungsgrad des Wärmerückgewinners sogar über die Zulufttemperatur hinaus genutzt werden, d. h. der Wärmerückgewinner kann die Ergebnisse einer Dampfbefeuchtung noch übertreffen.

## **Wärmerückgewinn durch die Beleuchtungswärme**

Bei einem leistungsgeregelten Enthalpiewärmeübertrager mit Wässcherbefeuchtung hat die Beleuchtungswärme keinen Einfluss auf den Jahreswärmerückgewinn. Hier ist nur ein Ein-

fluss auf die Auslegung des Wärmerückgewinners gegeben und nur auf die geringen Jahresstunden mit sehr tiefen Außentemperaturen. Wenn jedoch der Enthalpiewärmeübertrager mit einer Dampfbefeuchtung kombiniert wirkt, dann wirkt sich die Beleuchtungswärme bezogen auf den Jahreswärmerückgewinn sogar nachteilig aus.

Die o. a. Kriterien gelten jedoch nur unter der Bedingung, dass der Enthalpiewärmeübertrager den jährlichen Vorwärmerwärmeverbrauch voll abdeckt. Diese Randbedingung trifft in der Regel auch für die Anwendungsfälle zu. Hierbei können die wenigen Jahresstunden mit sehr tiefen Außentemperaturen unbeachtet bleiben, da 98 % des Vorwärmerwärmeverbrauchs auf die Außenluftzustände mit positiver Enthalpie entfallen.

Bei einem Temperaturwärmeübertrager in Kombination mit einem Wäscherbefeuhter wirkt sich die Beleuchtungswärme in jeder Hinsicht positiv aus. Der Grund liegt darin, dass hier eine Leistungsregelung des Wärmerückgewinners viel später einsetzt, sodass im Falle von eingeschalteter Beleuchtung die maximale Aufwärmzahl des Wärmerückgewinners über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann. Analog verhält es sich auch bei einem Temperaturübertrager in Kombination mit einer Dampfbefeuchtung. Die Beleuchtungswärme kann hier ebenso für den Jahreswärmerückgewinn genutzt werden.

### **Einfluss der Raumfeuchte**

Unter der gleichen Voraussetzung, dass 98 % des jährlichen Vorwärmerwärmeverbrauchs vom Enthalpiewärmeübertrager zurückgewonnen werden können, d. h., dass nur der Nachwärmerwärmeverbrauch zu erbringen ist, lässt sich feststellen, dass dieser Nachwärmerwärmeverbrauch bei einer Raumluftfeuchte von 50 % r. F. kleiner ist als bei 40 %.

In der Praxis bedeutet dieses, dass hier ca. 10 % mehr an letztlich aufzubringender Wärme für den Raumluftzustand 22 °C/40 % r. F. gegenüber 22 °C/50 % r. F. benötigt wird. Insofern wird ein angehobener Komfort sogar billiger als teurer. Analog verhält es sich mit einer Einschränkung bei einem Temperaturwärmeübertrager in Verbindung mit einer Wäscherbefeuhtung.

Die Einschränkung liegt darin begründet, dass hier im allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Vorwärmerwärmeverbrauch voll rückgewinnbar ist, sodass bei einer höheren Raumluftfeuchte auch ein größerer Anteil dieses Vorwärmerwärmeverbrauchs zusätzlich aufgebracht werden muss. Der in jedem Fall aufzubringende Nachwärmerwärmeverbrauch wird natürlich auch hier mit zunehmender Raumluftfeuchte geringer, sodass letztlich der Jahreswärmeverbrauch mit zunehmender Raumluftfeuchte nur noch unwesentlich ansteigt.

Beim Einsatz einer Dampfbefeuchtung sind die Verhältnisse wieder einfacher darzustellen. In diesem Fall steigen bei höheren Raumluftfeuchten auch wieder die Energiekosten an.

Letztlich steigen auch die Energiekosten für den Fall des Einsatzes eines Temperaturwärmeübertragers in Kombination mit einem Dampfbefeuhter bei einer Erhöhung der Raumluftfeuchte an.

### **Fensterabsaugung**

Der Einfluss einer Fensterabsaugung auf eine zusätzliche Wärmerückgewinnung ist stark von der Gebäudegestaltung und vom gewählten Anlagensystem abhängig. Daraus folgt, dass

eine Fensterabsaugung nur dann eine optimale Wirtschaftlichkeit erreicht, wenn zum Gebäudegrundriss (Innenzonenanteil), zur Fensterausführung, dem Sonnenschutz sowie der Raumnutzung auch anlagentechnisch die geeignete Befeuchtungsart und das zugeordnete Wärmerückgewinnungssystem ausgewählt wurden.

Beim Einsatz einer Dampfbefeuchtung kann sich eine Fensterabsaugung, d. h. eine etwas niedrigere Fortlufttemperatur, vorteilhaft auswirken, vor allem bei Gebäuden mit einer ganzjähriger Kühllast (hohe Innenlasten). In diesem Fall liegt die Zulufttemperatur niedriger und die wärmere Fortluft der Innenzonen verhindert, dass sich die Gesamtfotluft durch die Fensterabsaugung extrem abkühlt.

### **Energieeffizienzklassen für RLT-Geräte**

Die Anforderungen an einen effizienten und komfortablen Gesamtprozess stellen zunehmend neue Herausforderung an die Hersteller der RLT-Geräte. Die Reduzierung der Betriebskosten von zentralen und dezentralen RLT-Klima- und Kältesysteme zählen zu den primären Aufgaben bei den Innovationen der Geräte und deren Einbaukomponenten. Hierbei bilden insbesondere die Betriebskosten (Energiekosten, Wartung, etc.) den Hauptanteil an den gesamten, im Laufe der Produktlebensdauer, d. h. die Lebenszykluskosten (LCC, Life-Cycle-Costs) anfallenden Kosten dar. Einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines RLT-Geräts haben u. a.:

- ein größerer Gerätequerschnitt und die daraus resultierenden niedrigeren Luftgeschwindigkeiten bei der Durchströmung der Einbaukomponenten
- konstruktive Gestaltung der Ventilatoren mit einer hohen Effizienz (Freiradläufer)
- Antriebsmotoren mit einem hohen Wirkungsgrad EFF1 oder EFF2
- Einbaukomponenten (Wärmeübertrager, Luftfilter, etc.) mit geringen Druckverlusten in Verbindung mit der nach der VDI-6022, Hygienerichtlinie (Hygieneinspektion mit optimaler Reinigungs- und Wartung.
- Bypass-Schaltungen für (temporär) nicht genutzte Komponenten
- hochwertige Energierückgewinnung
- bedarfsgerechte und intelligente MRS-Technologie.

Der Einsatz von energiesparenden Antriebs- und Wärmerückgewinnungssystemen reduziert die anfallenden Betriebskosten für Strom, Wasser, Wärme und Klimakälte und schützt indirekt auch die Ressourcen zur Energieerzeugung. Zudem vereinfachen die intelligenten Steuer- und Regelsysteme den Service und die Wartung. Der Trend geht zunehmend zu kommunikationsfähigen MSR-Systemen mit erweiterter Flexibilität zur Einsatzplanung des Service-Personals, Fernwartung und Überwachung per GLT-Netzwerke mit LON und GSM Interface für Störmeldungen, z. B. per Modem auf Handy oder über Internet als Web-Interface (Web-Site der Anlagenerrichter und Produkthersteller) für Bedienung, Überwachung und Wartung der Anlage. Zudem ermöglichen diese MSR-Systeme einen ganzjährig energiesparenden Betrieb.

Mit der Einführung der Energieeffizienzklassen reagiert der Herstellerverband Raumlufttechnische Geräte e. V. auf die steigenden Anforderungen im Bereich der rationellen Energieverwendung und der Energieeffizienz im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung. Die aktuellen Normen und Richtlinien sieht der Verband jedoch als nicht ausreichend an, da z. B. der DIN EN 13779 in Bezug auf den Energieverbrauch einer Lüftungsanlage der SFP-

Wert (Specific Fan Power) zugrunde liegt. Dieser Wert bietet aber keine Aussage über die Qualität eines zentralen RLT- oder Klimagerätes.

Mit den neuen Energieeffizienzklassen werden somit für den Nutzer deutlich aussagekräftigere Parameter und Kriterien dargestellt. Um die Effizienz eines RLT-Geräts zu bewerten, wurden früher die SFP-Werte; d. h. die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilatormotors dividiert durch den Nennluftvolumenstrom) herangezogen, die jedoch als Basis für den Betrieb eines energieoptimierten RLT-Geräts keine große Hilfe darstellte. Der SFP-Wert ermöglicht keinen Vergleich von Geräten mit unterschiedlichen Abmessungen, größeren und kleineren Ventilatoren, unterschiedlichen Filterbauarten oder die Güte der Wärmerückgewinnungssysteme, sondern beschränkt sich auf die Energieaufnahme des Ventilators. Aus diesem Grund bieten sich zur Beurteilung der Energieeffizienz eines RLT-Geräts entweder eine Klassifizierung nach EUROVENT oder nach den Energieeffizienzklassen in der RLT-Richtlinie 01 »Allgemeine Anforderungen an Raumlufttechnische Geräte« des Herstellerverbands RLT-Geräte e. V. an.

### **Maßnahmen zur Reduzierung der Betriebskosten**

- Niedrige Luftgeschwindigkeiten im Zentral-RLT-Gerät: Daraus resultieren niedrigste SEP-Werte  $< 2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  und eine optimale luftseitige Wärmeübertragung, insbesondere im Kühlregister.
- Antriebsprinzip des freilaufenden Rades mit grundsätzlicher Regelfähigkeit über einen Frequenzumformer: Daraus resultieren höchste Energieeinspartenziale, keine Antriebsriemenverluste, ausgewogene und gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung, in Strömungsrichtung nach der Laufradebene, die eine Anordnung der Wärmeübertrager und weiterer Einbaukomponenten auf der Druckseite begünstigt, Verzicht auf druckseitige Filterstufe und deren Druckverluste.
- Wärmerückgewinnung über Rotationswärmeübertrager mit einem Wärmerückgewinnungsgrad bis zu 85 %, in Kombination mit niedrigen luftseitigen Druckverlusten und geringerem Stromverbrauch des Ventilators.
- Leistungsfähige, energiesparende Steuerung sowie Regelung mit umfangreichen Funktionen zur Reduzierung der Betriebskosten.

### **Beurteilung der Energieeffizienz von RLT-Geräte nach der EUROVENT-Zertifizierung**

Die Einordnung der RLT-Geräte in Energieeffizienzklassen macht es für den Architekten, Bauherrn, Investor, Fachplaner, etc. leichter, in mehr oder weniger sparsame Geräte zu unterscheiden. Zu beachten ist jedoch, dass die Klassifizierung nach EUROVENT oder dem Herstellerverband RLT-Geräte einen breiten Spielraum zulässt. Aus diesem Grund sollten, auch im Falle der Klasse A-Geräte der Energiebedarf und die Lebenszykluskosten genau untersucht werden.

Die EUROVENT-Zertifizierung bietet eine verlässliche Aussage über die Leistungsdaten eines RLT-Gerätes, wobei eine Unterteilung nach den Energieklassen A, B und C erfolgt. Bei der Festlegung der Energieeffizienzklassen A und B werden die wichtigsten Faktoren berücksichtigt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz eines RLT-Gerätes haben. Dieses sind die Luftgeschwindigkeit innerhalb des Gerätes, die elektrische Leistungsauf-

nahme des Ventilators in Abhängigkeit vom Volumenstrom und der Druckerhöhung sowie die Qualität der Wärmerückgewinnung in Abhängigkeit von der Rückwärmezahl und dem Druckverlust.

Die Energieklasse A steht für die beste Bewertung und die Energieklasse B entspricht ungefähr dem heutigen technisch möglichen Standard. Hierbei werden neutrale TÜV-Messungen an RLT-Geräten durchgeführt und mit den vom Hersteller angegebenen technischen Daten in Bezug auf Luftpumpe, Drücke, elektrische Leistungsaufnahme, Wärme- und Kälteleistung, Wärmerückgewinnungsgrade, usw. verglichen. Nur wenn die geprüften Daten im entsprechenden Toleranzbereich mit den Herstellerangaben liegen, dürfen die Gerätehersteller das EUROVENT-Zeichen führen.

**Tab. 3-1:** Energieeffizienzklassen für RLT-Geräte (Quelle: IB-THEISS, München)

RLT-Geräteausführung	Energieeffizienzklasse	
ohne thermodynamische Luftbehandlung	V4	V5
mit Luftherwärmung	V3	V4
mit sämtlichen Funktionen < 3 m <sup>3</sup> /s	V3	V4
mit sämtlichen Funktionen > 3 m <sup>3</sup> /s	V2	V3
Elektrische Leistungsaufnahme Ventilator (P <sub>Input max.</sub> )	0,95	1,0
Wärmerückgewinnung (4.000 < 6.000 h/anno)	H2	H3

Die Energieeffizienzklassen nach RLT-Richtlinie 01 basieren auf einer ähnlichen Einteilung wie die der EUROVENT-Struktur, verzichtet jedoch auf die Klasse C, weil nach EUROVENT in C eingestufte Geräte keinerlei Anforderungen erfüllen müssen. Beiden Systemen ist gemeinsam, dass sie die Effizienz anhand nachfolgender Kriterien bewerten:

- Luftgeschwindigkeit im Gerätequerschnitt
- elektrische Leistungsaufnahme des Ventilatormotors
- Güte der Wärmerückgewinnung.

Aufgrund dieser Kriterien wird auch die Funktion des Geräts mit einbezogen, sodass die Einbaukomponenten, wie Wärmeübertrager, etc. bei der Klassifizierung berücksichtigt werden.

Ein B-Label erhalten nur die Geräte, die bei allen drei Kriterien mindestens eine B-Wertung erreichen; in die A-Klasse kommen nur RLT-Geräte, die in sämtlichen Punkten eine A-Wertung verdienen.

### **Neue Anforderungen an die energetische Effizienz der Klimaanlagen**

Nach § 12 EnEV müssen an Klimaanlagen mit einer Kälteleistung über 12 kW verpflichtend energetische Inspektionen durchgeführt und die Bescheinigung darüber der zuständigen Behörde vorgelegt werden. Die Verpflichtung zur energetischen Inspektion besteht generell für sämtliche Anlagen, die seit dem 1. 10. 2007 errichtet wurden, nach Ablauf des zehnten auf die Inbetriebnahme folgenden Jahres. Bereits vorher bestehende Anlagen sind nach fest vorgeschriebenen Übergangsfristen zu inspizieren. Dementsprechend mussten sämtliche Anlagen, die älter als 20 Jahre sind, bis zum 30. 10. 2009 inspiziert sein. Zusammen-

fassend gelten nach § 12 EnEV zur energetischen Inspektion von Klimaanlagen nachfolgend aufgeführte Einzelfristen:

- Neue und am 1. 10. 2007 max. 4 Jahre alte Anlagen:
  - erstmals im 10. Jahr nach der Inbetriebnahme
  - wiederkehrende Prüfung der Anlage alle 10 Jahre.
- Ältere Anlagen, nicht mehr als
  - 4 Jahre alte Anlagen: Prüffrist bis zum 30. 9. 2013
  - 12 Jahre alte Anlagen: Prüffrist bis zum 30. 9. 2011
  - 20 Jahre alte Anlagen: Prüffrist bis zum 30. 9. 2009.

Zudem sind in der EnEV der Umfang nach der Durchführung der Inspektion und der zugelassene Personenkreis klar geregelt. Die energetische Inspektion sollte nicht als Selbstzweck verstanden werden, denn mit der Umsetzung von Verbesserungsvorschlägen aus einer energetischen Inspektion werden auch ökonomische Vorteile erreicht. Die Reduzierung des Energieverbrauchs durch entsprechende Maßnahmen eröffnet dem Betreiber eine kurzfristige Rentabilität der Investition und die langfristige Verringerung der Betriebskosten.

Hinweis: Auf der Basis der Europäischen Inspektionsnormen DIN EN 15239 und DIN EN 15240 ergibt sich ein über die energetische Untersuchung hinausgehender Leistungsumfang. Hierbei bleiben wichtige Aspekte der Anlagenenergetik unbeachtet.

### **Energieeffiziente Kaltwasserverteilung**

Große Kältesysteme oder nicht optimierte bzw. unsachgemäß ausgeführte Kaltwasserverteilungen können den Energieaufwand der Kälteanlage erheblich erhöhen.

Die in Deutschland installierte Kälteleistung wird primär durch indirekte Systeme, d. h. Wasserkühlsätze, zur Verfügung gestellt. Entsprechend der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden müssen seit Januar 2006 für Neubauten, zu verkaufende oder zu vermietende Gebäude Energieausweise erstellt werden.

Auf nationaler Ebene, d. h. in Deutschland wird zur Ermittlung des Energieaufwands von Nichtwohngebäuden auf die DIN V 18599-7 zurückgegriffen, mit der es dem Anwender ermöglicht wird, den jährlichen Energiebedarf zur Kaltwasserverteilung auf der Basis des Gebäudelastprofils zu berechnen. Je nach Ausführung der Anlage kann die Pumpenarbeit bei gleicher Aufgabenstellung um den Faktor 2 bis 3 variieren. Die größten Einsparpotenziale liegen in der korrekten Abstimmung des Gesamtsystems. So spielt z. B. die Auswahl der regulierten Kältemaschine eine erhebliche Rolle.

Die Möglichkeit den Volumenstrom über den Verdampfer variieren zu können, vereinfacht den Aufbau der Kaltwasserverteilung, reduziert den Energieaufwand der Kaltwasserverteilung und schafft die Voraussetzung für ein stabiles Regelverhalten der Gesamtanlage mit konstanter Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf. Bei einem sorgfältig geplanten und bedarfsoorientiert geführten Kaltwassersystem hat der Energieaufwand der Kälteverteilung hinsichtlich der Kälteerzeugung bei Anlagen unter 500 kW einen Anteil von unter 20 % und bei Anlagen über 500 kW unter 30 %. Zudem ist die Strategie zur Optimierung des Gesamtsystems die Abkehr vom angebots- zum bedarfsgeführten Betrieb der Anlage durch die Verlagerung der Pumpen von der zentralen Versorgung zu den dezentralen Strän-

gen. Dieses Konzept führt primär bei Systemen mit ausgeprägten Lastprofilen stets zu einer Reduktion des energetischen Aufwandes. Mit der DIN V 18599-7 besteht die Möglichkeit die unterschiedlichen Konzepte bereits in der Planungsphase zu prüfen. Die fachgerechte Ausführung des hydraulischen Rohrnetzes und der energieoptimierte Pumpenbetrieb der Gesamtanlage werden hierbei, bezogen auf die Energieeffizienz des Gebäudes, positiv bewertet.

### Hydraulischer Abgleich

Mit der Auslegung des hydraulischen Abgleichs wird die Basis eines energieeffizienten Betriebs gelegt. Um einen ganzjährig energieeffizienten Betrieb zu garantieren, muss die Planung über die Betrachtung des Volllastbetriebs hinausgehen. Die hydraulischen und regelungstechnischen Konzepte müssen bereits in der Planung so konzipiert werden, da sich in der Praxis Betriebszustände mit bis zu 95 % im Teillastbereich erstrecken.

Für den Fall, dass diese Kriterien nicht betrachtet werden, wird für die Kaltwasserverteilung über das Jahr ein zu hoher Energieaufwand entstehen. Die Ursachen liegen in den Drosselverlusten, Überströmungen und in der nicht adaptierbaren Pumpenleistung. Zudem wird sich neben dem überhöhten Energieaufwand auch eine regelungstechnisch nicht einwandfreie Betriebsweise einstellen. Als Folge können die thermische Behaglichkeit reduziert werden, eine erhöhte Geräuschentwicklung auftreten und ein überhöhter Anlagenverschleiß auftreten.

Ein entscheidendes Kriterium bildet die Kaltwasserhydraulik auf den Betrieb der Kälteanlage. Auf den Anlagenbetrieb wirken sich überdimensionierte und unsachgemäße an den Lastfall adaptierte Hydrauliken durch häufiges Taktieren der Kälteanlage, Schwankungen der Raumtemperatur und überhöhte Strömungsgeräusche aus. Durch den fehlenden hydraulischen Abgleich, Einbeziehung von Sicherheitsreserven und überdimensionierte Pumpen bewegt sich der Pumpenbetrieb weit außerhalb des Nennbetriebspunkts. Dieses führt in der Praxis dazu, dass die installierte Pumpenleistung bis zum Faktor 2 oberhalb des erforderlichen Bedarfs liegen kann.

### Anlagenbetrieb bei indirekter Kühlung

In der Vergangenheit standen dem Fachplaner nur unzureichende Möglichkeiten zur Abschätzung des zu erwartenden jährlichen Energiebedarfs für die Kaltwasserverteilungen zur Verfügung. Unter Zugrundelegung der DIN V 18599-7 können die wesentlichen Parameter mit einem Einfluss auf den Energiebedarf der Kühl- und Kaltwasserverteilung, auf der Basis des Gebäudelastprofils und der jeweiligen Anwendung berücksichtigt werden.

Neben der Pumpendimensionierung entscheiden die jährliche Betriebszeit und die Möglichkeit der Leistungsregelung über den zu erwartenden Energieaufwand. Die Pumpenbetriebszeit innerhalb der Verteilkreise ist vom Anlagenkonzept abhängig und kann größer sein als die Bedarfszeit zur Kühlung des Gebäudes. Dieses ist z. B. auch dann der Fall, wenn die technischen Voraussetzungen zur bedarfsgesteuerten An- und Abschaltung der Pumpen nicht gegeben sind bzw. wenn eine permanente Kältebereithaltung in Verbrauchernähe gefordert wird. Für die Betriebszeit kann zwischen bedarfsgesteuertem, intermittierendem, saisonalem und ganzjährigem Betrieb der Kaltwasserverteiltelpumpen unterschieden werden. Ein erhebliches Optimierungspotenzial wird dadurch erreicht, dass die DIN V 18599-7 auf-

grund der ganzheitlichen Betrachtung des Gebäudes die monatlichen Zeiten mit Kühlbedarf und die erforderliche monatliche Kühlarbeit liefert.

### Betriebsweisen der Kaltwasserverteilpumpen

- *Bedarfsgesteuerter Betrieb:* Die Pumpenlaufzeit (1.280 h/a) entspricht genau der Zeit des Kühlbedarfs innerhalb des Gebäudes bzw. der Klimaanlage. Vollautomatische An- und Abschaltung der Pumpen unter Beachtung des aktuellen Kühlbedarfs, z. B. durch Kältemaschinen, Regelverfahren oder Automatisierung.
- *Intermittierender Betrieb:* Die Pumpenlaufzeit (2.250 h/a) erfolgt unter Einbeziehung der Nacht- und Wochenendabschaltung sowie durch eine Pumpenabschaltung in den Monaten ohne Kühlbedarf. Externe An- und Abschaltung der Pumpen, z. B. durch eine Zeitschaltung oder Gebäudeautomatisierung.
- *Saisonaler Betrieb:* Die Pumpen werden zu Beginn der Kühlperiode ein- und zum Ende der Kühlperiode ausgeschaltet, wobei sich eine Betriebszeit von ca. 5.150 h/a summiert.
- *Ganzjähriger Betrieb:* Bei einer ganzjährigen Betriebsweise summiert sich die Betriebszeit auf 8.760 h/a.

Mit einer anteiligen Pumpenarbeit von 5 bis 15 % wird die Jahreskälteleistungszahl von 3,5 für die Kältemaschine auf 3,3 bis 3,0 für die Gesamtanlage reduziert. Hierbei wirkt sich auch die Möglichkeit den Volumenstrom über den Verdampfer variieren zu können positiv auf die Pumpenarbeit aus. Bei der Dimensionierung von Anlagen mit einer thermischen Leistung bis 30 kW wirkt sich auch die Auswahl des Pumpentyps entscheidend aus.

Bei Volumenströmen unter 4 m<sup>3</sup>/h und eine Druckdifferenz über 100 kPa sollte eine mehrstufige Kreiselpumpe eingesetzt werden, da der Einsatz einer einstufigen Kreiselpumpe zwangsläufig zu einer Überdimensionierung führen würde. Die Pumpe arbeitet dann sehr weit links in der Kennlinie, d. h. in einem Bereich außerhalb des optimalen Wirkungsgrads. Je größer die Systeme, desto größer wird die anteilige Pumpenarbeit. Der Grund dafür liegt zum einen in der höheren spezifischen Pumpenleistung, die aus den größeren Druckverlusten infolge der längeren Rohrleitungsnetze resultiert. Zum anderen sind in großen Gebäuden auch bei niedrigen Außentemperaturen deutlich längere Betriebszeiten zu erwarten.

## 3.2 Optimierungsproblematiken

### 3.2.1 RLT-Anlagenoptimierung

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

Bei der Inspektion einer raumluftechnischen Anlage (RLT- und Klimaanlage) lassen sich die gezielten Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen erst anhand des Inspektionsberichtes sinnvoll durchführen. Zur Inspektion gehören gemäß VDMA 24 176 die Einzelmaßnahmen Prüfen, Messen und Beurteilen. Die Inspektion hat im Bedarfsfalle Wartung einschließlich Reinigung bzw. auch Instandsetzung zur Folge. Nach VDI 3801 sollte mindestens einmal jährlich eine Zustands- und Funktionsprüfung sowie Luftmessung erfolgen. Die messtechnische

Überprüfung betrifft vor allem die Anlagenparameter (Abschnitt 9.2.1), wobei das Hauptaugenmerk auf der Kontrolle der Luftvolumenströme liegen sollte. Die Inspektionen werden häufig erst nach Vorliegen von Fehlermeldungen durchgeführt, was auf Dauer zu unbefriedigend arbeitenden Anlagen führen kann. Das betrifft vor allem Anlagen, bei denen die Nutzer zur Selbsthilfe gegriffen haben, ohne dass es der Anlagenbetreiber wahrnimmt. Gründe für ein solches Verhalten sind zu hohe Geräuschpegel, tatsächlich oder eingebildete Zugluftbelästigungen bzw. vermeintlich zu hohe Elektroenergiokosten für die Ventilatorantriebe.

Das Ziel einer Raumlufttechnischen Anlagenoptimierung besteht darin, im Verlauf von Modernisierungmaßnahmen eine Senkung der Betriebskosten und dadurch auch eine Reduzierung des Energieverbrauches zu erreichen. Eine Anlagenoptimierung lohnt sich daher stets sowohl aus betriebswirtschaftlichen Gründen als auch aus Umweltbetrachtungen. Es empfiehlt sich jedoch für die jeweils konkrete Anwendung eine ganzheitliche Betrachtung der RLT-Anlagen unter Beachtung der relevanten Regelwerke vorzunehmen. Die Energiekennzahl für lufttechnische Anlagen nach DIN EN 13 779: 2004-01 ermöglicht den Vergleich von ähnlichen Anlagen oder Ventilatorsystemen. Die spezifische Ventilatorleistung (SFP, d. h. Specific Fan Power) wird hierbei wie folgt ermittelt:

$$SFP = 2 \cdot \frac{P_{ZUL} + P_{ABL}}{q_{V-ZUL} + q_{V-ABL}} \cdot \frac{W}{\left(\frac{m^3}{s}\right)}$$

Darin bedeutet:

$P_{ZUL}$ : Motoreingangsleistung (W) für den Zuluftventilator

$P_{ABL}$ : Motoreingangsleistung (W) für den Abluftventilator

$q_{V-ZUL}$ : Zuluftstrom ( $m^3/s$ )

$q_{V-ABL}$ : Abluftstrom ( $m^3/s$ )

$$P_{ges} = P_{ZUL} + P_{ABL}$$

$$q_{Vges} = \frac{q_{V-ZUL} + q_{V-ABL}}{2}.$$

In Großbritannien, der Schweiz und Schweden ist bereits für Neuanlagen und Sanierungen die einzuhaltende spezifische Ventilatorleistung (SFP) vorgeschrieben. Es lohnt sich daher die SFP ab Motorenleistungen von 5,0 kW zu beachten. Da die Leistung zum Quadrat ein geht, kann hier z. B. bei einem 24 h-Betrieb ein entsprechendes Einsparungsvolumen von 30% = 1,5 kW erreicht werden. Nach VDI 3809 darf die maximale Luftgeschwindigkeit innerhalb der RLT-Geräte in Abhängigkeit von den Betriebsstunden nachfolgend aufgeführte Werte nicht überschreiten.

Mit der EU-Richtlinie 2002/91 wird eine einheitlicher »Energiepass« für sämtliche Neu- und Altbauten gefordert, der folgende Bereiche erfasst:

- Energiebedarfsgrenzwerte für Neubauten
- Energiebedarfsgrenzwerte für renovierte große Gebäude
- Energieausweise für sämtliche Gebäude zur allgemeinen Einsicht
- Schaffung von Bewertungsregeln für Gebäude, die auch eine Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beinhalten
- regelmäßige Überprüfung der Effizienz von Wärme- oder Kälteerzeugern.

Derzeit liegen zwei Varianten der Energiepasskennzeichnung vor:

1. Vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) erfolgt die Kennzeichnung mittels zweier Label mit neun farblich gekennzeichneten Klassen von A bis I, die analog zu den Elektrogeräten Kühlschrank, Waschmaschine, Elektroherd, etc. gestaltet sind.
2. Seitens der Deutschen Energieagentur (dena) erfolgt die Kennzeichnung mit einem farblichen Label ohne Klasseneinteilung.

Zur Optimierung der RLT-Anlage sind zudem die konstruktiven Eigenschaften der Ventilatoren zu berücksichtigen:

- Laufrad mit rückwärtsgekrümmten Hohlprofilschaufeln, mit Direktantrieb oder mit Riemenantrieb. Vorteil: Höchster Wirkungsgrad und geringste Geräuschentwicklung
- Laufrad mit rückwärtsgeneigten Flachschaufeln mit Riemenantrieb. Vorteil: Guter Wirkungsgrad und mittlere Geräuschentwicklung
- Trommellaufraad mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln, mit Direktantrieb oder mit Riemenantrieb. Nachteil: Schlechter Wirkungsgrad dafür jedoch eine geringe Geräuschentwicklung
- Freilaufendes Laufrad mit rückwärtsgeneigten Schaufeln, ohne Laufradspiralgehäuse mit Direktantrieb. Dieses Laufrad hat einen mittleren Wirkungsgrad. Das Geräuschspektrum kann hier problematisch werden.

Vorteile des Gehäuseventilators:

- besserer Wirkungsgrad bei hohen Drücken
- Bei gleichem Betriebspunkt ist der Gehäuseventilator leiser, da seine Betriebsdrehzahl niedriger liegt.

Vorteile des freilaufenden Rades:

- Ein freilaufendes Laufrad erfordert eine geringere Wartung und hat bei hohen Volumenströmen einen guten Wirkungsgrad mit einer geringeren Druckdifferenz.
- Beim Einsatz eines freilaufenden Laufrades kann die Baulänge des RLT-Gerätes gegebenenfalls verringert werden.

## Auswahl der Einbau- und Anschlussbedingungen

Bei der konstruktiven Dimensionierung der Einbau- und Anschlussbedingungen und Reduzierung der Widerstände sollten folgende Punkte beachtet werden:

- eine ungestörte Zuluft- und Abluftströmung
- Der Wandabstand zwischen dem Einströmddifusor und dem Kastengerät sollte mindestens  $\frac{1}{2} \times$  Ansaugdurchmesser betragen.
- Die Schutzvorrichtungen für den Riemenschutz und das Ansaugschutzgitter sollten nicht zu eng bemessen sein.

Bei der RLT-Anlagenoptimierung sollte zudem berücksichtigt werden, dass die konventionellen Standardmotoren im Leistungsvergleich zu den Energiesparmotoren schlechtere Wirkungsgrade haben. Zur Optimierung der bestehenden RLT-Anlagen muss eine Anlagenanalyse durchgeführt werden:

1. Berechnung der Amortisationszeit
2. Grobanalyse bestehend aus Bestandsaufnahme (Auslegungsdaten, Volumenstrom, statische Druck, Nennstrom des Motors, Laufzeit)
3. Feinanalyse aufgrund der erweiterten Leistungsmessungen:
  - konkrete Kostenermittlung
  - Sanierungsbetreuung
  - Nachmessung der neuen Anlage.

In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass eine maximale Einsparung bis zu 35 % erreicht wird, die sich aus folgenden Anteilen zusammensetzt:

- Ventilatoraustausch bis zu 25 %
- Einsatz von wirkungsgradoptimierter Motoren bis zu 6 %
- Einsatz von Flachriemen bis zu 4 %.

### 3.2.1.2 Ventilatorregelung

#### Energieeinsparung durch bedarfsgerechten Betrieb

In der Praxis zeigt sich außerdem, dass eine an den Bedarf angepasste Raumbe- und -entlüftung den Energieverbrauch einer RLT-Anlage wesentlich reduziert.

Der physikalische Zusammenhang zwischen Volumendruck und Leistung stellt sich wie folgt dar:

- Der Volumenstrom ändert sich proportional mit dem Drehzahlverhältnis.
- Die Druckerhöhung ändert sich proportional mit der 2. Potenz des Drehzahlverhältnisses.
- Die Antriebsleistung ändert sich proportional mit der 3. Potenz des Drehzahlverhältnisses.

Aus dem o. a. physikalischen Gesetzmäßigkeiten ergeben sich die mathematischen Zusammenhänge:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} = \sqrt[3]{\frac{P_{w1}}{P_{w2}}}$$

V: Volumenstrom

p: Druckerhöhung

P<sub>w</sub>: Antriebsleistung

$$\frac{1}{2} V_1 = \frac{1}{2} n_1 = \frac{p_1}{\left(\frac{1}{2}\right)^2} = \frac{p_{w1}}{\left(\frac{1}{2}\right)^3}$$

Daraus folgt, dass bei

1/2 Volumenstrom → 1/4 Druckerhöhung → 1/8 Leistungsbedarf erforderlich ist.

Eine einfache Anpassung einer bedarfsgeregelten Lüftung kann bereits durch die Ein- und Ausschaltung erfolgen. Hierbei sind mehrere Variationen denkbar:

- manuelle Schaltung
- Kombination mit Lichtschaltung
- zeitgeregelte Schaltung (Tag, Woche oder volles Jahr)
- Schaltung am Fenster
- Infrarotsensor.

Demgegenüber lässt sich eine auf den Bedarf zugeschnittene Anpassung wie folgt realisieren:

- CO<sub>2</sub>-Sensoren in Räumen mit Rauchverbot
- Mischgassensoren in Räumen mit Raucherlaubnis
- CO<sub>2</sub>-Sensoren in Parkbereichen
- Feuchtigkeitssensoren, z. B. in Galerien oder Museen.

Eine noch effizientere Einsparung lässt sich mit einem bedarfsgerechten Frequenzumformerbetrieb erreichen, bei dem der Betriebspunkt 1 mittels einer Frequenzumformeransteuerung auf der Anlagenkennlinie zum Betriebspunkt 2 heruntergefahren wird.

### Vorteile eines Ventilatoraustausches

- Die erforderlichen Reinigungsarbeiten und Instandsetzungen können entfallen.
- Durch die Verwendung geeigneter Komponenten können die zukünftigen Wartungskosten erheblich reduziert werden.
- Die deutlich geringeren Geräuschemissionen machen in der Regel den Einsatz von Schalldämpfern überflüssig, sodass hier zudem die Strömungsverluste weiter reduziert werden.

Der Einsatz eines neuen Ventilators beinhaltet natürlich auch eine neue Gewährleistungsgarantie.

#### 3.2.1.3 Variable-Volumen-System (VVS-System)

Das Variable-Volumen-System (VVS-System) lässt sich in jedem Bürogebäude als Nur-Luft-System für die Innenzone und in Kombination mit der Heizung auch für die Außenzone verwenden. Die wesentlichen Merkmale des VVS-Systems sind die variable Luftmenge und beim Einkanalensystem die konstante Temperatur der Zuluft für die Zonen bzw. Räume mit unterschiedlichen Innenlasten. Hieraus ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Der jeweils geförderte Luftvolumenstrom entspricht der gerade zu deckenden Last. Durch die Ungleichzeitigkeit der auftretenden Raumlasten resultieren kleinere Maximallvolumenströme, die bei Außenzonanlagen mit gegensätzlichen Himmelsrichtungen um 30 bis 40 % niedriger liegen, als bei Nacherwärmersystemen. Noch größer sind die Einsparungen im Betrieb, denn der jährliche Luftdurchsatz verringert sich um 20 bis 30 % und die aufzuwendende Förderenergie sogar um 30 bis 50 %. Dieser Teillastbereich ist dadurch bedingt, dass sich nach physikalischen Gesetzen bei reduzierter Luftförderung die Druckverluste quadratisch reduzieren.

- Da sich ferner die sensiblen Lasten eines Raumes in der Regel stärker ändern als die latenten Lasten, verändert sich auch die Raumluftfeuchte mit dem Zuluftvolumenstrom, d. h. die Raumfeuchte steigt mit abnehmender sensibler Raumlast. Dieses Kriterium könnte daher als Nachteil des VVS-Systems bezeichnet werden. Erfahrungsgemäß liegen diese Feuchteschwankungen jedoch in einem Toleranzbereich von ca. 10 %, die auch bei Komfortanlagen in Kauf genommen werden können.

### 3.2.1.4 Objektbeispiel und Referenzprojekte

*Objektbeispiel:* Admiralspalast Berlin

Architekten: F101 Architekten, Berlin (Entwurf); Gewers Kühn und Kühn, Berlin (Ausführung)

Der Admiralspalast wurde 1911 als einer der ersten Vergnügungsstätten mit Eisarena eröffnet und 1922 im Art-deco-Stil zum »Welt-Varieté« umgebaut. Nach seiner Schließung 1997 wurde das Gebäude denkmalgerecht saniert und modernisiert.



**Abb. 3-1:** Admiralspalast Berlin (Quelle: Eberle & Eisfeld, Berlin)

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik*

Die Gebäudetechnik musste vor allem den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten gerecht werden, wobei insbesondere die Räume in den Außenbereichen aus energetischen Gründen wei-

testgehend natürlich be- und entlüftet werden. Die Luft wird über Zentralgeräte aufbereitet und damit werden die Behaglichkeitskriterien nach DIN EN 13779 und eine hygienische Raumluftqualität nach VDI 6022 eingehalten.

Im Vollastbetrieb laufen die Ventilatoren im Zentralgerät mit einem Außenluftanteil von 100 %. Im Teillastbetrieb wird das System in Abhängigkeit vom Anforderungsprofil als Mischluftsystem geschaltet. Die Zuluft wird abhängig von der Personenzahl über Volumenstromregelung und freilaufende Ventilatoren mit Frequenzumformer zur stufenlosen Drehzahlregelung in die Räume geführt. Daraus folgt ein ökonomischer Betrieb, da z. B. für den Antriebsmotor eines Ventilators bei halber Luftmenge nur noch 1/8 der elektrischen Energie benötigt wird. Eine adiabate Kühlung unterstützt den energetischen Betrieb, wobei für die Grundlast nur die Verdunstungskälte genutzt wird. Hierzu wird die Abluft aus dem Theatersaal über Luftbefeuchter geleitet und adiabat gekühlt.

Eine Doppelfunktion übernehmen auch die zwei RLT-Zentralgeräte für den Theatersaal mit einer Gesamtluftmenge von 37.000 m<sup>3</sup>/h. Die Luftmenge wird je nach Personenfrequenzierung dem Bedarf angepasst, wobei die Motoren der freilaufenden Ventilatoren mittels Frequenzumformer stufenlos betrieben werden. Die zwei RLT-Geräte enthalten je eine adiabate Kühlung, mit der im Teillastbereich, d. h. in der Übergangszeit Frühjahr und Herbst, bis zu 50 kW der erforderlichen Kälteleistung gedeckt werden. Die Abluft wird durch die Verdunstungskälte von z. B. 24 auf 18 °C gekühlt und über einen Doppelplatten-Wärmeübertrager geführt. Die angesaugte Außenluft wird so von 32 °C und einer relativen Luftfeuchte von 40 % um ca. 8 K abgekühlt. Durch den Einsatz der Verdunstungskühlung im Teillastbereich werden im Vergleich zum konventionellen Betrieb mittels Kompressorkältemaschine ca. 20 kW elektrische Energie eingespart. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen wird eine luftseitige Bypassklappsteuerung aktiviert und damit im Theatersaal eine Nachtauskühlung durchgeführt.

**Tab. 3-2:** Referenzprojekte – Anlagen mit Frequenzumformer für Ventilatoren und Verdichter  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationale Energietechnologien	Besonderheiten
Alfred Wegener Institut, Bremerhaven	FU-Ventilatorantriebe	
Nobelhotel Jolly Hotel President, Mailand	drehzahlveränderbare Regelung mit Frequenzumrichtern für RLT-Luftaufbereitung und die Ventilatormotoren der Kühltürme	Kondensatoren, DEA-Anlagen
Tonhalle Düsseldorf HPP-Hentrich, Petschnigg & Partner, Düsseldorf	FU-geregelte Ventilatoren mit Direktantrieben. Die RLT-Anlagensysteme sind über die Notstromversorgung gekoppelt, wobei im Entrauchungsfall die Frequenzumformer überbrückt werden	Wärmerückgewinnung mittels KV-System
Universitätsklinikum Heidelberg	FU-geregelte Ventilatoren	

### 3.2.1.5 Energieeinsparpotenzial durch Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR)

Die richtige Auslegung einer RLT-Anlage trägt ebenso zum sparsamen Energieverbrauch bei wie die Auswahl des geeigneten Anlagensystems. Die erhebliche Einsparung einer optimalen Anlagenauslegung, wird heute durch die Mikro- und Leistungselektronik realisiert. Mit dem Enthalpieprogramm wird bezieht, eine Klimaanlage mit Wärmerückgewinnung über Mischklappen so zu regeln, dass die gesamte Luftaufbereitung mit einem minimalen Aufwand an Primärenergie zur Heizung und Kühlung ausreicht.

Die Richtlinie VDI 3525 gibt dem Anlagen- und Regelungstechniker Hinweise für die Anwendung von Regelungstechnik in der Raumlufttechnik. Die Richtlinie stellt Regelungen für eine komplette RLT-Anlage, eine Kühldecke, ein Kreislaufverbundsystem zur Wärme- und Kälterückgewinnung, eine sorptionsgestützte Kühlung sowie für Anlagen mit VVS-Geräten dar. Sämtliche dargestellten Anlagen verstehen sich als beispielhafte Ausführungsformen zur Erläuterung der jeweiligen regelungs- und steuerungstechnischen Verfahren.

#### Energieeinsparung durch Enthalpiesteuerung und Luftqualitätsregelung

Der Energiebedarf ist ein wesentliches Merkmal für die Qualität einer RLT-Anlage. Durch die optimale Nutzung der in der Außenluft und in der Abluft enthaltenen Enthalpie lässt sich der Energiebedarf erheblich vermindern, ohne dass hierdurch die Komfortbedingungen beeinträchtigt werden. Der Energieaufwand von RLT-Anlagen wird zum großen Teil durch die Außenluftmenge bestimmt. Bei einer Vollklimaanlage entfallen allein für die Erwärmung und Befeuchtung der Außenluft über 50 % der jährlichen Betriebskosten. Diese Kosten sind selbst dann ein erheblicher Faktor, wenn ein Teil der Lüftungsabwärme mit einem Wärmerückgewinnungssystem zurückgewonnen werden kann. Die Reduzierung der Außenluftrate wird allerdings bei völliger Ausschöpfung der nach DIN möglichen außentemperaturabhängigen Reduktion begrenzt, weil sonst eine Geruchsfreiheit nicht mehr gewährleistet ist. Eine Lösung des Problems kann daher nur darin bestehen, die Außenluftzufuhr direkt von der jeweiligen hygienischen Belastung des Raumes abhängig zu dosieren. Eine Luftqualitätsregelung bietet die Möglichkeit, die Raumluftqualität kontinuierlich zu erfassen und den Außenluft-Volumenstrom automatisch an den Bedarf anzupassen.

#### Luftqualität und Außenluftrate

Für Anlagenauslegung wird in der Regel nach DIN 1946-2 die Außenluftrate ( $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Pers.}$ ) zugrunde gelegt. Bei den Funktionsräumen, wie

- Konferenzraum, Seminarraum
- Theater, Mehrzweckhallen
- Klasssräume
- Gaststätten

wird die Mindestaußenluftrate ( $\text{m}^3/\text{h}$  pro Pers.) nach der DIN 1946-2 oder nach der ASHRAE für Raucher und Nichtraucher bestimmt.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Außenluftrate errechnet sich aus dem Aktivitätsgrad, der Personenbekleidung, der Raumluftturbulenz, etc. Die dritte Variante ist die Bestimmung der Außenluftmenge nach der Schadstoffkonzentration.

Die Mindestaußenluftmenge, die einem Raum zugeführt werden muss, ist von der Belastung der Raumluft durch Schadstoffe und Gerüche abhängig. Mangels geeigneter Messgrößen für die Luftqualität ist die aus hygienischen Gründen erforderliche Mindestaußenluftmenge als Außenluftrate pro Person ( $\text{m}^3/\text{h}$  pro Pers.) festgelegt worden. Diese Außenluftrate variiert jedoch je nach Personenfrequentierung, Raumtyp, Nutzungsart (Raucher/Nichtraucher), etc. Bei der Außenluftrate handelt es sich daher um eine zweckdienliche Dimensionierungsgröße für Räume und Gebäude deren Belegungsdichte und sonstige hygienische Belastung bekannt und in etwa konstant ist. In der Regel ist dieses jedoch nicht der Fall. In Mehrzweckräumen, Kinos, Theater, Konferenz- und Seminarräumen, Restaurantsbetrieben, etc. variierten die Personenfrequentierung (Kohlendioxyd) sowie die Raumluftbelastung durch Körpergerüche, Gerüche aus Aerosole und Speisen, Tabakgerüche, etc.

Wird nun in derartigen Räumen die Außenluftmenge aufgrund der Außenluft so dimensioniert, dass bei maximaler Raumluftbelastung noch eine akzeptable Luftqualität vorherrscht, dann wird zwangsläufig bei jeder reduzierten Belegung bzw. Minderbelastung des Raumes ein »Außenluftüberschuss« auftreten. Dieser Überschuss, d. h. die eigentlich nicht benötigte Außenluftmenge, muss aber trotzdem aufbereitet werden. Der hierfür erforderliche Energieanteil ist vom Wert her unwesentlich geringer als bei einem vollbelegten Raum.

### Präsenzsteuerung

Andererseits geht viel Energie in den Räumen verloren die zeitlich nicht genutzt werden. In diesen Fällen wird die konditionierte Luft aufbereitet, transportiert und eingeleitet, obwohl überhaupt kein Bedürfnis nach einer thermischen Behaglichkeit besteht. Die Lösung zeigt sich hier in Form einer Präsenzsteuerung, die die Anwesenheit von Personen in einem Raum automatisch erfasst und menschliches Fehlverhalten (z. B. versäumte Abschaltung nach Konferenzende) ausschließt. Der Präsenzsensor lokalisiert automatisch, ob der Raum benutzt ist oder nicht. Die Zustandsmeldung »belegt« oder »unbelegt« geht zur Auswertung an das Steuergerät. Ist der Raum während der Betriebszeit belegt, dann sind sämtliche Funktionen zur Erhaltung der Behaglichkeit freigegeben. In nicht belegten Räumen wird die Energiezufuhr reduziert, indem die Raumtemperatur bis auf einen einstellbaren Stand-by-Wert, d. h.  $\Delta h$  (Enthalpiedifferenz), abweichen kann. Basis ist hier der physikalische Zusammenhang

$$E = m \cdot \Delta h \cdot t$$

Hier sind:

E: Energiemehrung/Energieminderung

m: Massenstrom

$\Delta h$ : Enthalpiedifferenz

t: Zeit

Innerhalb der Abweichung ( $\Delta h$ ) bleibt die Anlage über die Zeit (t) automatisch abgeschaltet.

Die Präsenzsteuerung kann von anderen Anlageteilen her angesteuert werden und auf andere Anlageteile einwirken. Z. B. bei einer Nachabsenkung, Sommer-/Winterkompensation, Energieaufbereitung, etc.

## Automatische Luftqualitätsregelung

Als Maßstab für die hygienische Belastung der Raumluft dienen die im Raum anfallenden Gerüche. Diese werden vom Luftqualitätssensor bereits bei sehr geringer Intensität erfasst. Die Luftqualitätsregelung beinhaltet einen Sensor, einen elektronischen Regler sowie ein beliebiges Stellglied (Aktor). Je nach Bedarf kann die Regelung durch einen externen Sollwertgeber ergänzt werden. Das Funktionsprinzip des Luftqualitätssensors beruht auf der Erkenntnis, dass im Humanklimabereich mit der Abnahme der Luftqualität die Anteile verbrennbarer, d. h. nicht oxydierter Gase in der Raumluft zunehmen. Derartige Gase entstehen durch die Ausdünstungen der Personen (Ammoniak, Methan, Fettsäuren), durch Zigarettenrauch, Küchendämpfe, etc. Wenn nun das Messelement des Luftqualitätssensors diesen Gasen ausgesetzt wird, dann verändert es seinen Innenwiderstand. Die Leitfähigkeit des Messelementes kann hierbei im Vergleich zur sauberen Luft bereits bei sehr niedrigen Gaskonzentrationen um den Faktor 20 variieren. Eine wesentliche Eigenschaft des Messelementes besteht außerdem darin, dass es nicht selektiv ist, d.h. bei mehreren, gleichzeitig auftretenden Gaskonzentrationen erfasst es die Summe der Gaskonzentration.

In der Grundfunktion vergleicht der Regler die am Sensor erfasste Luftqualität mit dem eingestellten Ansprechwert (Sollwert). Je nach Abweichung erhöht bzw. vermindert der Regler in der Folge über ein entsprechendes Stellglied den Außenluftvolumenstrom. Als Stellgröße stehen hierzu ein stetiges Signal und ein potenzialfreier Umschaltkontakt zur Verfügung. Dadurch ist eine stetige Regelung sowohl der Außenluftklappen als auch der Ventilatordrehzahl mittels Frequenzumrichter oder aber einer Stufenschaltung des Ventilators möglich.

Die Luftqualitätsregelung kann auch von anderen Anlagenteilen her angesteuert werden, z. B. zur Sperrung der Außenluftzufuhr bei Nichtbelegung des Gebäudes, während der Nachtabschaltung und während der Aufheiz- und Abkühlphasen.

## Enthalpiebedarf und Enthalpieangebot

Die Außenluft und die Abluft von RLT-Anlagen enthalten beträchtliche Energiemengen. Aus diesem Grund ist es notwendig, diese Energieangebote mit dem Bedarf zu vergleichen. Durch das stetige Variieren des Verhältnisses zwischen der Außen- und der Abluft wird der erforderliche Energiezustand in der Zuluft erreicht. Mit einer bedarfsabhängigen Dosierung wird verhindert, dass die Überschüsse durch einen zusätzlichen Energieeinsatz wieder vernichtet werden müssen. Die Enthalpiesteuerung, kombiniert mit stetiger Luftwäscheregelung, gibt dem Luftstrom nur soviel Feuchtigkeit hinzu, wie dieses die gewünschte Behaglichkeit im Raum erfordert.

Um diese Wassermenge so genau zu dosieren, sollten als ideale Stellglieder Magnetventile verwendet werden, da hier die Regelsignale präzise umgesetzt werden. Eine bedarfsabhängige Regelung mit Enthalpievergleich und genauestes Dosieren mit Magnetventilen ermöglicht eine optimale Luftfeuchtigkeitsanpassung mit minimalem Energieaufwand. Der Anteil der latenten Wärme an der Enthalpie kann je nach dem Außen- und Abluftzustand ein energiemäßig und somit ein bedeutendes wirtschaftliches Potenzial darstellen. Bei der Regelung der Rückgewinnung von Umluftsystemen und regenerativen Wärmeübertragern (Rotationswärmeübertragern) ist es daher sinnvoll, die Luftfeuchtigkeit in das Optimierungsverfahren mit einzubeziehen.

Der Umfang der Energiebeimischung aus dem Abluftkanal ist abhängig vom jeweiligen Enthalpiebedarf und Enthalpieangebot. Der Enthalpiebedarf ist ein Maß für die thermische Belastung der klimatisierten Räume durch interne Lasten (Personen, Beleuchtung, Maschinewärme, etc.) sowie externe Lasten (Sonneneinstrahlung, Wärmeverluste). Diese Lasten errechnen sich nach der Kühllastberechnung und nach der Wärmebedarfsberechnung. Der Enthalpiebedarf kann sich positiv (Bedarf für Wärme und Feuchte) oder als negativer Enthalpiebedarf (Bedarf für Kühlung und Entfeuchtung) äußern. Ein Enthalpieangebot besteht sowohl in der Außenluft als auch in der Abluft. Während das Enthalpieangebot der Abluft relativ konstant ist und in etwa dem der Raumluft entspricht, ändert sich das Angebot der Außenluft sehr stark mit den Witterungsbedingungen. Daher wird das Enthalpieangebot positiv, wenn die Enthalpie der Außenluft größer ist als die Enthalpie der Abluft, oder im umgekehrten Sinne wird das Angebot negativ.

Die Aufgabe der angebots- und bedarfsabhängigen Enthalpiesteuerung besteht darin, das jeweils für einen bestimmten Bedarf geeignete Angebot zu ermitteln und zur Nutzung zu verwenden. Bei der direkten Umluftbeimischung erfolgt dieses durch die proportionale Verstellung der Außenluft-, Umluft- und Fortluftklappen. Dagegen werden beim Rotationswärmeübertrager die Temperatur- und Befeuchtungswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl geändert.

### 3.2.1.6 Gebäudeleittechnik (GLT)

Die Aufgabe der GLT besteht darin, die angeschlossenen betriebstechnischen Anlagen von zentraler Stelle aus zu leiten und zu managen sowie die jeweiligen Betriebszustände grafisch auf einem Bildschirm darzustellen. Insofern erhält das Betriebspersonal jederzeit einen umfassenden Überblick über die gesamten technischen Anlagen und wird gleichzeitig in die Lage versetzt, schnell auf Betriebsstörungen und Energiemehrverbräuche zu reagieren. Die praktischen Erfahrungen belegen eindeutig, dass mit GLT-DDC-Systemen gegenüber einer konventionellen MSR-Technik ca. 15 % der Strom- und Wärmeenergie eingespart werden können.

Durch die geeignete Auswahl der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für die RLT-Anlagen lässt sich der Energieverbrauch ohne Komforteinbuße erheblich reduzieren. Das zentrale Management der technischen Gebäudeausrüstung erfolgt in der Regel über ein Gebäudeautomationssystem, das im Wesentlichen aus den DDC-Stationen innerhalb der Technikbereiche besteht und dort den vollautomatischen Betrieb der technischen Anlagen übernimmt sowie der übergeordneten PC-Workstation mit Störmelde- und Betriebs-/Ereignisdruckern angeschlossen ist.

#### Bedarfsgerechte LON-basierte Einzelraumregelung

*Objektbeispiel:* Dorotheenblöcke in Berlin

Die Dorotheenblöcke sind Bestandteil der Parlamentsgebäude und befinden sich in der Nähe des Reichstags und des Brandenburger Tors. Das Ensemble besteht aus acht Gebäuden mit über 2.000 Abgeordnetenbüros.

Die Einzelraumregelungen wurden mit LON-gesteuerten RLT-Anlagen ausgerüstet, sodass jeder Büronutzer individuell die automatische RLT-Anlage einschalten oder das Fenster öff-

nen kann. Es wurden insgesamt 1.270 intelligente Steuermodule installiert, über die sich die Absperrklappen für die Lüftung, die Thermostatventile der Heizung und die Stellung der Fenster sowie der Zustand der Taster kontrollieren und steuern lassen. Zusätzlich enthalten die Steuermodule einen Schaltkontakt für die Beleuchtung, der als Freigabekontakt über die Busleitung von zentraler Stelle aus bedient werden kann. Die Hauptaufgabe der Einzelraumsteuerung besteht jedoch in der Aufrechterhaltung einer bedarfsgerechten Versorgung der Büros mit Außenluft.

Die Zuluft wird über die zentrale Klimaanlage aufbereitet und über ein separates Luftverteilsystem den Einzelbüros zugeleitet. In jedem Abzweigkanal zu den Büros wurde eine Absperrklappe installiert, die über einen Taster geöffnet werden kann. Es bleibt dem Nutzer überlassen, ob er das Fenster öffnet oder die Klimatisierung in Anspruch nimmt. Um einer unnötigen Energieverschwendungen entgegen zu wirken unterbindet die Einzelraumsteuerung, dass beide Funktionen gleichzeitig durchgeführt werden.

Von der Funktionalität her sind die LON-Steuergeräte in die MSR-Technologie integriert. Zudem sind die LON-Steuergeräte über den LON-Bus direkt mit der Gebäudeleittechnik gekoppelt, wobei Router etagenweise die Strukturierung der einzelnen LON-Segmente übernehmen. Die RLT-Anlagen lassen sich generell von der Leitstelle zu- und abschalten. Der Ist-Zustand innerhalb der Büros wird über den LON-Bus an die zentrale Klimaanlage gemeldet und kann somit bedarfsgerecht und effizient betrieben werden. Es wird folglich nur so viel Luft aufbereitet, wie an tatsächlichem Nutzungsbedarf angefordert wird. Der Verbrauch richtet sich daher nicht nur nach der Nutzungs frequenz der einzelnen Büros, sondern auch nach den tatsächlichen Nutzungsgewohnheiten der jeweiligen Personen. Je nach Inanspruchnahme der aufbereiteten Luft lassen sich die Betriebskosten im Bereich von 15 bis 20% reduzieren.

### 3.3 Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL)

Die Wohngebäude können unter Einhaltung der EnEV und durch den Einsatz moderner Anlagentechnik so konzipiert werden, dass sie ein Minimum an Wärmeenergie benötigen. Bei den Neubauten zählt das Niedrigenergiehaus zum Standard und mit dem Passivhaus soll der Energiebedarf weiter reduziert werden. Ebenso werden im Modernisierungs- und Sanierungsbereich fortlaufend neue bauphysikalisch verbesserte Materialien und innovative Anlagen technologien eingesetzt, mit dem Ziel einer weiteren Reduzierung des Energieverbrauchs.

Bei all diesen Maßnahmen wird der Energieeinspareffekt primär aufgrund einer luftdichten Gebäudehülle mit entsprechend gedämmtem Mauerwerk und durch eine Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung erreicht. Durch die dichte Gebäudehülle der neuen Bauweise bzw. der sanierten Bauobjekte wird zwar der Verlust an Wärmeenergie minimiert, aber gleichzeitig tritt ein nicht akzeptabler Nebeneffekt auf. Eine durch Undichtigkeiten (Fugen, Ritzen, Fenster, Türen, Rollläden) natürliche, unkontrollierte Lüftung ist durch die dichte Bauweise nicht mehr möglich. Das Resultat ist eine unbefriedigende Luftqualität mit etlichen negativen Begleiterscheinungen.

Gebäude und Wohnungen mit einem geringen Wärmebedarf bieten durch die sehr gut gedämmte Bauweise und Dichtigkeit Schutz vor Lärm, Abgasen und Pollen. Andererseits könn-

ten in den Gebäuden mit hoher Luftfeuchtigkeit und schlechter Luftqualität gesundheitliche Beeinträchtigungen und Bauschäden entstehen. Um über den Energiespareffekt hin- aus noch die Umweltbelastung »hereinzulüften«, wird hier der Einsatz einer kontrollierten Wohnungslüftung erforderlich. Die Wohnraumnutzer benötigen den Luftsauerstoff zur Atmung und leiten das beim Ausatmen entstehende Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) wieder an die Raumluft weiter. Über den entsprechenden Zeitraum stellt sich infolgedessen eine Verschlechterung der Raumluft ein. Die Qualität der Raumluft wird zudem durch die rauminternen Geruchsstoffe (Rauch-, Kosmetik-, Koch- und Waschgerüche sowie Ausdünstungen aus Möbeln, Bodenbelägen und den Gebäudematerialien gemindert. Die Personen reagieren sehr sensibel auf diese Stoffe (Gase) mit nachlassender Konzentration, Müdigkeit bis hin zu Kopfschmerzen. Analog zur  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Raumluft nimmt auch die Raumluftfeuchtigkeit zu. Dieses kann zu Schäden an der Bausubstanz (»Schwarze Decken und Wände«) und zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung führen.

### **Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL) zum bedarfsgerechten und energieeffizienten Luftaustausch**

Zur Aufrechterhaltung einer guten Luftqualität ist für einen räumlich und zeitlich bedarfsgerechten Luftaustausch zu sorgen. Traditionell werden diese Funktionen durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle und durch freies Fensterlüften übernommen. Die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle haben u. a. den Nachteil, dass gerade dann viel Luft ausgetauscht wird, wenn es draußen besonders kalt ist. Dadurch trocknet im Winter einerseits die Raumluft stark aus und es kann andererseits zu Zugerscheinungen kommen. Weiterhin führt dies zu einem unnötigen Anstieg des Energiebedarfs und der maximal benötigten Heizleistung. Hingegen tragen Undichtigkeiten in der Übergangszeit praktisch nicht zum Luftaustausch bei, sodass dann verstärkt durch freies Fensterlüften für eine behagliche Raumluftqualität gesorgt werden muss. Behaglichkeit beschreibt den Zustand des Wohlbefindens eines Menschen, bedingt durch die äußeren Einflüsse seiner Umgebung. Dabei ist das Empfinden subjektiv, es gibt keinen einheitlichen Maßstab in Bezug auf Behaglichkeit. Der Körper eines Menschen kann sich an verschiedene Umgebungszustände anpassen, es gibt aber bevorzugte Zustände, in denen er sich besonders behaglich fühlt.

Ausdruck für die Zufriedenheit einer Person mit ihrem psychischen und physischen Befinden sowie mit den physikalischen Bedingungen und den thermischen Zuständen ihrer Umgebung. Thermische Behaglichkeit ist gegeben, wenn die Person mit der Temperatur, Feuchte und Luftbewegung zufrieden ist.

Der physiologische Behaglichkeitsbereich wird mit dem Toleranzfeld der Raumluftkonditionen gekennzeichnet, der wesentlich durch Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Temperatur der Raumumschließungsflächen bestimmt wird. Nur wenn diese Werte sich in bestimmten Grenzen bewegen, wird das Raumklima vom Menschen als behaglich empfunden. Dabei spielen z. B. auch die Kleidung und der Aktivitätsgrad des Menschen eine Rolle.

Durch die Gebäudedämmung und ein höheres Maß an Dichtheit ist ein ausreichender natürlicher Außenluftwechsel nicht mehr gewährleistet. Der aus hygienischer Sicht erforderliche Luftwechsel sollte im Wohnungsbau 0,8 für Zulufräume und 1,5 bis 2,0 für Ablufträume betragen.

Aufgrund der EnEV-Vorgaben und der wirksamen Bauphysik der Außenbauteile (Fenster, Wände, Dächer) sowie der Dichtheit des Gebäudekörpers kommt den Lüftungswärmeverlusten eine erhebliche Bedeutung zu.

Nach DIN V 18599-2 wurde zur Einstufung der Gebäudedichtheit einer Gebäudezone die Kategorie I (für errichtende Gebäude oder Gebäudeteile, bei denen eine Dichtheitsprüfung und die Einhaltung der Anforderungen an die Gebäudedichtheit nach DIN 4108-7 vorgesehen sind) eingeführt. Zudem wurden für die »Gebäude ohne raumlufttechnische Anlage« und »Gebäude mit raumlufttechnischen Anlagen« die Bemessungswerte  $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$  bzw.  $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$  eingeführt.

Aus hygienischen Gründen und zur Vermeidung von Feuchteschäden ist es erforderlich, die Luft innerhalb der Aufenthaltsräume regelmäßig auszutauschen. Diese lässt sich durch den Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung erreichen, wobei sich überhöhte Lüftungswärmeverluste vermeiden lassen. Um den Lüftungswärmebedarf zu verringern, können die Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnern, Wärmepumpen oder mit Solarluftkollektoren betrieben werden. Hinsichtlich der langen Lebensdauer und des Wohnkomfort sollten zudem gerade bei Modernisierungsmaßnahmen die Einsatzmöglichkeiten von kontrollierten Wohnungslüftungen untersucht und angewendet werden.

Die DIN 18017 setzt voraus, dass die Zuluft ohne besondere Zulufteinrichtungen durch die Undichtigkeiten in den Außenbauteilen nachströmen kann. Hierbei ist allerdings ein Luftwechsel ohne definierte Nachströmöffnungen nicht gewährleistet. Die nach DIN 18017 sowie nach DIN 1946 geforderten Volumenströme werden ohne definierte Nachströmöffnungen oder maschinelle Be- und Entlüftungsanlage nicht erreicht.

Nach DIN 1946-6 wird zudem eine maschinelle Lüftung für den Fall gefordert, dass der Baukörper keine Quer-/Schachtlüftung zulässt. Als Dimensionierungsgrundlage müssen hier die innenliegenden Küchen mit einer Intensivlüftung und einem Durchsatz von mindestens  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  betrieben werden. Die Räume, in denen sich Personen aufhalten, benötigen einen kontinuierlichen Luftwechsel. Dieser Luftwechsel muss die Raumluftfeuchte abführen können, die von den Personen, überwiegend durch Atmung, Schwitzen, Körperpflege und den Haushaltsgeräten, wie Waschmaschine, Trockner, Herd, abgegeben wird. Zudem machen die in den Räumen entstehenden Geruchs- und Schadstoffe, Staub, Dämpfe und Kohlendioxid einen regelmäßigen Austausch der Raumluft erforderlich. Beim Einsatz einer kontrollierten Be- und Entlüftung werden nachfolgend aufgeführte Ziele erreicht:

- Reduzierung der Luftfeuchtigkeit
- Reduzierung des Kohlendioxidgehalts
- Vermeidung von Schadstoffbelastungen (Gerüche)
- Vermeidung von Schimmelbildung und Bauschäden.

Zur Auslegung einer Wohnungslüftungsanlage muss der Zu- und Abluftvolumenstrom der einzelnen Räume ermittelt werden. Aus dem Produkt des Raumvolumens und der Luftwechselrate ergibt sich die erforderliche Luftleistung des jeweiligen Raums. Der Gesamtlüftungsbedarf des Gebäudes, nach dem die Leistungsgröße des Lüftungsgerätes festgelegt wird, ermittelt sich aus der Addition sämtlicher Zu- und Abluflmengen. Bei geringfügig überwiegendem Abluftvolumenstrom wird durch den so entstehenden Unterdruck eine Geruchsausbreitung aus den Ablufräumen (Bad, Küche) zu den anderen Räumen vermieden.

### 3.3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

#### Vornorm DIN V 18599-6:2007-02

Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 6: Endenergiebedarf von Wohnungslüftungsanlagen und Luftheizungsanlagen für den Wohnungsbau

Der Teil 6 zur DIN V 18599 kommt nur für Wohngebäude zum Einsatz und berücksichtigt die Wohnungslüftungsanlagen mit und ohne Wärmeübertrager, Luftheizungsanlagen sowie Luft/Luft- und Luft/Wasser-Wärmepumpen. In der DIN V 18599-6 wird ein Verfahren zur energetischen Bewertung für Wohnungslüftungsanlagen mit und ohne Wärmerückgewinnung sowie Luftheizungsanlagen in den einzelnen zu bewertenden Prozessbereichen für Wohngebäude beschrieben. Das Bewertungsverfahren gilt sowohl für neu zu errichtende Gebäude als auch für bestehende Gebäude bzw. Modernisierungen und Sanierungsmaßnahmen. Nicht Bestandteil von DIN V 18599-6 sind die Beschreibung und Bewertung von Systemen zur Kühlung und Klimatisierung im Wohnungsbau sowie von Lüftungssystemen in Nichtwohngebäuden. Diese Systeme wurden in der DIN V 18599-7 definiert.

Grundlage für die Erarbeitung des Bewertungsverfahrens des Bilanzablaufs in der DIN V 18599-6 waren die Ansätze des bereits vorhandenen Bewertungsverfahrens zur Wohnungslüftung in den Prozessbereichen der Übergabe, Verteilung, Speicherung und Wärmeerzeugung nach DIN V 4701-10. Bei der Anwendung der DIN V 18599-6 stammen die Ausgangswerte aus der DIN V 18599-1 und der DIN V 18599-2 sowie die Randbedingungen aus der DIN V 18599-10. Hierbei ist auch die Nutzung von Teilbereichen für eine Wärmelieferung an DIN V 18599-5 und DIN V 18599-6 und im Umkehrsinn durch die Verknüpfung dieser Vornormen möglich. Die Berechnungsergebnisse aus der DIN V 18599-6 werden, in Abhängigkeit von der Systemtechnologie, in DIN V 18599-1 (Wärmeverluste, Hilfsenergiebedarf, Erzeugerwärmeabgabe, Wärmeaufnahme) sowie in der DIN V 18599-2 (Zulufttemperatur und mittlerer Anlagenluftwechsel zur Bewertung der Wärmeübertrager, ungeregelter Wärmeeintrag) und der DIN V 18599-5 bzw. DIN V 18599-8 (Erzeugerwärmeabgabe für Heizung und/oder Warmwasserbereitung) berücksichtigt.

Die Bewertung erfolgt generell für die in der DIN V 18599-1 definierten Zonen, z. B. für ein Einfamilienhaus. Wenn für die RLT-Anlage bzw. die einzelnen Komponenten innerhalb einer Zone unterschiedliche Ausführungen vorliegen, z. B. dezentrale RLT-Geräte für einzelne Räume oder eine zonenweise Nachheizung der Zuluft, dann ist in den Berechnungen ein Gesamtkennwert einzufügen, der flächengewichtet über die Anteile an der Nettogrundfläche aus den einzelnen Kenngrößen ermittelt wird. Die DIN V 18599-6 enthält zudem die Kennwerte zur Berücksichtigung der Lüftungswärmesenke durch Wohnungslüftungsanlagen mit und ohne Wärmeübertrager sowie die ungeregelten Wärme- und Kälteinträge durch Wohnungslüftungsanlagen und Luftheizungsanlagen, die zur Berechnung des Nutzwärmebedarfs einer Zone in DIN V 18599-2 erforderlich sind.

Für die Berechnung von Wohnungslüftungsanlagen und Luftheizanlagen mit einer kombinierten WärmeverSORGUNG, z. B. Abluft-/Zuluft-Wärmepumpe mit/ohne Wärmeübertrager in Verbindung mit einer Gas-, Öl- oder Elektroheizung sind in der DIN V 18599-6 die Berechnungsverfahren für

- Abluft-/Zuluft-Wärmeübertrager, mit der Wärmequelle »Abluft« und Wärmesenke »Zuluft«
- Abluft-/Zuluft-Wärmepumpen, mit der Wärmequelle »Abluft« und Wärmesenke »Zuluft«
- Abluft-/Wasser-Wärmepumpen, mit der Wärmequelle »Abluft« und Wärmesenke »Wasser«
- Abluft-/Zuluft-/Wasser-Wärmepumpen, mit der Wärmequelle »Abluft« und Wärmesenke »Zuluft, Wasser«

enthalten. Die DIN V 18599-6 definiert auch die Luftheizungsanlagen, bei denen die Wärmezufuhr vollständig durch Luft als Wärmeträger erfolgt und die ohne wasserführendes Nachheizregister betrieben werden. Die Luftheizungsanlagen mit wasserführenden Nachheizregistern werden luftseitig in der DIN V 18599-6 und wasserseitig in der DIN V 18599-5 bewertet. Die Berechnungsergebnisse werden in der DIN V 18599-1 übernommen und bezo gen auf den Endenergie- und Primärenergiebedarf zusammengefasst.

### 3.3.2 Systemlösungen

#### 3.3.2.1 Ventilatorsteuerungen

Zur Drehzahlregelung stehen in der Praxis drei Antriebsvarianten zur Verfügung:

- Einphasen-Wechselstrommotor
- Energiesparmotor (EC)
- Wechselstrommotor mit Frequenzumrichter.

Als klassische Antriebe werden Wechsel- oder Drehstrommotor eingesetzt, die über die Spannung (spannungssteuerbar, vierpolig, sechspolig, polumschaltbar, ein- und dreiphasig) in ihren Leistungen variiert werden können. Hierbei handelt es sich um eine bewährte Technik mit hohen Wirkungsgraden.

#### Ventilatorsteuerung über Stufentransformator

Die Ventilatorsteuerung erfolgt in der Regel über Stufentransformatoren mittels integrierter digitaler Zeitschaltuhr, in drei Betriebszustände, als Sommer-Winter-Betrieb oder bei feststehenden Tellerventilen.

**Schaltungsvariante 1:** Einsatz von einstufigen Ventilatoren und Wärmerückgewinnung ohne Leistungserhöhung der Ventilatoren.

Durch die einstufige Betriebsweise können z. B. die Luftmengen für das Wohnzimmer und die Küche je nach Bedarf erhöht werden, wobei dann parallel die Luftmengen in den Schlaf- bzw. Nassräumen reduziert werden.

**Schaltungsvariante 2:** Einsatz energieeffizienter Motoren.

In neuerer Zeit werden für die Ventilatoren auch Energiesparmotoren (EC-Motor) verwendet, die ausschließlich mit einer dazu gehörenden Regelelektronik betrieben werden. Die EC-Motoren mit einphasiger universaler Netzanbindung 208 bis 277 V, 50 – 60 Hz erreichen auch im Teillastbereich höchste Wirkungsgrade. Eine bedarfsgerechte Anpassung der Luftmenge im Sommer-/Winterbetrieb ist durch folgende Maßnahmen möglich:

## ■ Kontrollierte Wohnungslüftung (KWL)

---

- stufenlos, mittels Scheibenankermotor (Phasenanschnitt)
- bedarfsabhängige Regulierung durch Stufenschaltung.

Für den Fall einer konstanten Luftmenge (einstufige Betriebsweise) kann das Zentralgerät mit einem Bypass für die Sommerlüftung ausgerüstet werden. Hierdurch wird vermieden, dass sich die kühlere Außenluft an der an dem Wärmeübertrager vorbeiströmenden warmen Abluft erwärmt.

### **Polumschaltbare Motorsteuerung über fest hinterlegte Frequenzen**

Hierbei handelt es sich um Drehstrommotoren, die für den Betrieb mittels Frequenzumrichter optimiert wurden.

### **Elektronische Steuer- und Regelungssysteme (SPS)**

Bei den elektronischen Steuer- und Regelungssystemen (SPS) handelt es sich um Ansteuer-einheiten für EC-Motoren sowie einphasige und dreiphasige Asynchronmotoren. Die Systeme sind für Zeit-, Druck- und Volumenstromregelung bzw. für verschiedene Busanbindungen erhältlich.

### **3.3.3 Effizienz der kontrollierten Wohnraumlüftung**

Die Berechnungsfaktoren zur Beurteilung der Effizienz eines Lüftungssystems sind von verschiedenen Einflüssen abhängig. Die generelle Vorgehensweise ist hierbei vom verwendeten System abhängig, von der

- Abschätzung der zu erwartenden jährlichen Energieeinsparung
- Berechnung des jährlichen Stromverbrauchs
- Bestimmung der Anlageneffizienz über das Verhältnis Nutzen zu Aufwand.

Ungeachtet der theoretischen Betrachtung zur Anlageneffizienz gibt es einige Grundregeln, die beachtet werden sollten und die unabhängig vom System entscheidend sind für eine optimale Ausschöpfung der Einsparpotenziale in Planung und Betrieb der unterschiedlichen RLT-Systeme.

In der Planungsphase wird die Basis für ein optimal funktionierendes und effizient arbeitendes System gelegt. Ein möglichst kompaktes Luftkanalsystem, das möglichst großzügig dimensioniert ist sorgt für geringe Druckverluste und somit geringen Energieverbrauch im Betrieb. Die Vermeidung von zu hohen Volumenströmen innerhalb der Systemtechnik ist wohl das einfachste und sicherste Mittel, um die Betriebskosten gering zu halten.

Eine ausgewogene Beurteilung der Zentralgeräte und die Auswahl des Gerätes und der Einbaukomponenten nach Effizienzkriterien sind natürlich genauso entscheidend für die späteren Einsparungen wie die verwendete Regelstrategie des Gerätes. Wird im Rahmen des Lüftungskonzeptes auf den Einsatz einer Wärmerückgewinnungsanlage gesetzt, dann ist es hier von entscheidender Bedeutung, dass das Gebäude die Anforderungen an die Gebäude-dichtheit erfüllt.

Wird ein Wärmeübertrager verwendet, muss es natürlich das Ziel sein, dass möglichst der gesamte Luftaustausch auch über die Wärmerückgewinnung erfolgt. Alles was im undich-

ten Gebäude an der Wärmerückgewinnung vorbei geht kann nicht genutzt werden und führt zur Erhöhung der Lüftungswärmeverluste.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass die Luft nicht immer da ausgetauscht wird, wo sich die Menschen gerade aufhalten. Eine sinnvolle Abhilfe stellen Wohnungslüftungsanlagen dar, sofern sie richtig dimensioniert und installiert werden und sofern modernste Technik zum Einsatz kommt. Lüftungsanlagen gewährleisten einen zeitlich bedarfsgerechten und energieeffizienten Luftaustausch. Voraussetzung dafür ist aber, dass das Gebäude relativ luftdicht gebaut ist (Blower Door-Test mit  $n_{50} < 1,5$ ). Zudem sorgt das Prinzip der Querlüftung für eine effektive Nutzung der ausgetauschten Luft in einem Gebäude.

In der seit Mai 2009 veröffentlichten DIN 1946-6 wird im Kernbereich u.a. nach vier Lüftungsstufen unterschiedlicher Intensität definiert.

Die Lüftung zum Feuchteschutz definiert die Luftwechselrate, die bei einer minimalen Nutzung der Wohnung erfolgen muss, um Schimmelpilz- und Feuchteschäden zu vermeiden. Diese Lüftungsstufe muss entsprechend der Norm ständig und nutzerunabhängig sicher gestellt sein.

Die reduzierte Lüftung für nur gering genutzte Wohneinheit kann in einem »Zweistufenbetrieb«

- Nennlüftung im Normalbetrieb
- Intensivlüftung zum Abbau der Lastspitzen

erfolgen.

### 3.3.3.1 Erforderliche Luftwechselrate

Eine hygienische Luftqualität wird nach den Kriterien der

- $\text{CO}_2$ -Konzentration der Raumluft in 1.000 ppm Vol.-% als Grenzwert nach Pettenkofer
- Ausbreitung von Geruchs- und Schadstoffen (z.B. Koch-, Waschgerüche, Lösungsmittel, Reinigungsmittel)
- Konzentration von Stäuben, Hausstaubmilben, Pollen
- Reduzierung der Feuchtigkeit und damit Entzug des Nährbodens für Hausmilben, etc.

bewertet. Um diese negativen Einflüsse zu unterbinden, ist in der Praxis ein 0,5 bis 0,8-facher Luftwechsel, bezogen auf das Raumvolumen, ausreichend.

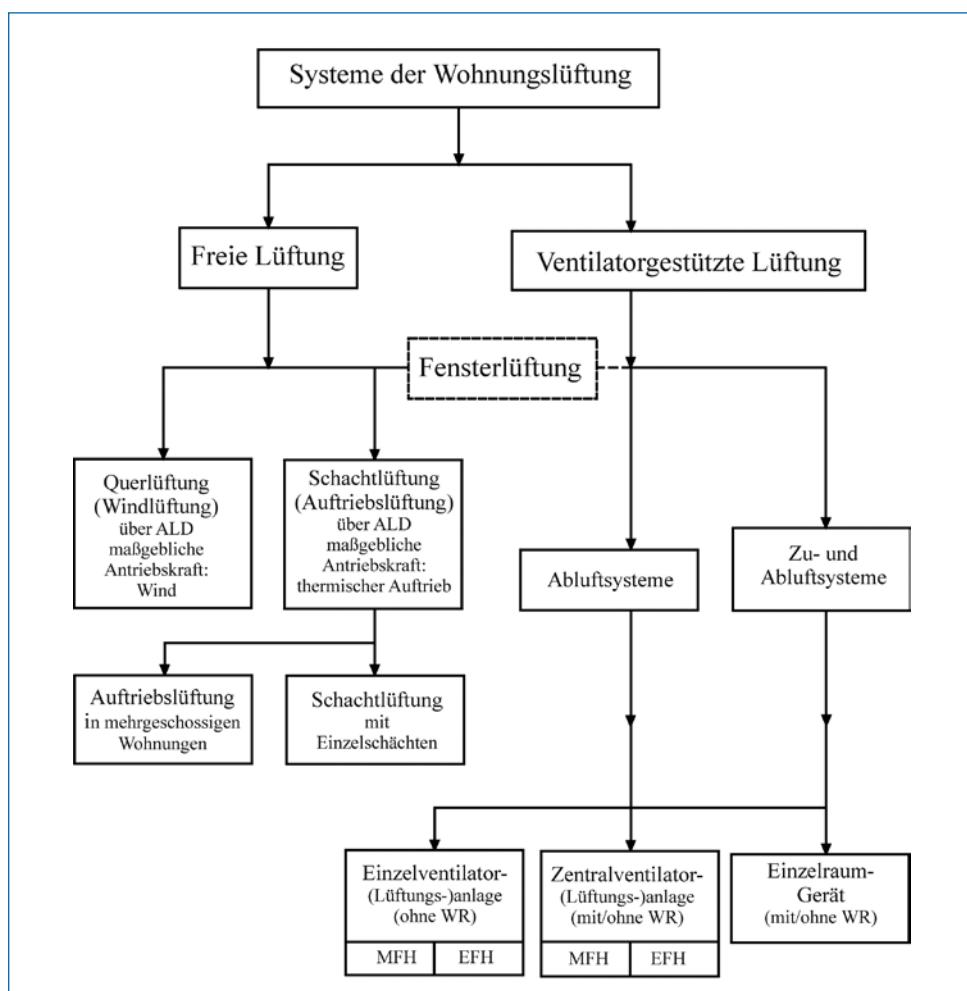
Zur Dimensionierung der Volumenströme bzw. zur Festlegung der Luftwechselzahlen sind folgende Grundlagen zu ermitteln:

- geforderte Außenluftrate nach DIN 1946-2
- Wohnungs- bzw. Raumgröße
- Personenbelegung
- Nutzungsart (Wohnung, Büro)
- Luftunderschuss- bzw. Luftüberschussverhältnisse
- ggf. Geruchs- und Schadstoffemission.

**Tab. 3-3:** max. Luftwechsel nach DIN 4108  $n_{50}$  ( $h^{-1}$ ) (Quelle: IB-THEISS, München)

Haustyp	max. Luftwechsel (DIN 4108 $n_{50}$ ( $h^{-1}$ ))
Einfamilienhäuser Neubauten mit Fensterlüftung	3
Mehrfamilienhäuser Neubauten mit Fensterlüftung	3
Wohnneubauten mit Abluftanlagen	1
Gebäude mit Zu-/Abluftanlagen oder Klimaanlagen	1

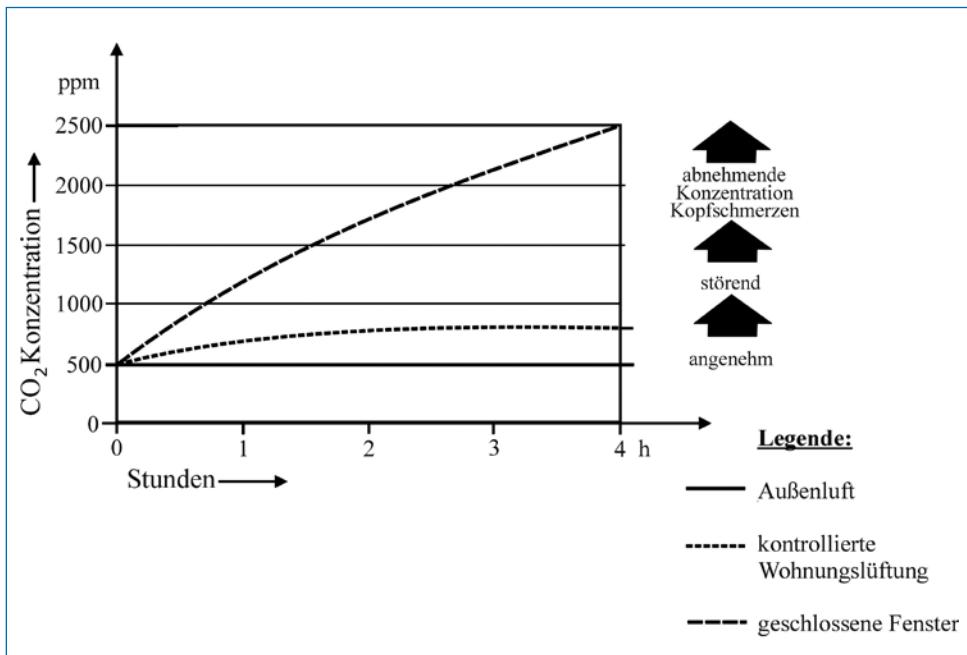
Die erforderlichen Außenluftraten für eine kontrollierte Wohnungslüftung sind aus der Graphik in Abb. 3-2 zu entnehmen.



**Abb. 3-2:** KWL-Systeme nach dem Wirkungsprinzip (DIN 1946-6) (Quelle: IB-THEISS, München)

**Tab. 3-4:** Mindestvolumenstrom der Bedarfslüftung (Quelle: IB-THEISS, München)

Anforderung	Volumenstrom (m <sup>3</sup> /h)
Außenluftmenge (m <sup>3</sup> /h Person)	25 bis 30
Abluftstrom aus WC-Räumen	20
Abluftstrom aus Bädern	40
Abluftstrom aus Küchen	60
Dunstabzugshauben beim Kochen	300

**Abb. 3-3:** CO<sub>2</sub>-Konzentration nach dem Lüftungsverhalten (Quelle: IB-THEISS, München)**Tab. 3-5:** Außenvolumenströme nach Wohnungsgruppen (DIN 1946-6) (Quelle: IB-THEISS, München)

Wohnungsgruppe	Wohnungsgröße (m <sup>2</sup> )	Personenbelegungsdichte	Grundlüftung (m <sup>3</sup> /h)	Gesamtlüftung (m <sup>3</sup> /h)
I	≤ 50	bis 2	60	60
II	> 50 bis ≤ 80	bis 4	90	120
III	> 80	bis 6	120	180

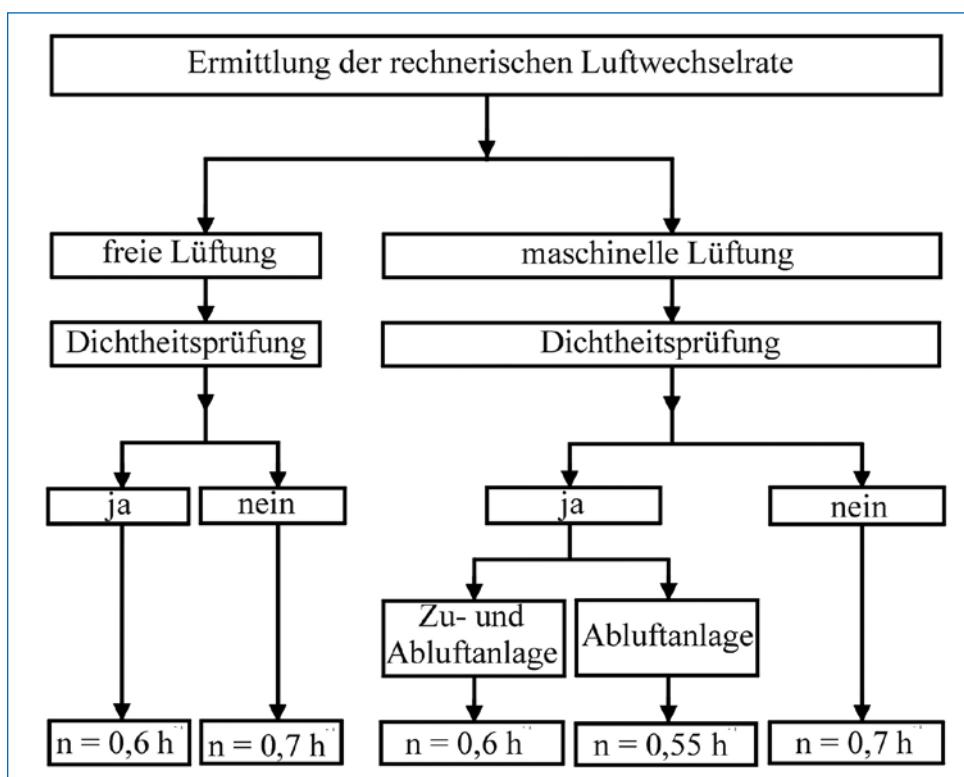
Hinweis: Die DIN 4108-2 geht innerhalb der zu betrachtenden Systemgrenze von einem durchschnittlichen Luftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  aus.

### 3.3.3.2 Luftwechselrate nach der EnEV

Bereits die EnEV 2002 enthält strenge Anforderungen an die Gebäudedichtheit. Diese Bestimmungen haben daher bei der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz Bestand. Die neue EnEV legt maximale Werte für den Primärenergieverbrauch von Wohngebäuden fest. Dabei wird erstmalig als ganzheitliche Betrachtung der eingebauten Anlagentechnik (Heizung, Lüftung, Warmwassererzeugung) der gleiche Stellenwert zugewiesen wie dem baulichen Wärmeschutz (Isolierung, Fenster, Dichtigkeit des Gebäudes).

Dies hat zur Folge, dass der Bauherr und der Architekt mehr Freiheiten in der Planung der Wohngebäude haben. Die hygienischen Vorteile einer kontrollierten Wohnungslüftung werden auch im Nachweisverfahren und im Energiepass als zusätzliche Qualität sichtbar. Ein Wohngebäude mit kontrollierter Wohnungslüftung (KWL) mit Wärmerückgewinnung hat hygienische Vorteile und im Energiepass eine günstige Einstufung.

Die geforderte Senkung des Energiebedarfs von Wohngebäuden zwingt aber gleichzeitig zur Reduktion der Lüftungswärmeverluste und somit zu einer dichten Bauweise der Gebäude. Dieser Standard wird durch die heutige Bauweise zuverlässig erreicht.



**Abb. 3-4:** Ermittlung der rechnerischen Luftwechselrate nach der EnEV  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Der Energieverbrauch der Raumlufttechnischen Anlagen für Luftförderung, Heizung, Kühlung, Befeuchtung und Entfeuchtung fließt hierbei nicht in das Nachweisverfahren ein. Aus diesem Grund konnte bisher auch eine Wärmerückgewinnung und energieeffiziente Anlagen-technik, Planung und Ausführung der Raumlufttechnischen Anlage nicht positiv bilanziert werden. Die Vorteile einer kontrollierten Wohnungslüftung erstrecken sich über:

- attraktive Maßnahmen zur Einhaltung der EnEV
- Vermeidung von Feuchteproblemen und Schutz der Bausubstanz und der Bewohner vor Schimmelbildung
- Luftfilterung der Außenluft als Schutz vor Schadstoffen und Pollen (Allergien)
- sichere Abfuhr von Raumschadstoffen wie Lösungsmittel, Gerüche, Rauch, Wohnraumgifte
- automatische Bedarfsregelung mit Nachabsenkung
- Rückgewinnung der Lüftungswärme bei Anlagen mit Wärmerückgewinnung.

Weitere Vorteile sind:

- keine Zugerscheinungen wie bei der Fensterlüftung
- Sicherheit auch bei Abwesenheit der Bewohner
- Vermeidung von Außenlärmelbelästigungen.

Die Systeme für eine kontrollierte Wohnungslüftung unterscheiden sich in:

- Einzelraumlüftung
- zentrale Lüftungsanlage
- zentrale Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung mit/ohne Wärmepumpe.

### 3.3.3.3 Wohnungslüftung im Niedrigenergiehaus

Durch die EnEV wird das Niedrigenergiehaus zum Standard erhoben. Es hat demnach keine besondere Qualität mehr. Eine kontrollierte Wohnungslüftung ist aus der Sicht der Genehmigung eine Alternative und/oder Ergänzung zum baulichen Wärmeschutz. Reine Wärmédämmmaßnahmen führen hierbei nicht zu Lösungen mit einem gleichzeitig höchsten Nutzen.

Aufgrund der erforderlichen Heizleistung im Niedrigenergiehaus wird in der Regel der Einsatz einer konventionellen Heiztechnik (Warmwasserheizung, Speicherheizung, etc.) zusätzlich zu den Systemen der kontrollierten Wohnungslüftung (KWL) erforderlich. Ein Energievergleich lässt sich anhand eines Modellhauses darstellen, wobei die Aufwandszahlen und der Primärenergiebedarf für verschiedene Anlagensysteme verglichen werden. Als Basis für diese Vergleichsrechnung lassen sich die Aufwandszahlen mit Standardwerten aus der DIN 4701-10 verwenden. Als Ergebnis zeigt sich, dass ein Gebäude mit einer konventionellen Niedertemperaturheiztechnik die Forderungen der EnEV in der Regel nicht erfüllt. Da die EnEV-Forderungen auch beim Einsatz einer Standard-Brennwerttechnik nicht erfüllt werden, muss der maximale Primärenergiebedarf durch Integration einer zusätzlichen Anlagen-technik wie:

- Solarenergienutzung
- Wärmepumpe
- kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung

weit unter den zulässigen Maximalwert verringert werden.

So erfüllt z. B. der Einsatz einer konventionellen Niedertemperaturheiztechnik, gegebenenfalls mittels einer Brennwertnutzung mit schwefelarmem Öl, in Verbindung mit einer kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung die Forderungen der EnEV.

Wenn sich der Gebäudeeigner und Architekt für den Einbau von Brennwerttechnik plus kontrollierter Wohnungslüftung entscheidet, kann auch der bauliche Wärmeschutz auf die geforderten Mindestwerte reduziert werden. Somit kann bei einer Massivbauweise auf ein Wärmedämmverbundsystem verzichtet werden.

### 3.3.3.4 Wohnungslüftung im Passivhaus

In einem Passivhaus sind die Zielvorgaben bezüglich des Primärenergieverbrauchs nur unter Verwendung einer kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung zu erreichen. Die Wärmedämmung und die Gebäudedichtheit sind bei diesem Gebäudetyp bereits so gut ausgeführt, dass zusätzliche Investitionen äußerst unwirtschaftlich werden. Aus diesem Grund rückt insbesondere in einem Passivhaus die Anlagentechnik in den Mittelpunkt. Aufgrund des Einsatzes entsprechend hochwertiger Systeme können die Aufwandszahl und damit der Primärenergieverbrauch bis über 20% verringert werden. Im Passivhaus werden in der Regel keine Heizsysteme installiert, die während der Heizperiode auftretende, stark erhöhte Lüftungswärmeverluste, resultierend aus schlecht funktionierender Wärmerückgewinnung oder umfangreicher Fensterlüftung, abdecken können.

Auch Zuglufterscheinungen können nur in begrenztem Umfang durch eine Erhöhung der Lufttemperaturen ausgeglichen werden. Im Gegensatz hierzu ist es in den heute üblichen Gebäudestandards in der Regel noch möglich, unzureichende Leistungen der Lüftungsanlage durch zusätzliche Fensterlüftung oder verstärkte Raumwärmefuhr zu kompensieren.

Aufgrund dieser Kriterien für ein Passivhaus ist eine detaillierte und sorgfältige Anlagenplanung unerlässlich. Für ein Passivhaus stellt sich generell die Frage nach einer Nachheizungsmöglichkeit. Wenn die Nachheizung vorrangig über das Lüftungssystem erfolgen soll, ist es erforderlich, ein Nachheizregister in das RLT-System zu integrieren. Dieses kann an zentraler Stelle im Zuluftkanalsystem erfolgen oder dezentral als Beheizung nur einzelner Räume oder Gebäudezonen.

Als typische Geräte werden Kompaktgeräte mit einer integrierten Wärmepumpe eingesetzt. Als Planungstool bietet sich die Software des VFW nach DIN 1946-6 (aktualisiert) auf Excel-Basis an. Bezug über: Bundesverband für Wohnungslüftung e. V. (VFW), Fachverband für Energiemarketing und Anwendung (HEA) und Institut für Technische Gebäudeausrüstung (ITG), Dresden ([www.wohnungslueftung-ev.de](http://www.wohnungslueftung-ev.de))

### 3.3.4 Forderungen

Anreize zur Errichtung von mechanischen Wohnungslüftungsanlagen werden durch Erleichterungen beim baulichen Wärmeschutz gegeben.

Hierbei gelten folgende Bonuswerte, d. h. Minderungen auf den Lüftungswärmebedarf:

- 5 % Minderung für eine Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung
- 25 % Minderung für Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- 30 % Minderung für Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe.

Über dieses Bonuspaket hinaus können mit der Begründung

- Einsparung an Primärenergie
- Verringerung der Umweltbelastung durch Reduzierung der Schadstoffemission

eine Reihe von Förderungen durch Bund, Länder, Kommunen sowie durch die Energieversorgungsunternehmen (EVU) erreicht werden. U.a. wird der Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im Rahmen der staatlichen Wohneigentumsförderung (Förderung ökologischer Maßnahmen) bezuschusst.

### 3.3.5 Wirtschaftlichkeit

Der Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung (KWL) ist im Neubau eine bauphysikalische und hygienische Notwendigkeit. Innerhalb gewisser Grenzen ist es den Verantwortlichen (Architekten/Fachplanern) freigestellt, ob sie die Reduktion durch Investitionen in baulichen Wärmeschutz oder effiziente Anlagentechnik realisieren. In den meisten Fällen ergeben sich Lösungen, die – rein wirtschaftlich betrachtet – der Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung einen Vorteil einräumen. So können z. B. Mehrinvestitionen in Warmgläser oder in zusätzlich erforderliche Dämmebenen auf der Grundlage der rechnerischen Energieeinsparung mit der Mehrinvestition für die Wärmerückgewinnungstechnologien verglichen werden.

In der Regel erweist sich die Investition in die Anlagentechnik als sinnvoller, auch ohne dass der Komfortgewinn in die Rechnung mit einfließt. Zudem ist die Bewillung der öffentlichen Fördergelder ohne den Einsatz von RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung meist nur mit erheblich größerem Aufwand möglich. Dieser Faktor muss natürlich in jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden.

## 3.4 Wärme- und Kälterückgewinnungssysteme

### 3.4.1 Grundlagen

Die Zusammenhänge zwischen Energieverbrauch, Schadstoffbelastung, Klimaveränderung und Gesundheitsrisiko werden immer mehr erkannt. Substitution der fossilen Energieträger und allgemeines Energiesparen sind unabhängig von den jeweiligen Energiepreisen zu einer absoluten Notwendigkeit geworden. Es ist notwendig, dass der Verbrauch von Energie durch den Einsatz geeigneter Technologien optimiert wird. Zu den wichtigsten Entscheidungskriterien bei der Auswahl eines Energiesystems, zählt neben der Funktionssicherheit die Wirtschaftlichkeit.

Über die Sommermonate muss die warme Außenluft oftmals gekühlt werden, um ein behagliches Raumklima zu erhalten. Zur Erreichung von konstanten Raumtemperaturen bei unterschiedlichen Außentemperaturen werden nach dem Stand der Technik oftmals Vollklimaanlagen mit Heizung und Kühlung sowie mit Umluftbeimischung und Wärmerückgewinnung eingesetzt. Die im Trend weiter ansteigenden inneren Wärmelasten (Beleuchtung, Büroelektronik, etc.) sowie die Forderung nach leistungsfördernden Arbeitsbedingungen vermehren den Einsatz von Vollklimaanlagen. Konventionelle Klimaanlagen genügen diesen Forderungen jedoch nur mit einem großen Einsatz an Investitionen und Energie. Die Investitionskosten der einzelnen Komponenten sind durch die Verrohrung der Heiz- und Kühlanschlüsse sowie die Verkabelung der Steuer- und Regeleinrichtungen oftmals sehr hoch. Zudem bereitet es in der Regel Schwierigkeiten, die einzelnen Komponenten auf optimale Wirkungsgrade und eine effiziente Regelung abzustimmen.

Die Merkmale von modernen, auf Luftqualität und Umweltverträglichkeit konzipierten Anlagen sind:

- minimaler Energiebedarf zur Luftförderung durch optimal abgestimmte Ventilatoren
- geringe luftseitige Gerätewiderstände
- hohe Wärme-/Kälterückgewinnung
- gute Luftfilterung
- minimaler Energiebedarf zur Nacherwärmung und Kühlung
- Außenluftbetrieb für die »freie« Kühlung
- Umluftbetrieb außerhalb der Benutzungszeit
- Betriebssicherheit bei allen Außentemperaturen
- komplett eingebaute Steuer- und Regeleinheiten
- minimale Wartungs- und Reparaturkosten.

Außer der Ersparnis an Energiekosten lassen sich aufgrund der Wärmerückgewinnung bei Elektro- oder Fernwärme auch Anlagenkosten einsparen. Bei der eigenen Wärmeerzeugung kann der Wärmeerzeuger um den Anteil der rückgewinnbaren Wärmeleistung kleiner ausgelegt werden. Analog gilt dieses auch bei der richtigen Systemlösung für den Kälterückgewinn.

### **3.4.1.1 Wärme- und Kälterückgewinnung durch Nutzung von thermischer Energie aus Abwärme**

Bei der rationellen Energienutzung der Abwärme über Wärmerückgewinnungssysteme wird unterschieden nach:

- Wärmerückgewinnung mit Exergiezufuhr (Abwärmeaufwertung), z. B. durch Wärmepumpen oder auch bei der Kraftwärmekopplung durch geringere Abarbeitung des Arbeitsmittels (Wandlung der Abwärme)
- Wärme- und Kälterückgewinnung ohne Exergiezufuhr durch rekuperative oder regenerative Wärmeübertragung.

Bei der Wärmerückgewinnung wird die Abluftwärme zu Heizzwecken genutzt. Die primär-energetisch sinnvollste Variante der Wärmerückgewinnung wird in der Nutzung der Abluft-

wärme im Winter zur Erwärmung der Zuluft erreicht. Diese direkte Nutzung benötigt für den Transport der Luft durch den Wärmeübertrager nur wenig Primärenergie und es lässt sich mehr als das zehnfache an Heizwärme im Vergleich zur Transportenergie zurückgewinnen.

**Tab. 3-6:** Wärmerückgewinnungssysteme nach VDI und EUROVENT (Quelle: IB-THEISS, München)

System Kennzeichen	Wirkungsweise	VDI Kategorie	EUROVENT Kategorie
Trennflächen- Rekuperator	Wärmeübertragung über Trenn- flächen: – feste Trennwände	I	
	– poröse Trennwände		I a
	Stoffaustausch findet nicht statt		I b
Kreislaufverbund Regenerator	Aus mehreren Rekuperatoren zu- sammengesetzte Einheit Wärmeübertragung mithilfe eines Zwischenmediums vom Kühler in der Fortluft zum Vorwärmer in der Außenluft: – ohne Phasenwechsel	II	
	– mit Phasenwechsel		II a
	Stoffaustausch findet nicht statt		II b
Kontaktflächen- Regenerator mit drehendem fes- tem Wärmeüber- trager (Rotor)	Wärme- und Stoffaustausch über Kontaktflächen Warm- und Kaltluft durchströmen räumlich getrennt den bewegten Wärmeübertrager: – Stoffaustausch durch Ab- und Desorption	III	
	– Stoffaustausch durch Konden- sation / Verdunstung		III a
			III b

Das Wärmeübertragungsvermögen wird u. a. wesentlich bestimmt von einem guten Wärmeübergang von beiden Medien auf die gemeinsame Grenzfläche, d. h. vom Wärmeübertragungsbeiwert und Wärmeübertragungskoeffizienten ( $k_{WÜ}$ ). Dieser beträgt in der Praxis bei Brauchwarmwasseranlagen ca. 200 bis 300 W/m<sup>2</sup>K und erreicht bei effizienten Rohrbündel-Gegenstromwärmeübertragungen Werte bis 2.000 W/m<sup>2</sup>K.

Bei der indirekten Nutzung der Abluftwärme als Wärmequelle für eine Abluftwärmepumpe muss zur Nutzung der Abwärme elektrische Energie für die Wärmepumpe aufgewendet werden. Bezogen auf die Primärenergie lässt sich etwa ein Wirkungsgrad erzielen, der deutlich geringer ist als der bei einer direkten Nutzung.

### 3.4.1.2 Wärme- und Kälterückgewinnung durch regenerative und rekuperative Wärmerückgewinnungssysteme

Beim Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen ist es u. a. entscheidend, ob eine teilweise Rückgewinnung der mit der Fortluft nutzlos abgeleiteten Wärmeenergie und Feuchtigkeit wirtschaftlich ist. So lassen sich, z. B. bei einem Raumluftzustand von 22 °C und 45 % r. F. sowie bei einer Fortlufttemperatur von 24 °C, mit dem Enthalpiewärmeübertrager im Jahresmittel bei einer Taupunktanlage mit Wässcherbefeuchtung, rund 50 % des Fortluftwärmeinhalts zurückgewinnen. Da der Wärmerückgewinn von Plattenwärmeübertragern (Glasplatten-, Aluminiumplatten-Wärmeübertrager) in der Größenordnung der Kreislaufverbundsysteme (KV-Systeme) liegt, der direkte Wärmetausch jedoch eine Zusammenführung von Fortluftstrom und Außenluftstrom erfordert und somit in der Gesamtbetrachtung ungünstiger wird, kann der Einsatz hier vernachlässigt werden. Hiermit soll keinesfalls ausgesagt werden, dass die KV-Systeme aus anderen technischen Gründen, z. B. bei Betriebssystemen, die eine strikte Trennung der Außen- mit der Fortluft verlangen, entbehrlich wären.

Die Maßnahmen zur Energierückgewinnung bewirken auch eine Reduzierung des Leistungsbedarfs. Daher können auch die Versorgungsanlagen kleiner dimensioniert und besser, d. h. gleichmäßiger, genutzt werden. In der Praxis werden unterschiedliche Wärme- und Kälterückgewinnungssysteme eingesetzt:

- direkte Umluftbeimischung
- regenerative Rückgewinnung (Rotationssystem)
- rekuperative Rückgewinnung (Kreislaufverbundsystem, Wasserumlaufsystem)
- Kreislaufverbundsysteme
- Wechselspeicher-Umschaltspeicher.

## 3.4.2 Systemvarianten

### 3.4.2.1 Direkte Umluftbeimischung

Die konventionellen Verfahren, d. h. der Austausch verbrauchter Raumluft gegen Außenluft, führen im Winter zur Erwärmung der Außenluft und zu einem hohen Energieverbrauch. Dagegen muss im Sommer die warme Außenluft oftmals gekühlt werden, um ein behagliches Raumklima zu erhalten. Zur Erreichung von konstanten Raumtemperaturen bei unterschiedlichen Außentemperaturen werden nach dem Stand der Technik oftmals Vollklimaanlagen mit Heizung und Kühlung sowie mit Umluftbeimischung und Wärmerückgewinnung eingesetzt. Die stets größer werdenden inneren Wärmelasten sowie die Forderung nach leistungsfördernden Arbeitsbedingungen vermehren den Einsatz solcher Vollklimaanlagen. Konventionelle Klimaanlagen genügen diesen Forderungen jedoch nur mit einem großen Einsatz an Investitionen und Energie. Die Investitionskosten der einzelnen Komponenten sind durch die Verrohrung der Heiz- und Kühlanschlüsse sowie die Verkabelung der Steuer- und Regeleinrichtungen oftmals sehr hoch. Zudem bereitet es häufig Schwierigkeiten, die einzelnen Komponenten auf optimale Wirkungsgrade und eine optimale Regelung abzustimmen.

### 3.4.2.2 Regenerative Wärmerückgewinnungssysteme

Bei der regenerativen Wärmerückgewinnung handelt es sich um ein Wärmerückgewinnungssystem, bei der außer einer Temperaturanhebung durch Wieder- bzw. Weiternutzung der Abluftwärme auch eine Zustandsänderung mit Stoffaustausch erfolgt, z. B. eine Änderung der Luftfeuchte, u. U. mit einer Latentwärmeverwendung. Dieser Wärmeübertrager besteht aus einer rotierenden Scheibe (Rotor) mit hygroskopisch imprägnierter Speichermasse. Fortluft und Außenluft werden im Gegenstrom in axialer Richtung durch den Rotor geführt. Der Getriebemotor ermöglicht eine Drehzahlveränderung des Rotors und damit eine Regulierung der Wärmeübertragungsleistung. Durch Drehung des Rotors kommt die Speichermasse abwechselnd mit dem Fortluftstrom und dem Außenluftstrom in Berührung, wobei sich zugleich die Strömungsrichtung umkehrt.

Die Enthalpie der Fortluft wird hierbei zu einem Teil gespeichert und an die Außenluft übertragen. Eine Schleuszone verhindert einen Luftübertritt zwischen den Luftströmen. Je nach konstruktiver Ausführung der Schleuszone beträgt die Leckrate bis ca. 3 %. Durch den Einsatz einer Doppelspülkammer ist die Begrenzung des Mitrotationsvolumens auf 0,05 bis 0,2 % möglich. Die regenerativen Wärmerückgewinnungsanlagen werden in Sorptionsregeneratoren und Kondensationsregeneratoren unterteilt.

Der Sorptionsregenerator kann aufgrund seiner hervorragenden Sorptionseigenschaften ganzjährig sowohl sensible (fühlbare) als auch latente (an die Feuchtigkeit gebundene) Wärme mit gleich hohen Rückwärme- bzw. Rückfeuchtezahlen übertragen. Die Übertragungsgütegrade liegen hierbei, je nach Rotoranströmgeschwindigkeit, zwischen 70 und 95 % der vorhandenen Temperatur- bzw. Feuchtedifferenzen. Beim Kondensationsregenerator ist eine Be- und Entfeuchtung nur bei fortluftseitiger Taupunktunterschreitung möglich, während die Übertragung der sensiblen Wärmeenergie ganzjährig analog dem Sorptionsregenerator erfolgen kann. Bei extremen Außenluftzuständen im Winterbetrieb ist eine Vereisung des Rotors möglich. Diese lässt sich durch zusätzlichen Einbau eines Vorluftherstellers in den Außenluftkanal vermeiden.

#### Vorteile

- Durch volle Ausnutzung der Enthalpie des Fortluftstromes entsteht ein hoher Wärmerückgewinnungsgrad.
- Der Feuchteaustausch kann zwischen den beiden Luftströmen stattfinden.
- Durch das Regenerativgegenstromprinzip ist eine Selbstreinigung des Rotors gegeben, dadurch wird einer etwaigen Staubablagerung entgegengewirkt.
- Eine Übertragung stofflicher Verunreinigungen der Fortluft (Staub, Keime) auf die Außenluft, Leckluftrate ca. 3 %, ist jedoch nicht auszuschließen.

#### Nachteile

- Fortluft- und Außenluftstrom müssen im Technikbereich zu einem Gerät zusammengeführt werden. Unter den baulichen Gegebenheiten bedeutet dieses in Praxis oft schwierige Konstruktionen herzustellen.
- Durch den hohen Luftwiderstand des Wärmeübertragers entstehen zusätzliche Energiekosten.

- Bei einer hohen Fortluftfeuchte und niedriger Außentemperatur ist der Einsatz eines Vorlufthermators einschl. Armaturen, Verrohrung, Isolierung, Regelventil und Regelung erforderlich.
- Die Anordnung der Ventilatoren wird vorgeschrieben: Zuluftventilator und Fortluftventilator in Luftrichtung nach dem Wärmeübertrager.
- Die Investitionskosten sind hoch.

### **Langsam rotierender Enthalpiewärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung (Sorptionregenerator)**

Bei einer Nicht-Taupunktanlage mit Dampfbefeuchtung beträgt, bei einem Raumluftzustand von z. B. 22 °C und 45 % r. F. sowie bei einer Fortlufttemperatur von 24 °C, der Anteil des Fortluftwärmeinhalts im Jahresmittel ca. 80 %, wenn die mittlere Zulufttemperatur in der Heizperiode bei ca. 20 °C liegt.

#### **3.4.2.3 Rekuperative Wärmerückgewinnungssysteme**

Bei der rekuperativen Wärmerückgewinnung handelt es sich um ein Wärmerückgewinnungssystem, bei dem die Abwärme einer Wärmenutzung zur Vorwärmung des betreffenden Arbeitsmediums genutzt wird.

*Beispiel:*

1. Vorwärmung des kalten Leitungswassers oder der kalten Außenluft durch die Abwärme aus dem Brauchwasser oder der Raumheizung.
2. Nutzung der Abwärme von thermischen Industrieprozessen oder Verbrennungsgasen zur Raumheizung.

Geeignete Hilfsmittel für die rekuperative Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser von Küche und Bad sind u. a. Wärmerohranlagen. Für die rekuperative Wärmerückgewinnung aus der Fortluft beheizter Räume eignen sich Kreuzstromwärmeübertrager (Plattenwärmeübertrager).

#### **Glasplattenwärmerückgewinner**

Bei diesem System bilden Glasplatten die Wärmeübertragungsfläche. Durch Distanzleisten entstehen Zwischenräume, durch die Fortluft und Außenluft im Kreuzstrom geführt werden. Der korrosionsfeste Werkstoff erlaubt den Einsatz in Anlagen mit chemisch aggressiven Zusätzen. Ein weiterer Vorteil ist das Fehlen beweglicher Teile. Durch Sprühdüsensysteme ist eine leichte Reinigung möglich. Bei niedrigeren Außentemperaturen kondensiert die feuchte Fortluft im Wärmeübertrager; dabei ergibt die Kondensationswärme einen höheren Wärmerückgewinn. Eine weitere Absenkung der Außentemperatur kann zur Vereisung führen. Zur Vermeidung der Reifbildung ist ein Vorlufthermator einzubauen. Eine Übertragung stofflicher Verunreinigungen der Fortluft (Staub, Keime) auf die Außenluft, Leckluftanteile ca. 3 %, ist jedoch nicht auszuschließen. Die Glasplattenwärmerückgewinner können grundsätzlich im Trockenbetrieb oder im Nassbetrieb gefahren werden.

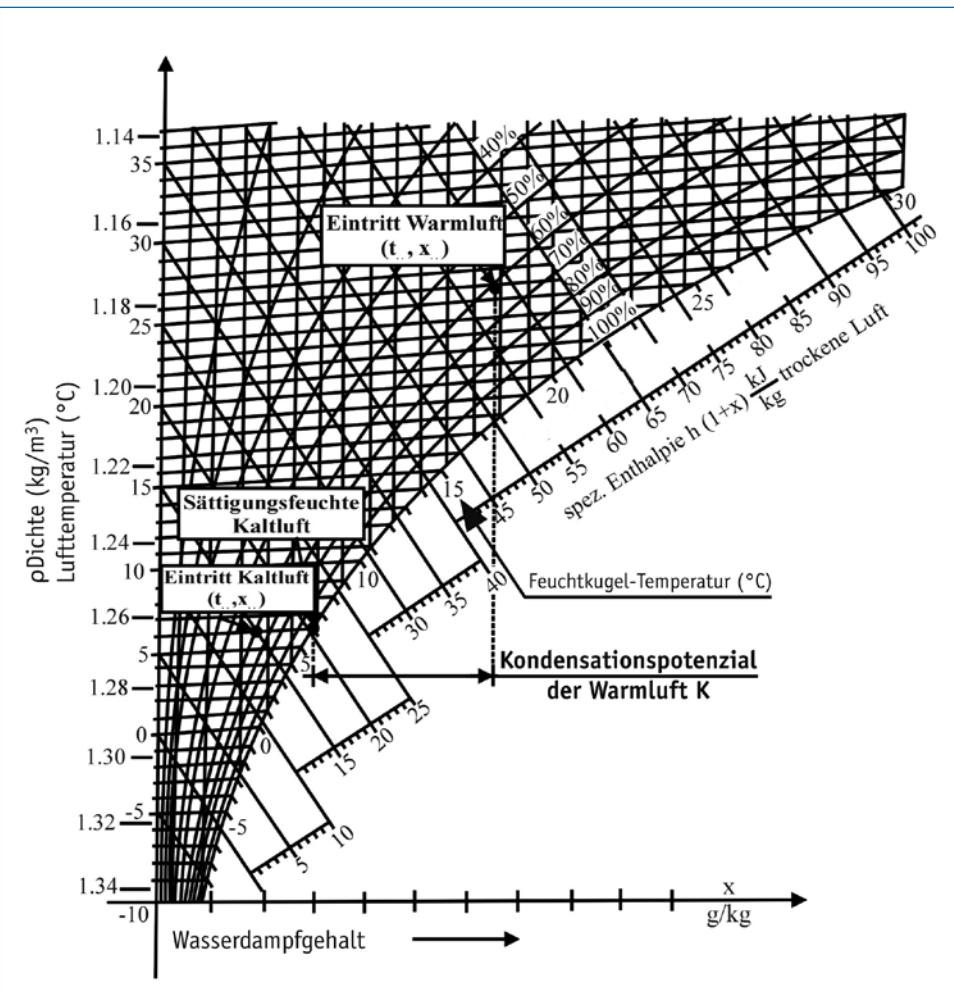


Abb. 3-5: Kondensationspotenzial (K) der Warmluft (Quelle: IB-THEISS, München)

Bei der Geräteauslegung sollte überprüft werden, ob Kondensation auf der Fortluftseite auftritt. Ist die Differenz des absoluten Wassergehaltes von Außenluft- und Fortluftstrom kleiner als 2 bis 3 g/kg, dann kann angenommen werden, dass das System im Trockenbetrieb arbeitet. Liegt dagegen der Unterschied der Feuchtigkeitswerte über 3 g/kg, dann wird die stattfindende Kondensation zum Nassbetrieb führen. Für den Betrieb bei Außentemperaturen unter  $-3^{\circ}\text{C}$  muss ein Frostschutz eingebaut werden. In diesem Fall ist dann der Einbau eines Vorerwärmers nicht erforderlich.

### Aluminium- oder Kunststoffplattenwärmeübertrager

Alternativ bietet sich der Einsatz von Aluminium- oder Kunststoffplattenwärmeübertragern an.

### Vorteile

- Es gibt keine beweglichen Teile und der Wartungsaufwand ist gering.
- Anordnung der Ventilatoren nicht vorgeschrieben. Bei Anordnung des Abluftventilators vor dem Wärmeübertrager kann die Ventilatorwärme ausgenutzt werden.
- Die Glasplattenwärmerückgewinner haben einen besonderen Effekt zur Schalldämpfung. In der Regel erreichen die bei 250 Hz, 13 dB. Die beste Schalldämpfung wird erreicht, wenn die Ventilatoren zum Wärmeübertrager gesehen zuluftseitig drückend und fortluftseitig saugend angeordnet werden. Es kann jedoch auch unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Druckdifferenz passieren, dass der Zuluftventilator saugseitig angeordnet werden muss.

### Nachteile

- Fortluft- und Außenluftstrom müssen im Technikbereich zu einem Gerät zusammengeführt werden, daher werden oft schwierige konstruktive Lösungen benötigt.
- Es entsteht ein relativ hoher luftseitiger Widerstand des Wärmeübertrages und daraus folgend erhöhte Energiekosten.
- Zur Regulierung der Wärmeübertragung ist im Außenluftstrom ein Bypass mit Klappensteuerung erforderlich.
- Erschwerte Montage, schwingungsfreie Aufhängung des Wärmeübertragers, Bruchgefahr durch Materialspannungen.
- Es besteht intensiver Reinigungsaufwand: Der Wärmeübertrager muss in kurzen Zeitabständen gereinigt werden.
- Bei hoher Fortluftfeuchte und niedriger Außenlufttemperatur ist der Einsatz eines Vorlufthermometers einschl. Armaturen, Verrohrung mit Isolierung und Regelkreis erforderlich.
- Die Anlagenkosten sind hoch.

**Objektbeispiel:** Leitzentrale der Holcim-Zementwerke in Dotternhausen, Baden-Württemberg  
Architekten: architektur-k, Geisingen (Thomas Kreuzer und Andreas Ernst)

Der zweigeschossige Leitstand im Zementwerk Holcim wurde in einer ästhetischen, modernen, schwebenden und zugleich funktionalen Architektur errichtet. Als Planungsergebnis wurde ein integrativer und konzentrierter dreiteiliger Arbeitsbereich (Cockpit) in der Geometrie eines »Wankelmotors« konzipiert, der den Leitstand in einer äußeren elliptischen Form präsentiert.

Hierbei wurden nicht nur die Ästhetik und die Arbeitsergonomie beachtet, sondern es wurde eine energetische Optimierung hinsichtlich der Bauphysik und Anlagentechnik umgesetzt. So lassen die Sonnenschutzgläser und die transluzenten Glaselemente mit Okaluxfüllungen viel natürliches Licht ins Gebäude und schützen zugleich vor einem Übermaß an Wärme.

Um mit dem schweren Baumaterial »Beton« einen Eindruck von schwelender Leichtigkeit zu vermitteln, wurden die formgebenden Bauteile, wie drei Wandscheiben, zwei elliptische Deckenplatten und eine umgekehrte Kegelstumpfstütze so zueinander konzipiert, dass ein schwelender Effekt entsteht.



**Abb. 3-6:** Leitzentrale der Holcim-Zementwerke in Dotternhausen, Baden-Württemberg  
(Quelle: architektur-k, Geisingen)

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik*

Die gesamte Architektur, in der eine energetisch optimierte Gebäudesystemtechnik integriert wurde, vermittelt einen futuristischen Eindruck. Die Wärmeabfuhr der Innenlasten erfolgt zum Teil über das im Erdgeschoss aufgestellte RLT-Zentralgerät mit einem Luftdurchsatz von  $4.200 \text{ m}^3/\text{h}$ , wobei der Abluftstrom über einen im Zentralgerät angeordneten Plattenwärmeübertrager (Rekuperator) geleitet wird, der mit einem hohen Rückwärmanteil zur Energiebilanz beiträgt. Da die Betonkernaktivierung aufgrund der Speicherfähigkeit und Phasenverschiebung über Nacht mit dem natürlichen Kühlpotenzial geladen wird, konnte die Dimensionierung des Kaltwassersatzes gegenüber der sommertlichen Maximallast reduziert werden.

**Tab. 3-7:** Referenzprojekte für RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnungssystemen  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
AllianzArena in München Herzog & De Meuron Architekten, Basel	Wärmerückgewinnung	
DFB-Zentrale Frankfurt/M.		KV-Wärmerückgewinnung, Gebäude-Nachtauskühlung
PowerTower (Büro- und Verwaltungsgebäude), Linz	PassivhausTower (Green Buildings); multifunktionale Fassade; Tageslichtsysteme; 46 Erdwärmesonden ( $6.900 \text{ m}^2$ ), reversierbare Brunnenwasser/Wärmepumpe	Wärmerückgewinnung der Rechenzentrum-Abwärme, $330 \text{ kW}$ ; $700 \text{ m}^2$ fassadenintegrierte Photovoltaikanlage; Gebäudeleittechnik

### 3.4.2.4 Kreislaufverbund (KV-)Wärmerückgewinnungssysteme

Bei diesem System werden Wärmeübertrager mit Lamellenrohren in üblicher Bauweise im Außenluft- und im Fortluftstrom angeordnet und durch ein Rohrsystem miteinander verbunden. Durch eine Umwälzpumpe wird der flüssige Wärmeträger zwischen beiden Wärmeübertragern in Umlauf gehalten. Mittels dieses Wärmeträgers wird die Wärme aus dem Fortluftstrom an den Außenluftstrom übertragen und damit ein rekuperativer Wärmerückgewinn wirksam.

Vorteilhaft ist hier die individuelle Anpassung an die jeweiligen baulichen Gegebenheiten. Die qualitativen und quantitativen Änderungen der RLT-Anlage während des Jahres können durch Leistungsreduzierung mit einer Bypassregelung des umgewälzten Wärmeträgermediums erreicht werden.

#### Vorteile

- beliebige Lage im Bereich der Außenluft- und Fortluftkanäle möglich
- Rückgewinnung von Wärme aus mehreren auseinanderliegenden Abluftströmen kann an mehrere auseinanderliegende Zuluftströme übertragen werden
- Vorlufterwärmer zur Temperaturanhebung der Außenluft kann entfallen
- relativ niedriger luftseitiger Widerstand der Wärmeübertrager
- Anordnung der Ventilatoren nicht vorgeschrieben; bei Anordnung des Abluftventilators vor dem Wärmeübertrager kann die Ventilatorwärme ausgenutzt werden
- relativ geringe Anlagenkosten.

#### Nachteile

- vergleichsweise geringer Wärmerückgewinnungsgrad
- zusätzliche Umwälzpumpe, Verrohrung mit Isolierung, Armaturen, Druckgefäß, Sicherheitsventil, etc. erforderlich
- zur Regulierung der Wärmeübertragung ist komplette Regelanlage erforderlich; Bypassregelung des umlaufenden Wärmeträgermediums.

#### Objektbeispiel: Bürogebäude Dockland in Hamburg

Architekten: Bothe Richter Teherani (BRT), Hamburg

Das siebengeschossige Bürohaus des Hamburger Architekturbüros Bothe Richter Teherani entstand auf 3.000 m<sup>2</sup> frisch aufgeschüttetem Neuland in der Elbe am Kopf des Edgar-Engelhard-Kais zwischen Norderelbe und Fischereihafen. Bei der Formgebung ließen sich die Architekten von Motiven aus dem Schiffbau inspirieren. Das in Form eines Parallelogramms entworfene Gebäude ragt wie ein Schiffsbug über der Elbe. Zwischen dem auskragenden »Bug« und seinem »Heck« beherbergt das Haus 9.000 m<sup>2</sup> Bürofläche.

#### Energiekonzept und Gebäudetechnik

Innerhalb der Büros fügen sich die großen Zentralellüftungsgeräte problemlos in die Architektur des gläsernen Bauwerks. Aufgrund der Einbaukomponenten handelt es sich um ein Vollklimaanlagensystem, mit dem nicht nur die Einhaltung der Behaglichkeitskriterien ga-



**Abb. 3-7:** Bürogebäude Dockland in Hamburg  
(Quelle: Robert Vogel, Hamburg; Fotograf: Jörg Hempel)

raniert wird, sondern mit dem hinsichtlich des Energierückgewinnungssystems in Form eines integrierten Kreislaufverbundsystems auch eine energetisch optimale Betriebsweise erreicht wird. Ferner werden niedrigere Betriebskosten durch den Einsatz von Ventilatoren mit freilaufenden Rädern erreicht, die mittels Frequenzumformer stufenlos geregelt werden. Die raumlufttechnische Ausrüstung wird zudem von zwei Zwischendeckengeräten ergänzt. Den Grundbedarf an Klimakälte deckt die Betonaktivierung in Verbindung mit Kühldecken.

### 3.4.2.5 Wechselspeicher-Umschaltregeneratoren

Zu den Regenerativwärmerückgewinnungssystemen mit feststehenden Speichermassen zählen auch die Enthalpieübertrager in Form von

- Umschaltregeneratoren (Luftklappen-Steuerungssysteme)
- Wechselspeicher.

Der Umschaltregenerator (auch Wechselspeicheranlage) besteht aus zwei getrennt angeordneten, feststehenden Speichermassen mit einer hochsensiblen Akkumulatormasse, die wechselweise im Gegenstrom mit warmer und kalter Luft beaufschlagt werden. Die RLT-Geräte mit Umschaltregeneratoren enthalten zwei Wärmepakete mit hoch wärmesensibler Speichermasse, durch welche die Außen- und Fortluft wechselweise gefördert wird. Den beiden Paketen ist zur Umschaltung der Luftwege ein Klappensystem zugeordnet. Abluft- und Zuluftventilator fördern gleichzeitig warme Fortluft durch das eine und kalte Außenluft durch das andere Paket. In kurzen Intervallen wird der Luftstrom durch das Klappensystem umgelenkt. In dem einen Paket wird die Wärme der Abluft gespeichert, während gleichzeitig die im anderen Paket gespeicherte Wärme an die Zuluft abgegeben wird.

Die Luftklappen, die den Luftstrom steuern, werden durch Elektrogetriebemotoren angetrieben. Die Speicherpakete bestehen aus 0,5 mm starken Aluminiumplatten. Für den Luftdurchtritt verbleibt zwischen den Alu-Platten ein Abstand von 5 mm. Die Akkumulatormasse hat die Eigenschaft, die Wärme aus dem Abluftstrom sehr schnell aufzunehmen, um diese nach dem Wechsel der Luftströme (Umschalten von Zyklus 1 auf Zyklus 2) an den Außenluftstrom wieder abzugeben. Die Filter werden als Standard in der Gütekategorie EU 4 geliefert.

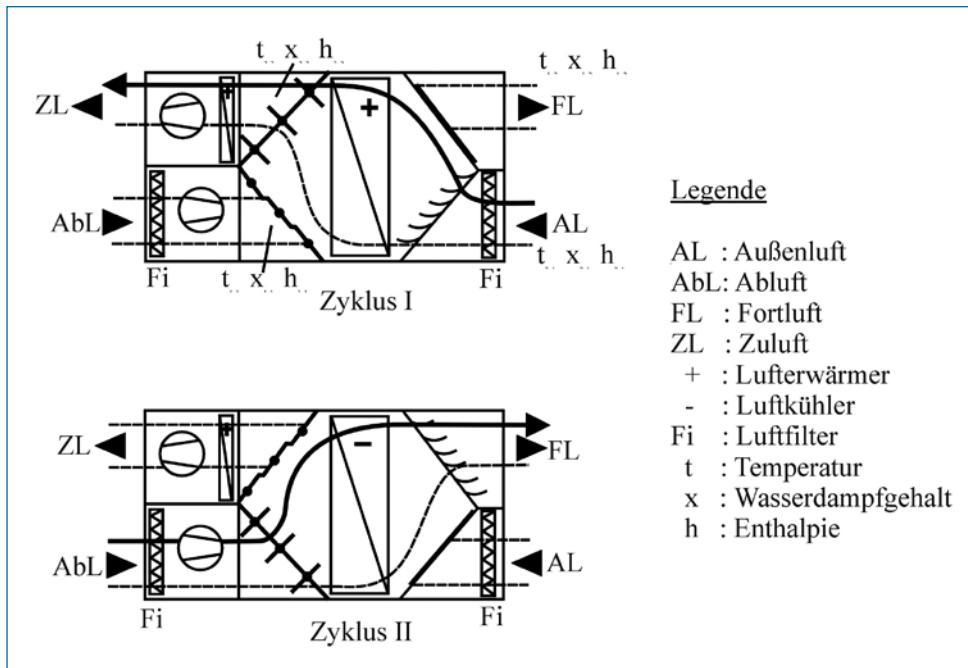


Abb. 3-8: Wechselspeicher-Umschaltregenerator (Quelle: IB-THEISS, München)

### Funktionsprinzip

Das in der Seitenansicht dargestellte vordere Speicherpaket wird in der Betriebsweise »Zyklus 1« gerade von der Außenluft durchströmt, wobei diese beheizt und unter gewissen Bedingungen vorbefeuchtet wird. Gleichzeitig werden die Platten des hinteren Speicherpakets von warmer Abluft durchströmt und thermisch aufgeladen. Nach Umschaltung der Luftklappen auf den Zyklus 2 wird der vordere Speicher wieder geladen. Beide Bilder, d. h. die Betriebsweise Zyklus 1 und 2, zeigen jeweils das vordere Speicherpaket. Bei den in der Abb. 3-8 rechts dargestellten Luftklappen handelt es sich um »dynamische Klappen«, die sich selbsttätig, d. h. ohne Antrieb betätigen. Als flexible Kunststofffolien werden sie aufgrund der Saugwirkung des Zuluftventilators an ein feststehendes Gitterprofil angepresst bzw. von diesem abgehoben (Zyklus 1), während sie bei Wirkung des druckseitig angeordneten Abluftventilators (Zyklus 2) als Fortluft geöffnet werden bzw. bei Außenluftfahrweise geschlossen werden. Das Umschalten der Luftströmung erfolgt mittels einer Umschalteinheit, in der sich eine elektrisch oder hydraulisch betätigtes Umschaltklappe befindet. Die Regeneratoren werden aus diesem Grund mit zwei Ventilatoren komplettiert als Kompaktgerät hergestellt.

**Vorteile:** Die Temperatur-Wirkungsgrade liegen beim Resolair-Wärmerückgewinnungssystem zwischen 85 bis 95 % bei Außentemperaturen von -15 bis 20 °C.

Im Winter erfolgt die Wärmerückgewinnung aus der Fortluft mit Erwärmung der Zuluft; im Sommer mit kalter Außenluft (freie Kühlung, oder Nachtkühlung) bzw. durch Kühlung der Zuluft mit Kälterückgewinnung aus der Fortluft.

Nach VDI 2071 errechnet sich zudem bei gleichen Anteilen an Luftmassenströmen der Übertragungsgrad des Wärmerückgewinners (Rückwärmezahl) zu:

$$\phi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}.$$

### Betriebsverhalten des Wärmerückgewinners

Während der Dauer eines Schaltzyklus wird eine Hälfte des Speicherplattenwärmeübertragers von der Abluft erwärmt, während die andere Hälfte von der Außenluft abgekühlt wird. In dieser Zeit nehmen die Temperaturdifferenz zwischen der Speichermasse und dem Luftstrom und somit auch die Wärmeübertragung ab. Einleuchtend ist es daher auch, dass die Temperaturschwankungen dann vergrößert werden, wenn die Zeitdauer pro Schaltzyklus verlängert wird. In der Regel werden die Umschaltregenratoren mit einer Zyklusdauer von 40 s gefahren.

### Regelung der Wärmerückgewinnerleistung

In den Jahresübergangszeiten ist in den meisten Lüftungsanlagen eine Begrenzung der Wärmerückgewinnungsleistung und daher in der Leistungsregelung erforderlich. Die Leistungsregelung in der Übergangszeit (Frühjahr/Herbst) ist generell durch eine Verlängerung der Schaltzyklen bis zur gänzlich unterdrückten Umschaltung möglich. Die Schaltperioden, die sich aus der Lade- und Entladezeit zusammensetzen, sind stets gleich und betragen in der Regel 80 s. Bei tiefen Außentemperaturen betragen die Lade- und Entladezeiten jeweils 40 s. In dem Fall, dass der Wärmerückgewinner eine kleinere Leistung liefern soll, verkleinert man die Zeitdauer der Ladung und vergrößert die der Entladung. Bei weiter steigender Außentemperatur nähert sich die Ladezeit dem Wert Null. Dann wird nicht mehr umgeschaltet und der Wärmerückgewinner ist praktisch außer Betrieb. Im Hochsommer bei Klimaanlagen, wenn die Abluft kühler ist als die Außenluft, wird die Wärmerückgewinnung wieder mit voller Leistung in Betrieb genommen und folglich ein Kälterückgewinn möglich. Die Außenluft wird somit vorgekühlt und entfeuchtet.

Die hohe Rückwärmezahl des Speicherplattenwärmerückgewinners führt in der gesamten Winterbetriebszeit zu hohen Zulufttemperaturen. Sodass in der Regel, insbesondere jedoch in Industriebetrieben mit hohen inneren Wärmequellen, auf eine konventionelle Nachheizung verzichtet werden kann.

### Änderungsgrade

Die Änderungsgrade liegen beim Umschaltwärmerückgewinner im Vergleich zu den anderen Verfahren verhältnismäßig hoch. In der Praxis wurden daher Rückwärmezahlen (trocken) von  $\Phi_A = 0,9$  bis 0,93 und Rückfeuchtezahlen  $\Phi_F$  von 0,8 bis 0,83 gemessen. Nach Angaben des Herstellers beträgt die Rückfeuchtezahl  $\Psi_A = 0,5$  bis 0,8, weil der Speicherwerkstoff eine sorptive Wirkung hat.

Die Speicher werden bei tiefen Temperaturen alle 40 s umgeschaltet. Hierbei gelangt das noch im Speicher befindliche Luftvolumen zwangsläufig in den anderen Luftstrom. Dieses betrifft auch die Luft in den Vorräumen zwischen den Klappen und den Speichern. Zudem schließen die Luftklappen nicht völlig dicht. Aus diesem Grund gelangten bis zu 5 % der

Abluft, also als Umluftverluste, in den eintretenden Außenluftbereich des Gerätes. Durch die Speicherpakete strömt zudem während einer Periode abwechselnd Außenluft in der einen und Fortluft in der anderen Richtung. Hierdurch erhält man bereits einen gewissen Reinigungseffekt. Außerdem sind in Stromrichtung vor den Speichern Luftfilter der Gütekategorie EU 4 installiert.

### **3.4.2.6 Doppel-Rekuperative-Wärmerückgewinnung mit adiabatischer Kühlung**

Hohe Wärmerückgewinnungsgrade lassen sich auch durch großflächige Doppel- und Dreifach-Rekuperatoren sowie mittels regenerativer Wärmeübertrager erreichen. Eine interessante Technologie stellen hier die Zentralklimageräte und Kaltwassersätze auf Basis adiabater Verdunstungskühlung dar.

In den meisten Klimaanlagen nutzen die Geräte zur Abdeckung der Raumkonditionen in der 1. Verfahrensstufe bei niedrigen Außentemperaturen die freie Kühlung in Form einer kaskadenförmigen Prozessführung. Bei steigenden Temperaturen wird in der 2. Verfahrensstufe die adiabate Verdunstungskühlung zugeschaltet. Zudem besteht die Möglichkeit, dass die Geräte für Anwendungsfälle mit hohen Anforderungen, z.B. eine konstante Raumtemperatur, mit zusätzlichen Kompressorkältemaschinen erweitert werden können. Die Kompressionskälteprozesse schalten sich erst bei extremen sommerlichen Außentemperaturen hinzu und ergänzen so die Kälteleistung des Verdunstungsprozesses.

### **3.4.2.7 Luftkanal-Erdwärmeübertrager (L-EWÜ)**

Das Erdreich hat eine fast konstante Temperatur, die sich auch im Jahresverlauf nur wenig ändert. Die Erdwärme des ungestörten Erdreichs in einer Tiefe von 10 m zeigt kaum Schwan- kungen und stammt primär aus der gespeicherten Sonnenenergie. Die Temperatur entspricht in etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur. Die weitgehend konstante Erdreichtemperatur ermöglicht es, zusätzlich Energiekosten zu sparen. Diese regenerative Erdwärme kann für den Betrieb der RLT-Anlagen zu Heiz- und Kühlzwecken verwendet werden. Bei einer entsprechenden Dimensionierung kann u. U. die gesamte Kälteanlage samt Kühlregister entfallen bzw. muss gegebenenfalls nur zur Spitzenlastabdeckung in Form von kleineren Einheiten bereitgestellt werden. Die angesaugte Außenluft für zentrale RLT-Anlagen kann in einem unter Terrain integrierten Erdluftkanal je nach Jahreszeit vorgewärmt bzw. vorgekühlt werden. Im Winter strömt so die Außenluft vorgewärmt zum RLT-Gerät, dessen Wärmeübertrager damit gleichzeitig vor dem Vereisen geschützt wird. Im Sommer wird die Außenlufttemperatur durch den Luftkanal-Erdwärmeübertrager abgesenkt, wodurch ein angenehmer Kühleffekt im Wohnraum entsteht. Als Material für Luftkanal-Erdwärmeübertragung (L-EWÜ) kommen nur witterungsbeständige, ungiftige und korrosionsbeständige Werkstoffe mit glatter Rohrinnenwand in Betracht.

Die angesaugte Außenluft für zentrale Lüftungsanlagen kann je nach Jahreszeit über einen im Erdreich eingebauten Wärmeübertrager vorgewärmt bzw. vorgekühlt werden. Im Winter strömt so die Außenluft vorgewärmt zum Lüftungsgerät, dessen Wärmeübertrager damit gleichzeitig vor dem Vereisen geschützt wird. Im Sommer wird die Temperatur der Außen-

luft durch den Erdwärmeübertrager abgesenkt, wodurch ein angenehmer Kühleffekt im Wohnraum entsteht.

Der Einsatz von Luftkanal-Erdwärmeübertrager (L-EWÜ) stellt sich als ein zusätzliches Investment der regenerativen Energienutzung mit einer kurzen Amortisationszeit dar, denn die weitgehend konstante Temperatur unterhalb der Geländeoberfläche ermöglicht es, zusätzlich Energiekosten zu sparen. In der Regel wird die Luft hierzu durch einen Betonkanal geführt, der in das Gebäudefundament integriert ist.

Im Winter strömt die Außenluft vorgewärmt zu den RLT-Zentralgeräten, dessen Wärmeübertrager einerseits kleiner dimensioniert werden kann und zum anderen gleichzeitig vor Vereisung geschützt wird. Im Sommer wird die erhöhte Außenluftlufttemperatur über den L-EWÜ abgesenkt und somit ohne Einsatz von konventionellen Kältemaschinen für die Innenräume ein angenehmer Kühleffekt erreicht. Die thermische Wirksamkeit des L-EWÜ hängt hierbei vor allem vom Verhältnis der Kanalinnenoberfläche zum Volumenstrom ab. Ein guter Anhaltswert für membranlose L-EWÜ kann mit  $0,04 \text{ m}^2$  Kanaloberfläche pro  $\text{m}^3/\text{h}$  Luftvolumenstrom veranschlagt werden. In den Gebäuden können im Prinzip zwei Varianten von Luftkanal-Erdwärmeübertragung integriert werden:

- membranlose Luftkanal-Erdwärmeübertragung
- Membran-Luftkanal-Erdwärmeübertragung.

Bei einem membranlosen Luftkanal-Erdwärmeübertrager wird die Außenluft direkt durch eine Kies- oder Steinschüttung angesaugt. Die Konstruktionsart ist kostengünstig herstellbar und zeichnet sich durch eine hohe thermische Effektivität aus. Allerdings wird diese Ausführung aufgrund der hohen Druckverluste und der ausgeprägten Neigung zur Verschlammung selten angewendet. Eine Weiterentwicklung wurde in der Form entwickelt, dass das Erdreich und die Luft durch eine Wandung voneinander getrennt werden. In der Praxis wird die Luftführung üblicherweise in Beton- oder Kunststoffrohren und Erdkanälen ausgeführt. Die Membran-Luftkanal-Erdwärmeübertrager sind im Betrieb äußerst anspruchslos, erfordern aber relativ hohe Investitionen. Zur Erhöhung der Kälteleistung eines membranlosen Luftkanal-Erdwärmeübertragers bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Vergrößerung der Kanaloberfläche durch eine Kanalverlängerung
- Verbesserung des Wärmeüberganges an der Kanalwand durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Teilung des Luftkanals in Längsrichtung
- Verbesserung der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit des Betons, z. B. durch Zusatzstoffe
- Optimierung der Betriebszeiten und Nutzung der nächtlichen Außenluft zur Luftkanalkühlung.

*Objektbeispiel:* Fakultät für Bildungswissenschaften der Universität Brixen (Südtirol)  
Architekten: Kohlmayer Oberst Architekten, Stuttgart

Der Neubau der Fakultät für Bildungswissenschaften der Universität Brixen besteht aus einem kompakten quadratischen Gebäudekomplex mit den Außenmaßen von  $75 \times 75 \text{ m}$  mit einem dreigeschossigen aufgeständerten äußeren Ring. Vier große Baukörper im Gebäudezentrum bilden den Kernbereich des Gebäudes. Der Neubau umfasst inklusive der Tiefgarage eine Bruttogeschoßfläche von  $23.000 \text{ m}^2$ .



**Abb. 3-9:** Fakultät für Bildungswissenschaften der Universität Brixen  
(Quelle: Günter Richard Wett, Innsbruck)

#### *Energiekonzept und Gebäudetechnik*

Die Räume innerhalb der Kernbereiche werden natürlich über motorisch betriebene Oberlichter be- und entlüftet. Aufgrund der hohen inneren thermischen Lasten (Personenfrequentierung, Beleuchtung, etc.) wurde eine zusätzliche mechanische Be- und Entlüftungsanlage mit integrierter Rekuperativwärmerückgewinnung errichtet. Die Seminar- und Funktionsräume mit hohen Innenlasten werden mit einem 4-fachen Luftwechsel beaufschlagt. Bei sämtlichen anderen Räumen erfolgt die Lufterneuerung mit einem 1-fachen Luftwechsel. In der Bibliothek erfolgt die Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit von der Personenfrequentierung geregelt. Für die Aula Magna wurde eine Klimaanlage mit integrierter Wärmerückgewinnung konzipiert, wobei zur Dimensionierung ein Luftwechsel von  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und Person zugrunde gelegt wurde. Der über Luftqualitätssensoren ( $\text{CO}_2$ -Sensor) bedarfsgeführte Luftvolumenstrom wird in Abhängigkeit von der Personenfrequentierung geregelt. Die Außenluft wird im Winter- und Sommerbetrieb durch einen 200 m langen Luftkanal-Erdwärmeübertrager (teilweise vom Grundwasser umschlossen) vorkonditioniert.

Die Beheizung und Kühlung der Räume erfolgt über einzelraumgeregelte Fußbodenheizungen im Zusammenspiel mit der ungeregelten Bauteilaktivierung (BTA). Diese arbeitet im Heizbetrieb bei einer Außentemperatur unter  $-5^\circ\text{C}$ . Die witterungsgeführte Regelung erfolgt bis zu einer max. Vorlauftemperatur von  $27^\circ\text{C}$ . Bei einer Temperaturdifferenz zwischen dem Vor- und Rücklauf von unter 3 K wird die thermoaktive Decke abgeschaltet. Bei Außentemperaturen über  $18^\circ\text{C}$  arbeitet die thermoaktive Decke mit einer konstanten Temperatur

von 16 °C im Kühlbetrieb. Bei Rücklauftemperaturen unter 20 °C wird der Kühlbetrieb abgeschaltet. Zur Kälteenergieerzeugung wird das regenerative Nutzungspotenzial über das Grundwasser genutzt, das über einen Förderbrunnen und Wärmeübertrager an das Kaltwassernetz übergeben wird.

**Tab. 3-8:** Referenzprojekte – Luftkanal-/Erdwärmeübertrager (L-/EWÜ) (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Justus von Liebig Schule in Waldshut, Harter und Kanzler, Waldkirch	Passivhausstandard; Erdwärme-Luftkanal für ca. 32.000 m <sup>3</sup> /h	Wärmerückgewinnung; Gebäudebauteil-Nachtkühlung; Photovoltaikanlage mit 251 m <sup>2</sup>
Seniorendomizil am Lönspark, Hannover	600 m-Erdwärmeübertrager (EWT), RLT-Wärmerückgewinnung	Passivhausstandard; Dämmkonzept, Brennwerttechnologie
Wohnanlage Ölzbündt in Dornbirn Hermann Kaufmann, Schwarzach/A	Die 13 Wohneinheiten mit 1 Bürotrakt werden energetisch über eine Luft/Luft-Wärmepumpe mit L-EWÜ versorgt.	Die Trinkwassererwärmung erfolgt zu 50 bis 70 % über eine Solarthermieanlage mit 33 m <sup>2</sup> .

### 3.4.2.8 Sonstige Wärmerückgewinnungssysteme

#### Heat-Pipe-Wärmerückgewinnung (Wärmerohr, engl. heat-pipe)

Als rekuperative Wärmeübertrager lassen sich auch Wärmerohre verwenden. Das Wärmerohrprinzip (thermische Diodenwirkung) wurde bereits 1944 von dem Amerikaner R. S. Gaugler zum Patent angemeldet, dann aber völlig vergessen und ca. 20 Jahre später neu entdeckt und technisch verwertet.

Die Funktionsweise des Wärmerohrprinzips lässt sich anhand des Schwerkraftwärmerohrs darstellen. Ein partiell mit einer geeigneten Flüssigkeit gefülltes Rohr wird allseitig hermetisch verschlossen und evakuiert (luftleer gepumpt). Wenn dieses Rohr die gleiche Temperatur wie die Umgebung hat (thermisches Gleichgewicht), dann stellt sich im Rohr ein Gleichgewichtszustand zwischen flüssiger und dampfförmiger Phase des Arbeitsmediums ein. Wird das untere Rohrende, »Heizzone«, durch eine beliebige Energiequelle geführt, dann verdampft die Flüssigkeit und steigt über die wärmedämmte Transportzone zum oberen, nicht gedämmten Bereich zur kälteren Umgebung. Hier kondensiert der Dampf, wobei die in der Heizzone aufgenommene Verdampfungswärme (Latentwärme) als Kondensationswärme wieder frei wird und über einen Wärmeübertrager als Nutzwärme verfügbar ist. Das Kondensat fließt infolge der Schwerkraftwirkung an der Rohrwandung nach unten, womit sich der Kreislauf der Arbeitsflüssigkeit mit der erneuten Verdampfung schließt. Dieses Prinzip funktioniert auch bei horizontalem Rohr, wenn dieses mit einer Kapillarstruktur o.ä., z. B. mit einem Docht oder Metallnetz, ausgeführt wird, durch die das Kondensat wieder zur Heizzone zurückgelangen kann.

Als Wärmetransportgerät hat das Wärmerohr nachfolgende Eigenschaften:

- eine hohe, mehr als 1.000-fach größere Wärmeübertragungsfähigkeit als ein Kupferstab gleichen Durchmessers

- Der Wärmetransport findet auch ohne merkliche Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlzone statt, insbesondere, wenn die Arbeitsflüssigkeit so »eingestellt« werden kann, dass ihre Siedetemperatur nur wenig unterhalb der Wärmespendertemperatur liegt, was die Verwendung des Wärmerohrs zur Wärmerückgewinnung ermöglicht.
- thermische Diodenwirkung: Der Wärmetransport findet selbstregelnd nur in einer Richtung statt, nämlich von der Heiz- zur Kühlzone.
- Der Wärmerohrprozess läuft ohne Hilfsenergie und ohne bewegliche Teile im Wärmetransportkreis, d. h. ohne Umwälzpumpe, ab.

**Nachteil:** Einsatzbereich für kleinere Volumenströme und erhöhte Anschaffungskosten. In den Übergangszeiten zwischen Sommer und Winter müssen bei Gebäuden mit hohem inneren Wärmequellenanteil Vorkehrungen getroffen werden, damit nicht zuviel Wärme ins Gebäude gelangt, d. h. daraus resultierend Übertemperaturen in den Räumen entstehen. Eine Vergrößerung der Kälteleistung lässt sich z. B. durch einen Bypass zum Fortluftteil des Wärmeübertragers vermeiden.

### **Pull-Push-Wärmerückgewinnungssystem**

Bei dem Pull-Push-Wärmerückgewinner handelt es sich um einen Kapillarventilator als Wärmeübertrager. Der schnell umlaufende Rotor ( $1.000 \text{ min}^{-1}$ ,  $\approx 24 \text{ m/s}$ ) enthält als Speichermasse eine offenporige Polyurethanschaummatte, durch die abwechselnd der Nutz- bzw. der Abwärmeträger strömen. Der Kapillarventilator dient als Lufttransport und gleichzeitig als Wärmerückgewinner. Das Innere des Schaumstoffringes wird durch eine feststehende Wand in zwei Hälften geteilt. Die Fortluft wird hierbei vom Ring erfasst, durch den Schaumstoff gedrückt und an den Fortluftkanal weitergegeben. Das gleiche geschieht mit der Außenluft, die über den Kanal ins Gebäude strömt. Ein Teil der von der warmen Fortluft an den Schaumstoffring abgegebenen Wärme wird hierbei an die eintretende Außenluft abgegeben.

**Nachteil:** Einsatzbereich für kleinere Volumenströme; z. B.  $1.250 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $100 \text{ Pa}$ . Der Wärmerückgewinnungsgrad beträgt ca. 48 %. Wenn die mittlere Temperatur der Schaumstoffmatte niedriger ist als die Fortlufttemperatur, kommt es zur Kondensatbildung. Das Kondensat wird in einen Ablauf geleitet. Ein Teil wird jedoch von der ins Gebäude eintretenden Außenluft (je nach Außenluftzustand) aufgenommen und beigemischt. Eine Trennung der Luftströme besteht nicht.

### **3.4.3 Förderungen**

Mit dem aus Eigenmitteln finanzierten KfW-Programm zur  $\text{CO}_2$ -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 alle Wärmepumpenanlagen und RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung als Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie (Umweltwärme) gleichberechtigt zu Brennwert- und Niedertemperaturwärmeerzeugern und KWK-Anlagen aufgenommen wurden.

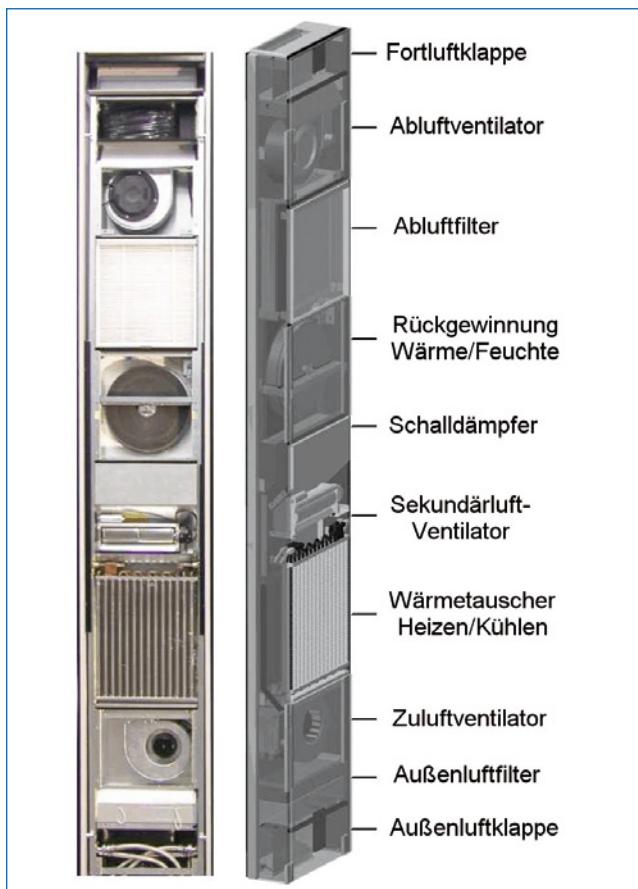
### 3.5 RLT-Innovationen

Innerhalb der Raumluft-Klima/Kältetechnologie erstrecken sich die Innovationen über die Teilbereiche:

- zentrale, dezentrale sowie fassadenorientierte RLT-Geräte
- VRV/VRF-Systeme
- Split- und Multi-Split-Systeme, Kühldecken und Kühlkonvektoren
- Hybride Raumlufttechnik
- OxyCell-Technology
- Kombinationssystem: 3 HX-Kälte-Wärmepumpenanlage.

#### 3.5.1 Fassadengeräte LTG Typ FVM oder TROX-FRL

Bei den dezentralen Lüftungsgeräten wird die Außenluft durch einen Fassadenspalt angesaugt. Eine im Geräteunterteil direkt am Außenlufteneintritt positionierte Absperrklappe mit Federrücklaufventil verschließt bei inaktivem Gerätzustand und Spannungsausfall die



**Abb. 3-10:** Fassadensäulen-RLT-Gerät-FVM  
(Quelle: LTG AG, Stuttgart)

Außenluftöffnung. Nachdem die Außenluft mittels eines Feinstaubfilters gereinigt wurde, durchströmt sie einen mechanisch selbstdichten Volumenstromregler, der den Außenvolumenstrom auf einen eingestellten Maximalwert limitiert. Danach durchströmt die Luft einen Wärmerückgewinner. In Strömungsrichtung folgend ist ein Zuluftradialventilator angeordnet, der die Zuluft durch den Wärmeübertrager mit Heiz- und Kühlfunktion durch die bauseitige Brüstungsverkleidung quellluftartig in den Raum fördert. Die Abluft wird oberhalb des Gerätes durch die Brüstungsverkleidung abgesaugt, durch einen Grobstaubfilter geführt und gereinigt. Danach durchströmt die Luft den Wärmeübertrager zur Rückgewinnung der Abwärme.

In energetisch sinnvollen Fällen, z. B. während der Übergangszeit sowie zum Vereisungsschutz, wird eine motorische Klappe geöffnet und die Wärmerückgewinnung umgangen. Der Fortluftventilator erzeugt die zur Luftförderung notwendige Druckdifferenz. Eine motorische Absperrklappe mit Federrücklaufantrieb verschließt bei inaktivem Gerätezustand und Spannungsausfall die Fortluftöffnung des Gerätes.

#### *Objektbeispiel: Capricorn-Haus im Medienhafen Düsseldorf*

Architekten: Gatermann + Schossig, Köln

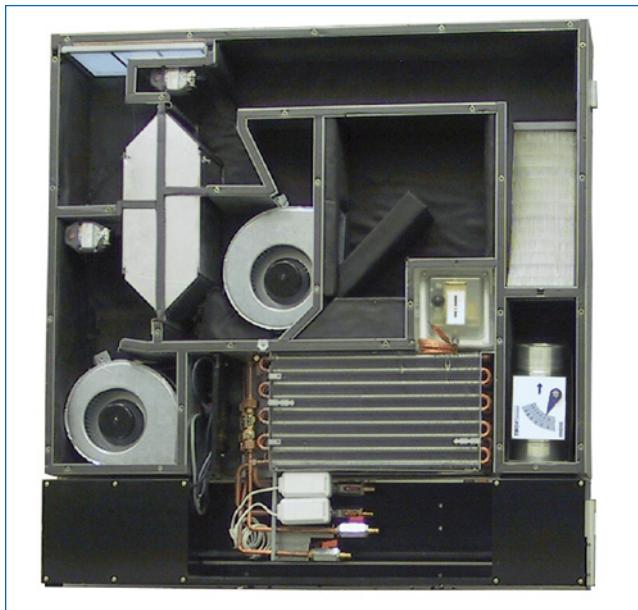
Das Bürogebäude Capricorn der Architekten Gaterman und Schossig wurde mit einer Nutzfläche von insgesamt 43.000 m<sup>2</sup> am südlichen Ende des umgestalteten Düsseldorfer Rheinhafens als Niedrigenergiegebäude mit sehr geringen Betriebskosten konzipiert. Die vier großen verglasten Atrien, der markante Stil der Glasfassade und die lange, gewundene Gebäudeform prägen die beeindruckende äußere Form. Auf mäanderartiger Grundrissstruktur entstanden sieben Ober- und vier Tiefgeschosse. Die sich aus der Gebäudeform ergebenden vier Höfe sind bewusst mit dem Stadtraum verzahnt. Sie wurden als Atrien gestaltet und dienen als Schallmembranen. Zudem spenden sie Licht und sorgen für eine Regulierung des Gebäudeklimas.



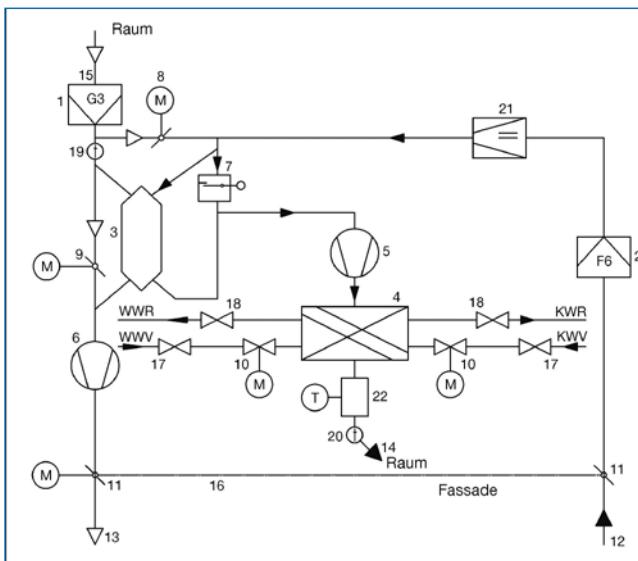
**Abb. 3-11:** Capricorn-Haus im Medienhafen Düsseldorf  
(Quelle: Gatermann + Schossig, Köln)

### Energiekonzept und Gebäudetechnik

Für die Außenbekleidung entwickelten Gatermann und Schossig ein Multifunktionspaneel (i-modulFassade), das die Be- und Entlüftung, Wärmerückgewinnung, Sonnenschutz und Lichtlenkung sowie künstliche Beleuchtung in einem sehr flachen, nur 20 cm tiefen und flexibel einzusetzenden Paneel vereint. Jedes einzelne Fassadenelement wurde mit einem separaten, von Trox speziell entwickelten Fassadenlüftungsgerät bestückt. Der untere Teil mit Außen- und Fortluftklappen ist fest in die Fassade integriert.



**Abb. 3-12:** Trox-Brüstungsgerät FSL (Trox GmbH, Neukirchen-Vluyn)



**Abb. 3-13:** Funktionsschema Fassadenbrüstungsgerät FSL (Trox GmbH, Neukirchen-Vluyn)

Die vielfältigen Vorteile der Integration der dezentralen Lüftungsgeräte in die Fassade bestehen in der Gestaltungsfreiheit, Nutzungsflexibilität, Flächeneffizienz durch Einsparung an Schacht- und Technikflächen und einer Verkürzung der Montagezeiten durch Vorfertigung. Außerdem können die Geräte individuell gewartet sowie von jedem Mitarbeiter in jedem Raum geregelt werden.

Für die Architektur ergeben sich die Vorteile:

- innovative, dezentrale Klimageräte werden komplett in die Fassade integriert
- minimaler Platzbedarf zur Integration in einschalige Fassade (Breite 400 mm, Tiefe 160 mm, Höhe 2.680 mm); innerhalb des Gebäudes werden keine Schächte zur Luftverteilung erforderlich
- freie Raumgestaltung und architektonische Gestaltung der Verkleidung.

Für den Gebäudeeigner ergeben sich die Vorteile:

- maximales Mietflächenangebot
- niedrige Investitionskosten der Grundinstallations
- je nach Mieterwunsch (Nutzerwunsch) modulare Nachrüstbarkeit von statischer Heizung über Umluft-Fancools bis zur Klimaanlage
- niedrige Energiekosten durch hocheffiziente Antriebstechnologie und Wärmerückgewinnung
- individuelle Flexibilität der Nutzer, z. B. durch den Einsatz spezieller Luftfilter für Allergiker
- hoher technischer Komfort und Nutzerakzeptanz.

Für den Fachplaner ergeben sich die Vorteile:

- sämtliche RLT-Funktionen in einem Gerät integriert (Außenluftversorgung; Abluft- und Außenluftfilter F7; Außenschalldämpfer; Heizen-Kühlen-Umluftbetrieb; Wärme- und Feuchterückgewinnung)
- LON-fähiger Regler für optimalen Betrieb mit parametrierbaren Nutzungsprofilen.

Analog zu den Fassadengeräten TROX-FRL im Capricorn-Haus im Medienhafen Düsseldorf wurden die Fassadengeräte vom Typ FVM vom Produkthersteller LTG-Stuttgart in das Green Building Büro- und Verwaltungsgebäude der Nycomed in Konstanz (Lamellenhaus) mit einer Fassade als reagible Hülle, Transparenz und hoher Energieeffizienz integriert. Der Gebäudeeigner, Capricorn Development, hat nicht nur hohe Ansprüche an die Ästhetik und Funktionalität der Architektur, sondern auch an eine anspruchsvolle Gebäudetechnik gestellt. Insofern forderte der Bauherr nicht nur eine intelligente Gebäudekonzeption, sondern auch 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. Mit der Gebäudeautomation lassen sich die Beleuchtungs- und Verschattungstechnik sowie die Heizungs-, WRG- und Klima/Kältetechnik automatisch an jeder der 1.280 Raumachsen regeln.

### 3.5.2 VRV/VRF-Systeme

Bei den VRV/VRF-Systemen wird unter der direkten Kühlung bzw. direkten Verdampfung das Kältemittel an das zu kühlende Medium (Flüssigkeit, Luft) geführt, wobei es hier im direkten thermischen Kontakt verdampft. Die Multi-Split-System werden als

- VRV: Variable Refrigerant Volume (variables Kältemittelvolumen)  
oder auch als fabrikatsbezogene
- VRF: Variable Refrigerant Flow (variabler Kältemittelstrom)

erstellt.

Die Variable-Volumen-Systeme (VVS-System) lassen sich in jedem Bürogebäude für die Innenzone als Nur-Luft-System und für die Außenzone auch in Kombination mit der Heizung verwenden. Die wesentlichen Merkmale des VVS-Systems sind die variable Luftmenge und beim Einkanalsystem, die konstante Temperatur der Zuluft für die Zonen bzw. Räume mit unterschiedlichen Innenlasten. Hieraus ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Der jeweils geförderte Luftvolumenstrom entspricht der gerade zu deckenden Last. Durch die Ungleichzeitigkeit der auftretenden Raumlasten resultieren kleinere Maximalvolumenströme, die bei Außenzonenanlagen mit gegensätzlichen Himmelsrichtungen um 30 bis 40 % niedriger liegen, als dieses bei den Nacherwärmersystemen der Fall ist.
- Noch höhere Einsparungen ergeben sich in den Betriebskosten, weil sich der jährliche Luftdurchsatz um 20 bis 30 % verringert und sich die aufzuwendende Antriebsenergie für die Ventilatoren sogar um 30 bis 50 % reduziert. Die Einsparungen ergeben sich, weil sich nach den physikalischen Gesetzen bei einer reduzierten Luftförderung die Druckverluste quadratisch verringern.

Weil sich die sensiblen Raumlasten in der Regel stärker ändern als die latenten Lasten, verändert sich auch die Raumluftfeuchte mit dem Zuluftvolumenstrom, d. h. die Raumfeuchte steigt mit abnehmender sensibler Raumlast. Dieses Kriterium könnte daher als Nachteil des VVS-Systems angesehen werden. Erfahrungsgemäß liegen diese Feuchteschwankungen jedoch in einem Toleranzbereich von ca. 10 %, die auch bei Komfortanlagen in Kauf genommen werden können.

#### 3.5.2.1 VRV: Variable Refrigerant Volume (variables Kältemittelvolumen)

Die Raumklimageräte der VRV/VRF-Systeme bieten in allen Komfortbereichen ein breites Einsatzspektrum. Etliche der installierten Systeme wurden hierbei in der Split- oder Multi-splitvariante für die Nachrüstung von nichtklimatisierten Gebäuden eingesetzt. Ebenso finden diese Systeme auch im Neubaubereich neue Anwendungsfelder. Eine erfolgreiche Systemlösung kennzeichnet die RLT-Geräte mit variablen Kältemittelströmen. Diese VRF- bzw. VRV-Systeme werden primär in Arztpraxen, Banken und Sparkassen, Verkaufsräumen (Boutiquen) sowie zur Büro- und Hotelklimatisierung eingesetzt. Als Raumklimageräte und MultiSplit-Systeme haben diese Geräte den Vorteil, dass sie sich auch im Modernisierungs- und Sanierungsfall ästhetisch in ein Gebäudekonzept integrieren lassen.

Zur Aufgabenstellung ein Gebäude mit mehreren Klimazonen oder Räumen zu klimatisieren, stehen dem Fachplaner zwei Varianten zur Verfügung: Entweder wird hier ein Direktverdampfungssystem (VRV-System) oder ein Kaltwassersatz mit dem dazu erforderlichen Kaltwasserrohrsystem eingesetzt. Die Entscheidung für das eine oder andere System ist auch von der gesamten erforderlichen Kälteleistung des Gebäudes abhängig. Die Direktverdampfungssysteme werden in der Regel bis zu einer Leistung von ca. 130 kW angeboten. Über diese Leistung hinaus müssen entsprechend mehrere Systeme installiert werden oder auf einen Kaltwassersatz zurückgegriffen werden. Die Kaltwassersätze werden bis zu einer Leistung von 1.000 kW und darüber angeboten. Um das Gebäude ganzjährig oder während der Übergangszeit beheizen zu können sollten beide Systeme sinnvollerweise auch über die Funktion »Heizen« verfügen. Hierzu sind Geräte mit Wärmepumpenfunktion erforderlich.

Seit einigen Jahren werden zunehmend Split- und Multi-Split-Klimaanlagen eingesetzt, die die Funktionen der Teilklimaanlagen erfüllen und in der Regel als Wärmepumpen konzipiert in der Lage sind sowohl zu kühlen als auch im angepassten Rahmen die Heizfunktionen zu übernehmen.

### **3.5.2.2 VRV-Invertersystem mit Wärmerückgewinnung**

Die Inneneinheiten des VRV-Invertersystems lassen sich sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen nutzen. Hierbei regeln sie jeweils individuell die Raumtemperatur mittels eines elektronischen Expansionsventils. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt dezentral in angeordneten Umschaltboxen. Diese Umschaltboxen ermöglichen eine 100 %-ige Wärmeverschiebung von Raum zu Raum. Während in dem einen Raum das Kältemittel in der dortigen, als Verflüssiger geschalteten Inneneinheit kondensiert und hierbei den Raum durch Wärmeabgabe beheizt, wird in einem anderen Raum das flüssige Kältemittel verdampft. Aufgrund der Verdampfung nimmt die in diesem Raum installierte Inneneinheit Wärme auf und der Raum wird so gekühlt. Weil sich diese Vorgänge gleichzeitig in einem geschlossenen Kreislauf abspielen, wird der im zu kühlenden Raum aufgenommene Wärimestrom in den Raum mit der Wärmeanforderung verschoben. Dasselbe kann auch mit bis zu 64 Inneneinheiten, mit mehreren Umschaltboxen realisiert werden. Hierbei kann entweder jeder einzelnen Inneneinheit oder jedem Raum mit mehreren Inneneinheiten oder jeder Gruppe von Räumen mit gleicher Gebäudeorientierung bzw. gleicher Nutzungsart eine Umschaltbox zugeordnet werden.

Im Betriebskostenvergleich der VRV-Invertersysteme mit konventionellen Systemen, die mit Gas oder Öl betrieben werden, wird hier eine Energieeinsparung von mindestens 40 % erreicht.

Hauptanwendungsbereiche der VRV-Invertersysteme sind Hotels, Restaurants, Ladengeschäfte (Boutiquen), Praxisräume, etc.

### **Split- und Multi-Split-Systeme**

Wie bei der Binäreistechnologie kann der Wechsel zwischen zwei Aggregatzuständen auch beim Einsatz klassischer Kältemittel als Kälteverteilmedium genutzt werden. Im Außen stehenden Kälteerzeuger wird das Kältemittel kondensiert und in Flüssigkeitsleitungen im Gebäude verteilt. In den innenliegenden Verdampfern wird die Wärme von den Kälteverbrau-

chern aufgenommen und der Kältemitteldampf zu der Kälteerzeugung zurückgeführt. So lassen sich auch mehrere Verdampfer mit einem oder mehreren Kälteerzeugern kombinieren und in der Leistung stufenlos regeln. Derartige Anlagensysteme werden als VRF-Systeme (Variable Refrigerant Flow) bezeichnet, weil hier variable Kältemittelmengen durch die Leitungen gefördert werden.

### 3.5.2.3 Kältemittelbasierte Systeme (VRF-Technologie)

Bei der VRF-Technologie handelt es sich um den Einsatz von RLT-Innengeräten mit variablen Kältemittelströmen (Massenströme). Die Kühl- und Heizleistung wird somit dem momentanen Bedarf angepasst. Die Rauminnengeräte (Wand-, Truhen-, Stand-, Deckenkassettengeräte) werden mittels Kältemittelleitungen mit dem Außengerät verbunden. Das Außengerät enthält die Komponenten: Verdichter und Verflüssiger (Kondensator). Die kompakten Inneneinheiten enthalten die Besonderheit, dass sie generell mit elektronischen Einspritzventilen ausgerüstet sind und vielfach auch mit variabler Volumenstromregelung (VVS) kombiniert werden. Die VRF-Systeme können auch in der 3-Leiter-Variante ausgeführt werden, wodurch die Möglichkeit besteht, einen gleichzeitigen Heiz- und Kühlbetrieb zu realisieren.

Die Energieeffizienz der VRF-Technologie resultiert u. a. aus dem Einsatz leistungsgeregelter Verdichter, z. B. Invertertechnologie. So wird die Verdichterdrehzahl an den tatsächlichen Bedarf angepasst, was sich besonders bei den häufig vorkommenden Teillastbedingungen als besonders energieeffizient erweist. Moderne VRF-Systeme erreichen Leistungszahlen (COP-Werte) von 3,5 oder mehr. Daraus folgt, dass z. B. aus 1 kW Strom 3,5 kW Kühlleistung erzeugt werden.

Zwischenzeitlich werden in Deutschland größere Gebäude, wie Büro- und Verwaltungsgebäuden, Einkaufszentren und Hörsäle, etc. mit der VRF-Multisplittingtechnologie teilklimatisiert.

Die Voraussetzung zur Realisierung dieser Technologie waren umfangreiche Entwicklungen im Bereich der elektronischen Einspritzventile und leistungsgeregelte Kältemittelverdichter sowie drehzahlgeregelte Ventilatoren mit hohen Luft- und niedrigen Schallleistungen. Aufgrund des nach dem Bedarf angepassten Kältemittelflusses ergeben sich Vorteile, so z. B. in Bezug auf Einbau, Komfort und Energieeffizienz. Die VRF-Systeme sind modular aufgebaut, leicht und erfordern weniger Stellfläche sowie geringere Rohrdurchmesser als z. B. Kaltwassersätze. Der Betrieb dieser Systeme wird durch die integrierte Mikroelektronik unterstützt, wobei hier speziell die Einzelraumregelung sowie die DDC-Technologie eine maßgebliche Rolle spielten. Die VRF-Multisplitting-Geräte lassen sich mit einem Installations-BUS in ein System der Gebäudeleittechnik (ZLT/GLT) über eine am Mikrocomputer der Außeneinheit befindliche Schnittstelle einbinden. Hierbei kann die Länge der Datensammelleitung (BUS) bis zu 1.000 m betragen. Durch die Verbindung des in der Außeneinheit integrierten Mikroprozessors mit den anderen Komponenten eines DDC-Systems kann die Einzelraumregelung, Filterüberwachung und somit die Einbindung in ein komplexes Konzept der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sowie die Nutzung des Facility-Management (FM) erfolgen.

**Tab. 3-9:** Referenzprojekte – Anlagen mit VRV/VRF-Systeme (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Boardinghouse Hotel-Süd, Graz-Straßgang	12 neue Appartements mit VRF-Klimaanlage Gesamtheiz-/kälteleistung: 139 kW/126 kW Außen-/Inneneinheiten: 5/40	Kältemittel: R410A (50 % R32/Difluoromethan und 50 % R125/Pentafluoromethan)
Neue »Wohnwer(f)t 18.20« im Alten Rheinauhafen, Köln	Wohn- und Geschäftshäuser mit VRF-Klimatechnik im Alten Rheinauhafen Köln Gesamtheiz-/kälteleistung: 128 kW/117 kW Außen-/Inneneinheiten: 4/43	4-Wege-Deckenkassetten mit extrem leisen Betrieb
Stolz & Seng Kunststoffspritzguss und Formenbau GmbH, Donaueschingen	Produktionshalle und Werkzeugbau werden ganzjährig gekühlt; Mit dem VRV-System mit Wärmerückgewinnung wird die überschüssige Wärme in den Büros und den Nebenräumen genutzt. Gesamtheiz-/kälteleistung: 95 kW/85 kW	
Verwaltungsgebäude der Akzenta AG, Neubeuern/Oberbayern	Büro- und Verwaltungsgebäude mit ca. 3.000 m <sup>2</sup> klimatisierter Nutzfläche; ganzjähriger Heiz- und Kühlbetrieb mittels VRV-Systemtechnologie Gesamtheiz-/kälteleistung: 315 kW/280 kW Außen-/Inneneinheiten: 9/4413 Kanalgeräte; 18 vierseitige Deckenkassetten; 39 Umschalt-einheiten	Bei sehr tiefen Außentemperaturen von -16 °C beträgt die Arbeitszahl ca. 2,48; bei 15 °C dagegen bis zu 4,0, sodass sich für das Jahresmittel ein Wert von ca. 3,0 ermittelt.

### 3.5.3 Hybride Raumlufttechnik

Mit der Hybriden Raumlufttechnik wird eine Kombination aus natürlicher, d. h. »freier« Lüftung, über ein automatisiertes Fenster mit einem mechanischen Raumluftsystem definiert. Aufgrund dieser Variation lassen sich die Vor- und Nachteile beider Systeme ausgleichen. Bei der Auslegung und Dimensionierung der Hybriden Raumlufttechnik muss beachtet werden, dass sich die Vorteile addieren und im günstigsten Fall nicht gegeneinander arbeiten. Durch den Einsatz einer Hybriden Raumlufttechnik soll der Bedarf an Heiz- und Kühlenergie und der Kraftbedarf an elektrischem Strom für die Pumpen- und Ventilatorenantriebe auf ein Minimum reduziert werden.

Eine zusätzliche Reduzierung des Energiebedarfs wird durch eine optimale Regelungs- und Steuerungstechnik des Sonnenschutzes, der Tageslicht- und künstlichen Beleuchtung erreicht. Neben den zusätzlichen individuellen Auswahlmöglichkeiten der Nutzer über Touch-paneele müssen auch sämtliche sicherheitstechnischen Parameter der einzelnen Systeme, z. B. Regen- und Windböensicherung, mechanische Verriegelung der Fenster zu den festge-

legten Zeiten bzw. der Schutz vor Auskühlung und Überhitzung des Gebäudes mit integriert werden.

### **Kombinationsvariante für ein Einzelbüro**

Um optimale Raumluft-, Behaglichkeits- sowie Beleuchtungsverhältnisse zu realisieren und die Randbedingungen für blendfreie und kontrastreiche und somit konzentrierte Randbedingungen am Büroarbeitsplatz zu ermöglichen werden die Einzelkomponenten, wie Klimasegel, automatisierte Fensterlüftung sowie die Licht- und Beschattungstechnik, logisch miteinander verknüpft und der Raumautomation aufgeschaltet. Das Klimasegel wird als abgehängtes Deckenelement mit Heiz-/Kühlfunktion ausgeführt und zur schnelleren Anpassung des Heiz-/Kühlbedarfs in die Decke ein Umluftheiz-/Kühlsystems integriert. Der Nutzer kann zudem am Touchpaneel sein individuelles Klima einstellen. In einer Kombination mit einer Betonkernaktivierung können Kühllastdichten bis zu  $100\text{ W/m}^2$  gedeckt werden. Die Zusatzfunktion des Deckensegels besteht in ihrer Schallabsorption.

### **Automatische Fensterlüftungssysteme**

Mit dem automatischen Fensterlüftungssystem wird ein natürlicher Luftaustausch ermöglicht und zudem eine Raumabkühlung mit dem freien Kühlpotenzial der Nachtkühlung erreicht. Der Beschlag des Fensters wird über und über die im Fensterantrieb integrierte Witterungssensorik gesteuert und somit dem Raum die erforderliche Außenluftrate zugeführt.

### **Sonnenschutzeinrichtung**

Mit der besonderen Lamellenkonstruktion der Sonnenschutzeinrichtung werden die ergonomischen Anforderungen an moderne Büroarbeitsplätze realisiert. Durch einen Blend- und Raumüberhitzungsschutz, Tageslichtsteuerung und blendfreie Sichtverbindung nach außen. Der ökonomische Nebeneffekt besteht darin, dass aufgrund der Reduzierung der Kühllast und der Tageslichtsteuerung mittels Lichtsensorik eine Minderung der Betriebszeiten der künstlichen Raumbeleuchtung und daher ein effektiver energetischer Betrieb erreicht wird.

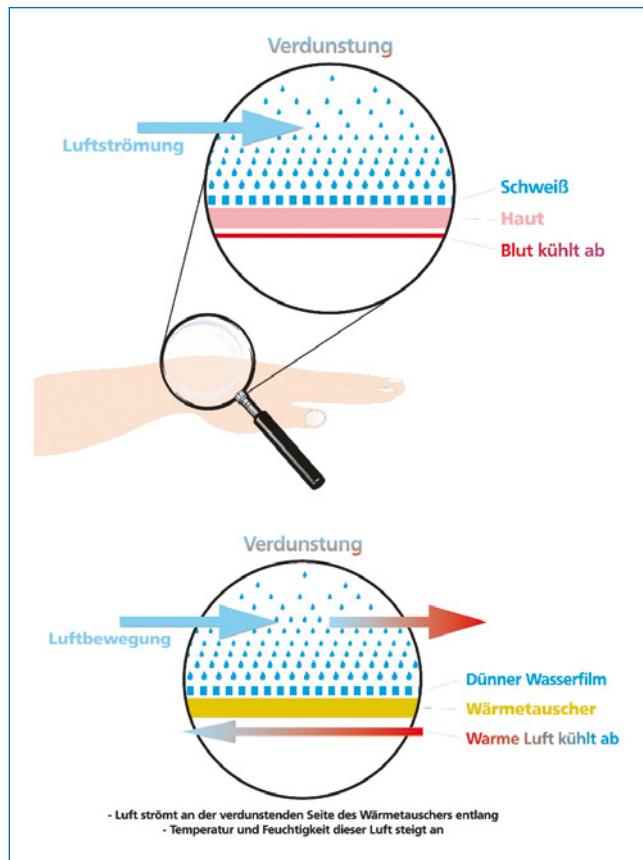
Über die LonWorks- oder EIB-Schnittstelle wird die Einbindung in ein übergeordnetes Raummanagement bzw. die Kopplung mit dem Lichtmanagement realisiert.

### **Raumautomationssysteme**

Mit dem integrierten Raumautomationssystem, in dem sämtliche Gewerke eingebunden sind, ermöglicht die Sicherstellung der Behaglichkeitskriterien, wie z. B. die Raumlufttemperatur, Temperaturspreizungen im Klimasegel und in der Betonkernaktivierung sowie Luftgeschwindigkeit, am Arbeitsplatz.

## **3.5.4 OxyCell-Technology**

Das neue System der RLT-Außenluftgeräte mit der patentierten »OxyCell-Technology« basiert auf einer Wasser-/Luftbetriebsweise mit geringem elektrischen Strombedarf, ohne Kältemittel mit einem Außenluftanteil und dennoch geringen Energiekosten. Die Erfindung beruht im Grunde auf dem natürlichen Prinzip der indirekten Verdunstungskühlung zur effektiven Raumkühlung bei einer gleichzeitigen Versorgung mit Außenluft. Die Vorteile



**Abb. 3-14:** Funktionsprinzip des OxyCell-Kühlsystems  
(Quelle: Kampmann GmbH, Lingen/Ems)

der »OxyCell-Technology« bestehen in der indirekten Verdunstungskühlung und in der permanenten, 100 %-tigen Außenluftversorgung, einem minimalen Energieverbrauch sowie in der Umweltfreundlichkeit.

Das System beruht auf der indirekten Verdunstungskühlung, bei der als zentraler Kernbaustein ein hochleistungsfähiger Gegenstromwärmeübertrager verwendet wird. Die Außenluft kann hier z. B. von 30 auf 18 °C abgekühlt werden. Dabei wird die Luft mit Luftleistungen von 400 bis 3.000 m<sup>3</sup>/h in zwei getrennten, gegenläufigen Strömen durch den Wärmeübertrager geleitet. Zudem wird bis zu ein Drittel der Luft als Prozessluft über ein zugeordnetes Klappensystem direkt über die Außenflächen der Zuluftführung nach außen geführt. Diese Außenflächen werden periodisch mit Wasser benetzt. Die spezielle Rippenbauweise mit hydrophil beschichteten Aluminiumlamellen bewirkt eine besonders feine Verteilung und somit eine äußerst effektive Verdunstungskühlung der Zuluft, während die Fortluft schadstofffrei abgeführt wird. Die bei der Verdunstung des Wassers auftretende Verdunstungskälte wird der Zuluft entzogen. Das System der Luftführung ermöglicht eine Abkühlung fast bis zum Außenlufttaupunkt.

Das technisch optimierte System der Luftführung in einem Kreuzstromwärmeübertrager ermöglicht eine Luftabkühlung bis fast zum Taupunkt der Außenluft, d. h. bei einer Temperatur, bei welcher der in der Luft vorhandene Wasserdampf kondensiert. Damit liegt die Zu-

lufttemperatur um ca. 4 bis 5 Kelvin unter der bei den bisher bekannten adiabatischen Kühl-systemen. Aufgrund dieser Funktionsweise wird eine permanente Zuluftkühlung mit Temperaturreduzierungen von 10 °C und mehr erreicht. Um Kalkablagerungen und zugleich Leistungsminderungen zu vermeiden, wird der Wärmeübertrager in regelmäßigen Abständen mit Wasser und einer Oxylösung gespült.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass kein direkter Kontakt zwischen der Zuluft und dem verdunstenden Wasser besteht. Die absolute Zuluftfeuchtigkeit bleibt daher konstant, sodass sich innerhalb des Nutzungsbereiches auch behagliche Raumluftzustände ergeben. Die bei der Verdunstung des Wassers auftretende Verdunstungskälte wird der Zuluft entzogen.

Die kühle und zu 100 % aus Außenluft bestehende Luft wird zugfrei in die Nutzungsräume eingeführt, wobei gleichzeitig die verbrauchte und warme Raumluft verdrängt wird. Gegenüber den konventionellen Systemen besteht kein direkter Kontakt zwischen der Zuluft und dem verdunsteten Wasser, sodass hier die absolute Zuluftfeuchtigkeit konstant bleibt. Im Raum vermischt sich die kühle Zuluft mit der Raumluft und es entsteht eine behagliche relative Luftfeuchte. Über die Wintermonate kann das System zur Wärmerückgewinnung mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von ca. 80 % verwendet werden.

Über die zugeordnete Klappensteuerung wird die Raumabluft durch die Außenflächen der Zulufttaschen geführt. Da bei dieser Betriebsweise als einziger Energieverbrauch nur der Zuluftventilator in Erscheinung tritt, können mit dem Außenluftklimagerät Energieeinsparungen bis zu 80 % erreicht werden. So beträgt z. B. die elektrische Betriebsenergie für eine Luftleistung von 3.000 m<sup>3</sup>/h lediglich 2,5 kW sowie 15 Liter Wasser pro Stunde.

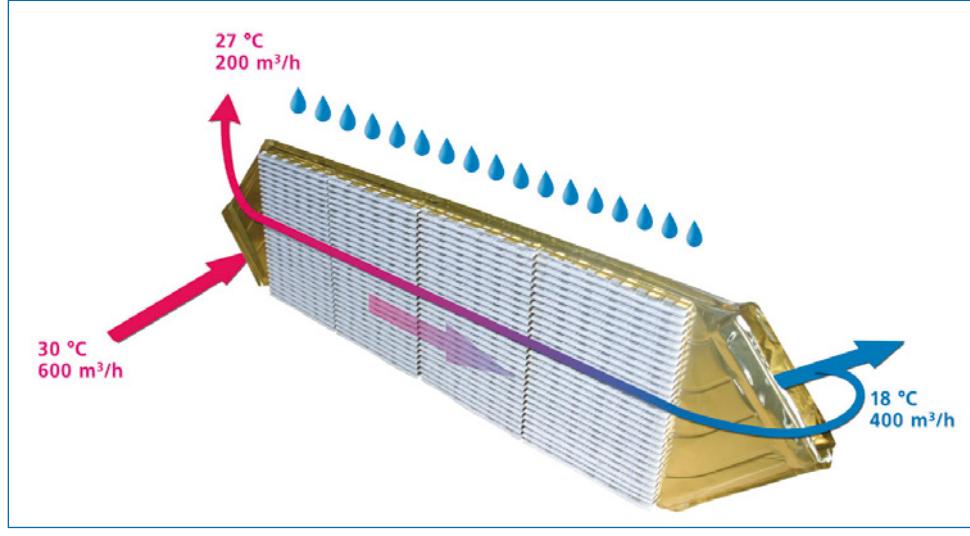


Abb. 3-15: Kühlsystem »OxyCell-Technology« (Quelle: Kampmann GmbH, Lingen/Ems)

Mit der »OxyCell-Technology« können mit 1 kWh Strom je nach absoluter Luftfeuchtigkeit 5 oder 8 kWh sowie im Idealfall sogar bis zu 20 kWh Kälteenergie erzielt werden. Als Vergleich: Ein Kaltwassersatz erzeugt mit 1 kWh Strom ca. 3 bis 4 kWh Kälte. Das Verhältnis von Kühlleistung zu Stromverbrauch mit einem COP-Wert von 1:8 bis 1:25 steht der erreich-

ten Leistung konventioneller Kälteerzeugung mittels Kältemittel von 1:3 bis maximal 1:4 gegenüber. Die leistungsbestimmende Größe ist die absolute Luftfeuchte (g/kg) trockener Luft. Je trockener die Luft, desto größer wird die Leistung. Aus dem h-x-Diagramm ist ersichtlich, dass das Leistungsvermögen im Bereich von 4 bis 10 g/kg die optimalsten Kühlleistungen erreicht. Kritische Werte werden bei Temperaturen mit einer absoluten Luftfeuchte von über 14,6 g/kg erreicht.

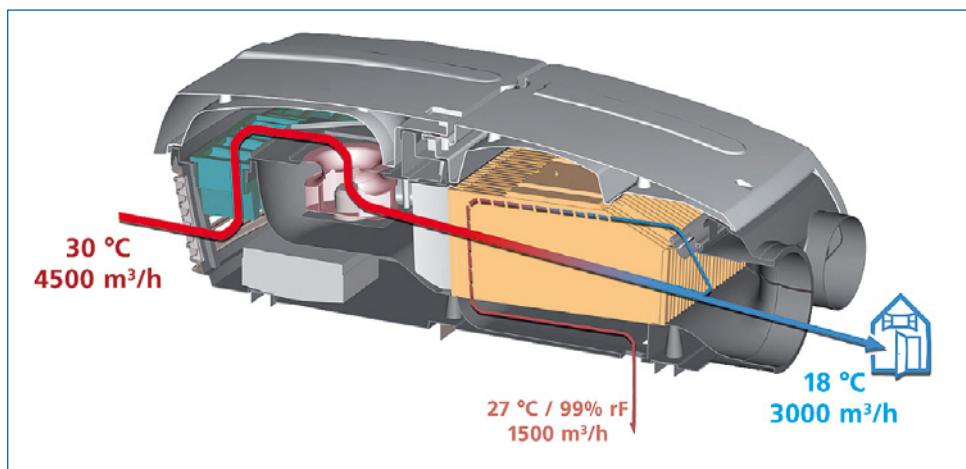


Abb. 3-16: Außenluftgerät »Rooftop 3000« (Quelle: Kampmann GmbH, Lingen/Ems)

Die Rooftop 3000-Geräte bieten die Funktionen Kühlen und Lüften mit 100 % Außenluft, aktive Nachtlüftung, freie Kühlung oder Lüften mit 80 % Wärmerückgewinnung. Da bei dieser Systemfindung auch kein problematisches Kältemittel verwendet wird, werden auch die Forderungen der Klimaschutzziele unterstützt. Durch den Verzicht auf energieintensive Kompressoren sind diese Außenluftklimageräte nicht nur frei von FCKW-haltigen Kältemitteln, sondern auch von den sonst üblichen intensiven Geräuschentwicklungen. Aufgrund der flüsternden Betriebsgeräusche entstehen keine Probleme hinsichtlich der Geräuschmissionswerte der Außenluft bzw. auch Geräuschemissionen im Nachtbetrieb zur Nachbarschaft.

### 3.5.5 Kombinationssystem: 3 HX-Kälte-Wärmepumpenanlage

Da in vielen Gebäuden aufgrund der vorgegebenen Gebäudeausrichtung, z. B. Längsfront in Ost-/Westrichtung, insbesondere während der Übergangsmonate die raumklimatischen Ansprüche divergieren, wiederholen sich jährlich auch die Beschwerden der Nutzer. Die bisher als Abhilfe dieser Problematik ausgeführten Systemfindungen mittels wasser- oder luftseitig eingesetzter Zonen-RLT-Geräte sind zudem von der Investition aufwendig, bereiten hydraulische und Regelungstechnische Probleme und sind insbesondere von den Betriebskosten sehr kostenintensiv.

Die neue innovative Systemlösung besteht aus einer kombinierten Kälte-Wärmepumpenanlage 3 HX, deren Komponenten sich aus den drei Wärmeübertragern (HeatExchangers) so-

wie einem Ice-Slurry-Kältespeicher und einem Energiemanagementsystem zusammensetzen. Für den Fall, dass gleichzeitig Wärme und Kälte benötigt werden, versorgt ein Wärmeübertrager den Heizungskreislauf und einer die Kaltwasserseite. Diese Schaltung führt somit zu einer gegenüber der Umgebung ausgeglichenen Energiebilanz, da ein Energieaustausch mit der Luft nicht erfolgt. Nur wenn der Wärme- und Kältebedarf sich die Waage halten, kommt der dritte Luft-Wärmeübertrager zum Einsatz. Dieser Wärmeübertrager ist über ein kompliziertes Ventilsystem eingebunden und verfügt je nach Anforderung über die Funktion eines Verflüssigers oder Verdampfers. Somit trägt dieser Luftwärmevertrager wechselweise zum Betrieb des 3 HX als Luft-Wärmepumpe oder als Kältemaschine bei. Gegenüber den anderen Kombilösungen wie die Variable-Refrigerant-Flow-Systeme (VRF) bietet das 3 HX-System den Vorteil, dass im Gebäude ausschließlich Wasser zum Transport der Wärme- oder Kälteenergie genutzt wird. Das Kältemittel befindet sich nur innerhalb des 3 HX-Geräts. Hierdurch werden die Nachteile wie die Gefahr von Kältemittelleckagen im Gebäude oder die Beschränkungen bei der Systemauslegung umgangen.

Als Zusatzkomponente zum 3 HX gehört der »Ice-Slurry-Speicher« des Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen, mit dem Hochleistungskälteträger »CrySol«, der flüssig, pumpbar und ungiftig ist. Das »Flüssigeis« (Binäres) enthält in Wasser suspendierte Eiskristalle, nutzt zum Wärmetransport den Phasenwechsel Eis → Wasser und zeichnet sich durch eine exzellente Kältespeicherfähigkeit aus. Der Hochleistungskälteträger »CrySol« hat im Vergleich zum Wasser eine siebenfach höhere Kältespeicherfähigkeit.

### *Funktionsprinzip*

Bei einem ausgeglichenen Kälte- und Wärmebedarf ist der dritte Wärmeübertrager außer Betrieb. In diesem Betriebszustand stellt das 3 HX am Verdampfer und Verflüssiger zugleich Nutzenergie zur Verfügung, die an die Wasserkreisläufe übergeben wird, d. h. die Energie wird vollständig im Gebäude genutzt. Bei einem höher angeforderten Kälte- und Wärmebedarf ermöglicht der dritte Wärmeübertrager den Austausch von Energie mit der Luft.

### *Energiemanagement*

Damit der Kälte- und/oder Wärmebedarf möglichst wirtschaftlich und energieeffizient gedeckt werden kann, überwacht das Energiemanagementsystem das Gesamtsystem. Dieses Managementsystem leitet aus den eingegebenen (hinterlegten) historischen Lastdaten und unter Berücksichtigung der meteorologischen Einflussgrößen ab, wann Kälte oder Wärme gefordert wird. Aus diesen Daten prognostiziert das Energiemanagement den Lastverlauf der kommenden Stunden. Das Ziel des Energiemanagement ist es, das 3 HX-System so häufig wie möglich im optimalen Betriebspunkt zu fahren. Darüber hinaus ist auch die spezifische Leistungsfähigkeit des Ice-Slurry-Speichers in das Gesamtsystem einzubinden.

Bei der Optimierung des Speichermanagements und zur effizienten Spitzenlastabdeckung wurde berücksichtigt, dass der Ice-Slurry-Speicher die preiswerten Stromtarife zur Kälteerzeugung nutzt und die hohen Lastspitzen effizienter abdecken kann als konventionelle Eisspeicher oder Latentwärmespeicher.

### Software-Tools

- AL-KO Luft- und Klimatechnik, 89343 Jettingen-Scheppach, Software-Tool »LCC-optimize«
- GEA Happel Klimatechnik GmbH, 44625 Herne, Auslegungssoftware Lplus 5.26: Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) für Zentraallüftungsgeräte GEA CAIR, GEA ATpicco und GEA COM4, info@gea-happel.de.

## 3.6 Solare Klimatisierung

### 3.6.1 Grundlagen

#### 3.6.1.1 Solare Kälteerzeugung (Solar Cooling)

Die sommerliche Gebäudeklimatisierung stellt sowohl in kommerziell genutzten Gebäuden als auch in Wohngebäuden einen weltweit wachsenden Markt dar. Hauptgründe hierfür sind wachsende Komfortansprüche und architektonische Trends, wobei die Büros- und Verwaltungsgebäude im letzteren Fall mit einem hohen Fassadenglasanteil ausgerüstet werden. Zudem entstehen die steigenden internen Kühllasten aufgrund der Beleuchtung und der umfangreichen technischen Ausstattung. Ebenso entstehen je nach Fertigungstechnologie innerhalb der Produktionsstätten erhebliche Innenlasten, die einerseits energetisch genutzt werden können, aber andererseits auch einen Kühlbedarf anfordern.

Die Möglichkeit, mit Wärmeenergie zu kühlen ist nicht grundlegend neu, denn Augustin Mouchot hat bereits vor mehreren Generationen in Frankreich als Pionier die Technologie der »Solaren Kühlung« entwickelt. Vordergründig erscheint es zwar eine paradoxe Vorstellung zu sein, dass mit Wärme gekühlt werden kann. Technologisch lassen sich zur Solaren Kälteerzeugung (Solar Cooling) jedoch auf dem Weg der rationellen Energieanwendung durch Energieumformung unterschiedliche Verfahren einsetzen. Jeder Anlagenbetreiber wird diese innovativen Technologien als positiv bewerten, wenn damit erhebliche Betriebskostenreduzierungen erreicht werden. Ein weiterer Aspekt spricht für diese Technologien mit dem besonders großen Vorteil: über die Sommermonate steigen und fallen die Sonneneinstrahlung und die Anforderungen des Raumkühlbedarfs beinahe zeitgleich. Zudem erfordern die Außenklimatischen Veränderungen und die zunehmende Tendenz von klimatisierten Räumen, dass auch an den Sommertagen mit erhöhten Außentemperaturen eine Überhitzung der Wohn- und Arbeitsräumen unterbunden werden muss.

Der Einsatz einer solaren Kühlung vereint die o. a. Gegensätze unter Beteiligung solar-thermischer Anlagensysteme, die an Ab- oder Adsorptionskältemaschinen gekoppelt sind. In den Objekten, bei denen eine kostengünstige Wärmequelle, z. B.

- Abwärme aus Produktionsprozessen
- Kraft-Wärme-Kopplung

zur Verfügung steht, werden bereits seit längerer Zeit auch thermisch angetriebene Kühl-systeme bzw. raumluftechnische Klimatisierungen mit einbezogen. Die solare Kühlung nutzt die Sonnenenergie als ortsunabhängige und völlig neutrale Wärmequelle und kann zu-

dem mit den konventionellen Kältemaschinen kombiniert werden. Viele konventionelle Klimaanlagen arbeiten noch mit Kompressionskältemaschinen, die einen höheren Energiebedarf erfordern, je wärmer die zu kühlende Raumluft ist.

Die Grundidee der solaren Kühlung besteht darin, den Verursacher für den erhöhten Kühlbedarf selbst zur Kühlung zu nutzen. Die Sonnenenergie wird durch eine Vakuumröhrenanlage in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird dann einer thermisch betriebenen Kältemaschine zugeführt. Dieses Funktionsprinzip hat den Vorteil, dass sich die Energienachfrage für die Kühlung und das Energieangebot der Sonne zeitlich decken. In den Sommermonaten, wenn die thermischen Solaranlagen ihren größten Ertrag liefern, ist auch der Energiebedarf der raumlufttechnischen Klimaanlagen am höchsten. Selbst die Tagesprofile von Kühllast und Solarertrag stimmen bei vielen Gebäuden überein. Um die Mittagszeit erreichen beide Leistungskurven ihr Maximum, um zum Nachmittag und gegen Abend abzuklingen. Aus diesem Grund kann auf eine aufwendige und teure Speicherung der Energie verzichtet werden.

Wichtigstes Kriterium für den Einsatz der Solaren Kälteerzeugung ist die Verfügbarkeit von kostengünstiger oder kostenloser Wärmeenergie. Als Kombinationsvariante bietet sich hier u.a. die Nutzung der Solarthermie an, weil die Kollektoren einerseits zur Warmwasserbereitung verwendet, aber andererseits im Hochsommer energetische Überschüsse produziert werden, die zur Verhinderung von Übertemperaturen den Einsatz von Stillstandskonzepten erforderlich machen. Weitere Einsatzmöglichkeiten zur Nutzung der externen Wärmequelle der Sorptionstechnologie bieten sich mit der Kraft-Wärme-Kopplung, Abwärmenutzung aus Produktionsprozessen, etc. an. Üblicherweise werden für die Raumkühlungsprozesse im Sommer um die Mittagszeit die Höchstwerte benötigt. Weil gerade während dieser Zeit sämtliche Klimaanlagen den Strom gleichzeitig benötigen, wird auch das elektrische Verteilernetz hoch belastet.

Ein Einsatz der regenerativen Solarkältenutzung ist nicht nur energetisch sinnvoll, sondern es werden auch gleichzeitig die Stromspitzen zur Mittagszeit abgefedert und daher das Verteilungsnetz stabilisiert. Die Hauptsaison der Solaren Kälteerzeugung zur Nutzung von Klimaanlagen liegt ebenfalls in den Sommermonaten, wobei zugleich nicht selten durch den hohen Strombedarf dieser Anlagen die Kapazitätsgrenze der Stromnetze erreicht bzw. überschritten wird. Gleichzeitig treten insbesondere bei großen solarthermischen Anlagen zur Heizungsunterstützung in der heißen Jahreszeit lange Stillstandszeiten auf, da zu dieser Zeit der Wärmebedarf im Gebäude niedrig ist. Das solare Potenzial – bedingt durch hohe Einstrahlung – bleibt dann weitgehend ungenutzt.

Aufgrund der ganzjährigen Nutzung der Solarwärme können der Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit der solarthermischen Anlagen deutlich gesteigert werden. Die solare Kälteerzeugung reduziert die Umweltbelastungen durch Schadstoffemissionen, wie Kohlendioxid zur Stromerzeugung und verringert den zur konventionellen Kühlung erforderlichen Kraftwerksparkitätsausbau.

Im Bereich der alternativen Klimaanlagen werden die Absorptionskältemaschinen mit einer Leistung von 15 bis 200 kW angeboten, bei denen es sich um ein geschlossenes System handelt, das Kaltwasser erzeugt. Deren Funktionsweise besteht darin, dass das Wasser, das im Solarkollektor erwärmt wird, in einen Generator fließt, wobei hier das Lithiumbromid-Wasser-Gemisch oder Ammoniak/Wasser erwärmt wird. Dieses Gemisch verdampft und wird

in einem Kondensator wieder verflüssigt sowie bei niedrigem Druck und bei Temperaturen zwischen 0 °C bis 10 °C im anschließenden Verdampfer erneut verdampft. Hierbei wird das Kaltwasser innerhalb des Oberflächenluftkühlers zur RLT-Klimatisierung gekühlt. Die so stark konzentrierte Lithiumbromidlösung wird zwischenzeitlich mit Wasserdampf vermischt und in den Absorber zurückgeführt. Der Kältemitteldampf wird im Absorber durch die Stoffpaare Lithiumbromid/Wasser-Gemisch oder Ammoniak/Wasser absorbiert und durch den Einsatz einer Pumpe auf ein höheres Druckniveau gebracht. Nun beginnt der Kreislauf von vorne. Durch Zufuhr von Solarwärme wird der Kältemitteldampf wieder aus der Lösung ausgetrieben und im Anschluss durch das zugeführte Kühlwasser verflüssigt. Nach der Drosselung ( $h=\text{const.}$ ) kann das Kältemittel nun im Verdampfer erneut verdampft werden.

Eine attraktive Anwendung besteht darin die Absorptionskältemaschinen über Fresnelkollektoren zu betreiben und so die Kaltwassererzeugung zur Gebäudeklimatisierung zu nutzen. Der Einsatz von Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschinen ist aufgrund ihres großen Temperaturhubs für solare Kühlungsanlagen besonders interessant. Einerseits benötigen sie auch bei hohen Umgebungstemperaturen keinen Nasskühlturm, um die Abwärme abzuführen, andererseits erreichen diese Kältemaschinen Temperaturen unter 0°C, mit denen wiederum der Einsatz von Eisspeichern ermöglicht wird. Der Antrieb von Absorptionskältemaschinen mit der Wärmeerzeugung mittels Fresnelkollektoren ist hierbei eine interessante Lösungsvariante von vielen Anwendungsmöglichkeiten der solaren Prozesswärme.

Die tendenziell steigenden Energiepreise lassen erkennen, dass sich die drei Anwendungsvarianten der solaren Kühlung in Kürze auch finanziell für kleinere Systeme, z. B. für Ein- und Mehrfamilienhäuser herstellen lassen. Für diese Einsatzbereiche werden insbesondere auch kombinierte Systeme für Kühlung, Heizung und Warmwassererwärmung interessant, wobei sich die erforderliche Energie über die gleichen Hochleistungskollektoren gewinnen lässt. Die überschüssige Energie, die in den besonders heißen Sommermonaten – außer für evtl. industrielle Prozesse – weder zur Heizungsunterstützung noch zur Erwärmung des Warmwassers benötigt wird, geht nicht verloren, sondern wird für die Flächenkühlsysteme des Gebäudes genutzt. Da während der Übergangszeit im Frühjahr und Herbst in der Regel kein Kältebedarf angefordert wird, kann die durch die Solarkollektoren bereitgestellte Wärme in einem Pufferspeicher zur Warmwassererwärmung bzw. und/oder Heizungsunterstützung genutzt werden. Das gesamte System arbeitet letztlich ohne Unterbrechung und Stillstandsverluste, wodurch auch die Lebensdauer erhöht wird.

Zur Solaren Kälteerzeugung werden drei Verfahren angewendet: Kälteerzeugung mit elektrischen, mit thermischen oder mit thermochemischen Systemen. In der Praxis werden dabei vor allem Verfahren der Wärmetransformation durch Ab- und Adsorption aus dem Bereich der thermischen Systeme eingesetzt. Die Basis der solarthermisch angetriebenen Kühlung besteht im thermochemischen Vorgang der Sorption. Ein flüssiger oder gasförmiger Stoff wird entweder an einer festen, porösen Substanz angelagert (Adsorption) oder in einer Flüssigkeit oder einem Feststoff aufgenommen (Absorption).

### Verfügbare Technologien

Aus technologischer Sicht werden in der Praxis drei Arten der thermischen Kälteanlagen verwendet, die nach unterschiedlichen Kühlprinzipien aufgebaut sind:

- Geschlossene Systeme
  - Absorptions-Kältemaschinen
  - Adsorptions-Kältemaschinen
- Offene Systeme
  - feste Sorbentien (z. B. Silikagel): sorptionsgestützte Anlagen SGK oder DEC-Systeme (Desiccant and Evaporative Cooling) sowie Sorptions- und solargestützte Klimaanlagen (SSGK)
  - flüssige Sorbentien: Lithiumchlorid als Sorptionsmittel

**Tab. 3-10:** Verfahren zur thermischen Kälteerzeugung (Quelle: IB-THEISS, München)

Verfahren	geschlossen		offen	
Kältemittelkreislauf	geschlossener Kältemittelkreislauf			Kältemittel (Wasser) im Kontakt mit der Atmosphäre
Verfahrensprinzip	Kaltwassererzeugung			Luftentfeuchtung und Verdunstungskühlung
Sorptionsmittel	fest	flüssig	fest	flüssig
Stoffsysteme (Kältemittel/Sorptionsmittel)	Wasser-Silikagel oder Ammoniak-Salz* Das Kältemittel wird an der Oberfläche gebunden	Wasser-Lithiumbromid oder Ammoniak-Wasser Das Kältemittel wird gelöst	Wasser-Silikagel oder Wasser-Lithiumchlorid-Zellulose	Wasser-Calciumchlorid oder Wasser-Lithiumchlorid
verfügbare Technologie	Adsorptions-Kältemaschinen	Absorptions-Kältemaschinen	sorptionsgestützte Klimatisierung; DEC-Anlagen (Desiccant and Evaporative Cooling)	–
Kälteleistungsbereich (kW)	50 bis 430 kW	35 kW bis 5 MW	pro Modul 20 bis 350 kW	–
Wärmeverhältnis (COP)	0,3 bis 0,7	0,6 bis 0,75 (1-stufig) 1,2 (2-stufig)	0,5 > 1	> 1
Solar-technologie	FK und VRK	VRK	FK und SLK	FK und SLK
Anmerkungen: * noch in der Entwicklungsphase FK: Flachkollektoren VRK: Vakuumröhren-Kollektoren SLK: Solarluftkollektoren				

**Tab. 3-11:** Thermisch angetriebene KlimaKälte-Technologien (Quelle: IB-THEISS, München)

Technologie	Absorption	Adsorption	Sorptionsgestützte Klimatisierung; DEC-Anlage
Stoffsystem	LiBr/Wasser	Silikagel/Wasser	LiCl, Silikagel
Art der Klimatisierung	Kaltwasser, z. B. Luftkühler, Kühldecken	Kaltwasser, z. B. Luftkühler, Kühldecken	konditionierte Luft (gekühlt, entfeuchtet)
Kälteverhältnis	0,6 bis 0,75 (einstufig)	0,3 bis 0,7	0,6 bis 1,1
nutzbare Antriebs-temperaturen	85 bis 130 °C (einstufige Anlagen)	55 bis 95 °C	45 bis 95 °C
Leistungsbereich, Marktverfügbarkeit	45 bis 5.000 kW	50 bis 430 kW	20 bis 350 kW je Modul
Solartechnik	Vakuumröhren-Kollektor	Vakuumröhren-Kollektor oder Flachkollektoren	Flachkollektoren, Solarluftkollektoren

## 3.6.2 Solare Kühlung mit geschlossenen Systemen

Zur Kaltwassererzeugung aus Niedertemperaturwärme stehen im Bereich der geschlossenen Systeme die Absorptionskältemaschinen und Adsorptionskältemaschinen zur Verfügung. Mit Hilfe des Kaltwassers wird dann entweder die Zuluft der Räume konditioniert oder über Kühldecken der Raum gekühlt (Stille Kühlung). Rund 60 % der Anlagen verwenden Absorptionskältemaschinen, ca. 11 % Adsorptionskältemaschinen und etwa 29 % offene Kühlverfahren.

### 3.6.2.1 Absorptionstechnologie

Bei den solarthermischen Systemen, die mit thermisch betriebenen Kältemaschinen gekoppelt werden, handelt es sich um geschlossene Systeme. Hierbei wird die Solarstrahlung von Sonnenkollektoren eingefangen, in Wärme umgewandelt und in Wasser gespeichert. Das Warmwasser wird in Pufferspeichern gelagert und je nach Bedarf verwendet. Das Kernstück des Systems ist eine Kältemaschine, die nicht mittels Strom angetrieben wird, sondern von Wärme. Der Kältemitteldampf wird mithilfe des »thermischen Kompressors« vom Niederdruckteil in den Hochdruckteil der Kälteanlage gefördert. Die Absorptionskältemaschine nutzt den chemischen Vorgang der Sorption aus, d. h. unter der Sorption oder Absorption wird chemisch die Aufnahme eines Gases oder einer Flüssigkeit durch eine andere Flüssigkeit definiert.

Für Absorptionskältemaschinen kommt ein sorbierbares Kältemittel mit niedrigem Siedepunkt, z. B. Ammoniak, zum Einsatz, das später in Wasser gelöst wird. Außer Ammoniak kann auch Wasser selbst bei starkem Unterdruck als Kältemittel dienen, wobei sich hier als Lösungsmittel Lithiumbromid eignet. Die hauptsächlich eingesetzten Arbeitsstoffpaare sind Ammoniak/Wasser und Wasser/LiBr, wobei Ammoniak bzw. Wasser als Kältemittel und Wasser bzw. LiBr als Lösungsmittel verwendet werden.

Bei der Paarung Ammoniak/Wasser siedet Ammoniak bei 105 Pa Druck bereits bei  $-33^{\circ}\text{C}$  und ist somit für die Kälteerzeugung und Klimatisierung geeignet. Die Paarung Wasser/LiBr

ist auf die reine Klimatisierung mit Verdampfertemperaturen über 0 °C beschränkt. In Wasser-LiBr-Anlagen ist der extrem geringe Kältemitteldruck von etwa 1.000 Pa bei +5 °C günstig für geringe Pumpenleistung und wenig aufwendige Konstruktionen. Allerdings darf in LiBr-Systemen die Kältemittelkonzentration in der Lösung nicht zu stark absinken, da sonst eine Kristallisation des Lösungsmittels eintritt. Und durch den hohen Siedepunktabstand bei Wasser/LiBr entsteht beim Austreiben des Kältemittels aus der Lösung reiner Kältemitteldampf. Der Siedepunktabstand zwischen Ammoniak und Wasser liegt dagegen so niedrig, dass beim Austreiben immer Wasserdampf produziert wird, der in einer Rektifiziersäule wieder abgeschieden werden muss. Im Verdampfer siedet das Kältemittel bei niedrigen Temperaturen. Hierbei entzieht es einem Kühlsystem Wärme. Im Anschluss daran muss das Kältemittel wieder verflüssigt werden. Als erster Schritt vermischt hierzu der Kältemaschinenabsorber den Kältemitteldampf mit dem Lösungsmittel. Es kommt zur Sorption, die Wärme freisetzt. Diese Wärme wird entweder zur Warmwassererwärmung genutzt oder über einen Kühlturn abgeführt. Die Lösungsmittelpumpe fördert die nun mit Kältemittel angereicherte flüssige Lösung zum Austreiber, der aufgrund der unterschiedlichen Siedepunkte das Kältemittel und das Lösungsmittel wieder trennt.

Die Funktion des thermischen Kompressors einer Absorptionskälteanlage beruht auf der Siedepunkterhöhung des Arbeitsmittelgemisches gegenüber dem reinen Kältemittel. Diese entspricht der Erhöhung der Gleichgewichtstemperatur des kältemittelbeladenen festen Sorbens im Vergleich zur Siedetemperatur des reinen Kältemittels bei der Adsorption. In beiden Fällen sind diese physikalischen Eigenschaften der verwendeten Sorptionsmittel ausschlaggebend für die Eignung für einen Niedertemperatur-Sorptionskreislauf. Für einen bestimmten Einsatzfall, d. h. vorgegebene Kalt- und Kühlwassertemperaturen, ergibt sich die Prozesstemperatur im Austreiber (Generator) des Sorptionskreislaufes aus den Gleichgewichtsdaten des verwendeten Sorptionsmittels. Diese interne Prozesstemperatur sowie die treibende Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung des Wärmeübertragers auf den internen Prozess sind ausschlaggebend für die erforderliche Temperatur zum Antrieb des Sorptionskreislaufes. Die Güte der Sorptionskreisläufe wird maßgeblich durch einen Verlustwärmestrom im thermischen Kompressor vom Austreiber zum Absorber bzw. Adsorber bestimmt. Die Absorptionskältemaschinen unterscheiden sich von elektrisch angetriebenen Kompressionskälteanlagen durch den Ersatz des mechanischen Verdichters durch einen thermischen Verdichter und sind so mit geschlossenen Adsorptionskältemaschinen vergleichbar. In einer Absorptionskältemaschine wird der Verdichterprozess durch Absorption des verdampften Kältemittels in einem Lösungsmittel (Wasser oder Lithiumbromid) und anschließendes Auskochen im Generator bei hohem Druck ersetzt.

Der Einsatz von Absorptionskältemaschinen im größeren Leistungsbereich mit den umweltfreundlichen Kältemittel Wasser/Lithiumbromid (LiBr) oder Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) erfolgt bereits seit etlichen Jahren, überwiegend in Produktionsbetrieben, bei denen preiswerte Restwärme anfällt und gleichzeitig Kälte benötigt wird. Da Ammoniak einen niedrigeren Siedepunkt als Lithiumbromid hat, lassen sich mit dem Kältemittelpaar (Ammoniak/Wasser) auch niedrigere Temperaturen erreichen.

Jede thermisch angetriebene Kältemaschine ist durch drei Temperaturniveaus charakterisiert, ein

- hohes Temperaturniveau, auf dem die Antriebwärme bereitgestellt wird
- niedriges Temperaturniveau, auf dem die Nutzkälte generiert wird
- mittleres Temperaturniveau, auf dem die Wärme an die Umgebungsluft abgeführt wird.

Die solare Wärme wird hierbei, abhängig vom Verfahren und Maschinentyp, auf einem Temperaturniveau von ca. 60 bis 110 °C bereitgestellt.

**Objektbeispiel:** Absorptionskälte (Yazaki) für das Technologie- und Logistikzentrum HaWi-Energietechnik, Eggenfelden

Die neu erstellte Y-förmige Firmenzentrale des Technologie- und Logistikzentrums besteht aus der 5.000 m<sup>2</sup> großen Logistikfläche und dem gleichfalls 5.000 m<sup>2</sup> großen Bereich in dem die Büro-, Schulungs- und Ausstellungsräume integriert sind. Die Raumkühlung wird über die Solarthermie, bestehend aus 200 Vakuumröhrenkollektoren (Viessmann Vitosol) mit insgesamt 240 m<sup>2</sup>-Absorberfläche und zwei Absorptionskältemaschinen mit einer Kälteleistung von insgesamt 105 kW, und dem Kaltwassernetz 16/20 °C sichergestellt. Die Speichergröße innerhalb des Solarthermiekreislaufs beträgt 1.600 Liter.



**Abb. 3-17:** HaWi-Technologie- und Logistikzentrum (Quelle: HaWi-AG, Eggenfelden)

Bei Absorptionskreisläufen beruht dieser auf die unvollständige Wärmeübertragung zwischen der kältemittelarmen und kältemittelreichen Lösung im Lösungskreislauf. Der Lösungsmittelkreislauf besteht aus Absorber, Austreiber, Lösungsmittelpumpe und Gegenstromwärmeübertrager. In diesem Kreislauf zirkuliert das Lösungsmittel, das Kältemittel wird absorbiert und ausgetrieben. Dieser Kreislauf entspricht analog dem Verdichter bei der Kompressionskältemaschine. Der Kältekreislauf besteht aus dem Verflüssiger, gegebenenfalls Nachkühler und dem Verdampfer. Innerhalb dieses Kreislaufs zirkuliert das Kältemittel Wasser im dampfförmigen oder flüssigen Aggregatzustand. Der Wärmeaufwand für den Austreiber ist sehr hoch, es können hier aber die Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW) oder aus den industriellen Prozesstechniken, aber insbesondere auch die Sonnenenergie genutzt werden. In dem Fall, dass ein Überangebot an Wärme vorliegt, sind die Sorptionskälteanlagen besonders bei Leistungen über ca. 100 kW den Kompressionskälteanlagen überlegen. Aufgrund dieses Wärmeangebotes können die hohen Investitionskosten über die niedrigen Betriebskosten mehr als ausgeglichen werden.

Die Integration des Gegenstromwärmeübertragers erfüllt den Zweck, die hohe Temperatur der vom Austreiber kommenden starken Lösung zu senken, d. h. die kalte, reiche Lösung wird durch die warme, arme Lösung vorgewärmt. Die hohe Temperatur ist im Absorber unerwünscht, weil ja gekühlt werden soll. Nebeneffekt: Durch diese Maßnahme wird auch der Wirkungsgrad des Aggregats erhöht. Ein weiterer Wärmeübertrager sollte gegebenenfalls zwischen dem Absorber und Generator integriert werden, weil die schwache Lösung aus dem Absorber eine zu tiefe Temperatur aufweist und daher erwärmt werden sollte.

Bei der Wahl des flüssigen Absorptionsmittels ist neben den thermodynamischen Eigenschaften, wie Dampfdruck, Kristallisationsgrenze oder Dichte, auch die thermodynamische Viskosität entscheidend, weil diese einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch der Pumpe hat.

Die Stromkosten für die Lösungsmittelpumpe sind äußerst gering und können mit ca. 1 bis 2 % der Kälteleistung veranschlagt werden.

Neben der Abwärmeleitung aus der Produktion werden zunehmend auch Vakuumröhren-Kollektoren, d. h. die Solarthermie zum Antrieb der Absorptionskältemaschinen verwendet. Das Einsatzspektrum von Hochleistungskollektoren erhöht sich hier beträchtlich.

**Tab. 3-12:** Referenzprojekte – Anlagen mit geschlossenen Solarkühlssystemen  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
<b>Absorption</b>		
Buhlsche Mühle in Ettlingen	Die Antriebwärme für die thermische Kältemaschine stammt von einer Mikrogasturbine, die das Tagungszentrum mit Wärme und Strom versorgt.	
Bundespresseamt Berlin Architekten: KSP Engel und Zimmermann	Das 120 m lange Presse- und Besuchszentrum mit Bibliothek und technischen Sonderbereichen beinhaltet eine Hauptnutzungsfläche von 15.680 m <sup>2</sup> .	Absorptionstechnologie mit Viessmann Vitosol-Vakuumröhren-Kollektoren
Landesvertretung Nordrhein-Westfalen, Berlin-Tiergarten Petzinka Pink Architekten, Düsseldorf	Der quaderförmige Glaskörper hat auf vier Etagen eine Nutzfläche von über 10.000 m <sup>2</sup> . Einsatz energiesparender Systeme, z. B. Absorptionskältemaschine (zur Erzeugung der Kälte für die Kühldecken der Sonderbereiche, aus der Abwärme der BHKWs); die Luft für das Heiz-/Kühlsystem des Atriums wird in einem 175 m langen, rund um das Gebäude angeordneten, Erdluftkanal vorkonditioniert.	Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk (zur Abdeckung der elektrischen und thermischen Grundlast des Gebäudes); Fernwärme (für thermische Spitzenlast). 100 m <sup>2</sup> große Photovoltaikanlage

Fortsetzung Tab. 3-12

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Zentralklinikum Universität Freiburg	Thermischer Antrieb ein- und zweistufige Absorptionskältemaschine (AKM) mit einer Gesamtkälteleistung von 3.490 kW	
	<b>Adsorption</b>	
Universitätsklinikum Freiburg, Laborbereich der Hautklinik	Thermischer Antrieb einer Adsorptionskältemaschine (AKM) mittels 170 m <sup>2</sup> -Vakuumröhren-Kollektorfeld. Arbeitsmittel Silikagel.	Der Wärmededarf der Adsorptionskältemaschine wird in den Sommermonaten zu 60% und in der Übergangszeit zu 40% durch die Solarthermie gedeckt.
Umweltbundesamt in Dessau Sauerbruch Hutton Architekten, Berlin	Auf der Dachfläche der gesamten Büroschlange wurden 115 Vakuumröhren-Kollektoren (Viessmann Vitosol 200) aufgeständert, die den thermischen Solarertrag der 345 m <sup>2</sup> -Absorberfläche zur Adsorptionskältemaschine (COP=0,6) weiterleiten. Die solarunterstützte Klimakälte liefert an ca. 100 Tagen im Jahr im Vollastbetrieb bis zu 80 kW; Kaltwasser (16/20 °C). Über die Solarthermieanlage wird zudem von der erforderlichen Wärmeleistung mit 200 kW ein Anteil mit 160 kW bereitgestellt. Die solare Wärme wird in drei parallel geschalteten Pufferspeichern mit je 7.500 Litern Inhalt gespeichert.	Im UBA Dessau wurde ein Erdflächen-Wärmeübertrager mit einer Rohrlänge von über 5 km Länge errichtet. In den Shed-Dächern der gläsernen Eingangshalle wurden 388 m <sup>2</sup> Photovoltaikmodule mit einer Leistung von 32 kWp integriert, die jährlich ca. 24.000 kW Strom erzeugen.

### 3.6.2.2 Adsorptionstechnologie

Beim Adsorptionskälteprozess wird bei niedrigem Druck der Umgebung durch Verdampfung des Kältemittels Wasser Wärme entzogen (d. h. Nutzkälte erzeugt). Die Verdichtung des Wasserdampfs auf den für die Verflüssigung erforderlichen Druck im Kondensator erfolgt durch einen thermischen Kompressor. Der Wasserdampf wird dabei zunächst an Silikagel adsorbiert und anschließend durch Wärmezufuhr desorbiert und auf den erforderlichen Druck gebracht.

Eine Adsorptionskältemaschine besteht aus zwei mit Silikagel gefüllten Kammern, die wechselweise zur Wasserdampfadsorption und -desorption genutzt werden und einen quasikontinuierlichen Prozess ermöglichen. Die Adsorptionswärme bzw. die notwendige Heizwärme für die Desorption wird durch Wärmeübertrager in den Kammern ab- bzw. zugeführt, deren Rippen für einen guten thermischen Kontakt dicht mit Silikagel umpackt sind. Die Kältemittelpumpe fördert lediglich nicht verdampftes Wasser zurück in die Sprühdüsen des Verdampfers. Jede Silikagelkammer wird über zwei ansteuerbare Ventilkappen entweder mit

dem Verdampfer oder Kondensator verbunden. Der Prozess besteht aus zwei Arbeitstakten sowie einer kurzen Umschaltphase zwischen den Takten.

Im Arbeitstakt 1 ist das untere Dreiegeventil für eine der beiden Silikagelkammern zum Verdampfer hin geöffnet und der im Verdampfer produzierte Wasserdampf wird an dem trockenen und vorgekühlten Silikagel adsorbiert (in der Abbildung links). Das obere Dreiegeventil ist zur anderen Kammer geöffnet. Die Beladung erfolgt bei geringerem Verdampferdruck (z. B. 1.000 Pa bei 5 °C) und die freiwerdende Adsorptionsenthalpie wird durch das Kühlwasser abgeführt. Die mögliche Wasserdampfbeladung des Silikagels steigt mit sinkender Kühlwassertemperatur, die somit den Endpunkt der Adsorption festlegt. In der zweiten Kammer (in der Abbildung rechts) ist während des ersten Arbeitstaktes die Ventilklappe zum Verdampfer hin geschlossen und die Klappe zum Kondensator hin geöffnet. Durch Wärmezufuhr wird der im vorigen Arbeitstakt angelagerte Wasserdampf ausgetrieben und bei Kondensatordruck verflüssigt.

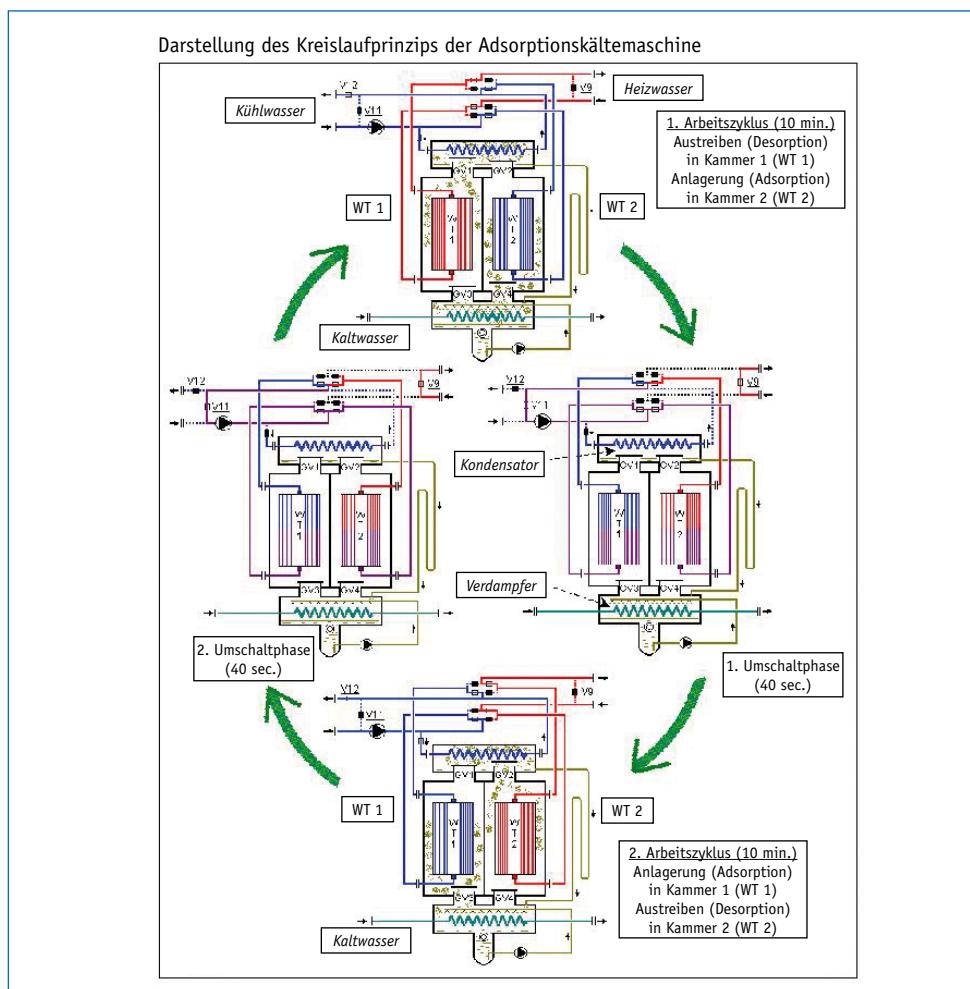


Abb. 3-18: Adsorberprozesskreislauf (Quelle: Mycom)

## Funktionsprinzip der Adsorptionskältemaschine

Im Arbeitstakt 2 werden die Dreiwegeventile genau gegenläufig betrieben. Der adsorbierende Wasserdampf der ersten Kammer wird jetzt durch Wärmezufuhr in den Kondensator ausgetrieben (Ventilklappe zum Kondensator geöffnet, zum Verdampfer geschlossen), in der zweiten Kammer wird das getrocknete Silikagel zur Adsorption von Wasserdampf aus dem Verdampfer verwendet. Zwischen den beiden Arbeitstakten findet eine Umschaltphase zur Wärmerückgewinnung von etwa 20 Sekunden Dauer statt, in welcher beide Kammern in Reihe von Kühl- bzw. Heizwasser durchströmt werden. Das Heizwasser dient zur Vorwärmung der Adsorptionskammer des vorhergehenden Arbeitstaktes, das Kühlwasser kühlt die bisherige heiße Desorptionskammer vor. Ein typischer Zyklus dauert 400 Sekunden, sodass inklusive Umschaltphase ein Takt von sieben Minuten gegeben ist. Bei den Adsorptionskälteanlagen liegen die Betriebskosten um bis zu 70 % unter denen der konventionellen Kälteerzeugung.

Für den Antrieb von Adsorptionskältemaschinen kann Wärme ab Temperaturen von 55 °C genutzt werden. Adsorptionskältemaschinen können daher mit Vakuumröhren-Kollktoren oder effizienten Flachkollektoren betrieben werden. Die Kälteleistung von Adsorptionskältemaschinen liegt im Bereich von 70 bis 400 kW, kleinere Anlagen sind am Markt nicht verfügbar. Adsorptionskältemaschinen stellen die Kälte in Form eines abgekühlten flüssigen Mediums bereit. Daher kann die Kälte wie konventionell bereitgestellte Kälte aus Kompressionskältemaschinen mit allen bekannten Verfahren der Kältebereitstellung für das Gebäude genutzt werden. Die Kälte kann entweder in Lüftungszentralen zur Kühlung der Zuluft genutzt, dem Raum direkt über Kühldecken zugeführt oder mit dezentralen Kühlgeräten (fan coils) bereitgestellt werden.

*Objektbeispiel:* Festo AG & Co. KG in Esslingen am Neckar

Im Firmenstammsitz der Festo AG & Co. KG in Esslingen am Neckar wurde am 18.12.2007 die derzeit größte solarunterstützte Klimaanlage zur Beheizung und Kühlung des Bürogebäudes in Betrieb genommen. Die drei Mycom Adsorptionskältemaschinen wurden bereits 2001 in Betrieb genommen, um die Abwärme der Druckluftkompressoren aus dem Technologiezentrum zu nutzen und damit die Büros und das Rechenzentrum zu kühlen. In der Praxis hat sich jedoch ergeben, dass die Abwärme dieser Druckluftkompressoren nur ca. 300 kW erreicht. Im Zuge der überarbeiteten Gebäudetechnik wurde für die maximale Gesamtleistung der zur Kältemaschinenantriebsenergie benötigten Wärme von 1.750 kW eine Erhöhung des Druckluftwärmegewinns auf 600 kW durchgeführt. Die restlichen 700 kW werden seitens der 1.300 m<sup>2</sup> großen Solarthermiekollektoren bereitgestellt. Aufgrund dieser Energiekonzeption wird in einem erheblichen Umfang Erdgas als Primärenergie eingespart und somit indirekt die Energiressourcen geschützt.

Bei dem seit 2001 bestehenden Anlagekonzept und der in 2007 erfolgten Umrüstung auf die solare Kühlung mussten auch die geeigneten hydraulischen Anbindungen des Solarthermienetzes in das Heiznetz, aus welchem die Adsorptionskältemaschinen die Heizleistung beziehen, durchgeführt werden. Auf den Dächern der Produktionsstätten versorgt die derzeit weltweit größte Solarthermieanlage mittels Vakuumröhren-Kollektoren die leistungsstärkste Adsorptionskälteanlage der Welt. Die Solarthermieanlage unterstützt in den Sommermonaten die Adsorptionskältemaschine zur Kühlung von über 27.000 m<sup>2</sup> Brutto-

fläche und trägt in den Wintermonaten zur Beheizung bei. Die Wärme kann je nach Sonnen-einstrahlung auf hohem Temperaturniveau für das ganze Werk bzw. auf Niedertemperatur-niveau nur für die Betonkernaktivierung eines Gebäudes verwendet werden. Die Solare Küh-lung vereint die paradox scheinende Technik, dass aufgrund des Einsatzes der rationellen Energieanwendungen die regenerative Sonnenenergie auch im Hochsommer zum Kühlen ver-wendet werden kann. Um dieses realisieren zu können, wurden Vakuumröhrenkollektoren der Solarthermieanlage an die Adsorptionskältemaschine gekoppelt.



**Abb. 3-19:** Firmenstammsitz der Festo AG & Co. KG in Esslingen am Neckar  
(Quelle: Festo AG & Co. KG)

Der Vorteil der Adsorptionstechnologie liegt darin begründet, dass diese Maschinen bereits mit Heizwassertemperaturen über 55 °C zu betreiben sind. Letztlich resultiert daraus auch der höhere Nutzungsgrad der Solarthermieanlage sowie die Abwärmenutzung aus den Druck-luftkompressoren.

Die Energiekonzeption basiert letztlich darauf, dass wenn die sommerlichen Außen-temperaturen ihre Spitzenwerte erreichen, zur Gebäudekühlung auch die meisten Kühler-gien benötigt werden. Da das solare Energieangebot proportional mit dem Energiebedarf steigt und sinkt, steht nun mit der integrierten Technologie nahezu zeitgleich genau dann ausreichend Energie zur Verfügung, wenn sie am nötigsten angefordert wird. Eine geringe zeitliche Verzögerung tritt nur durch die Speichermassen der Fundamente, Wände und Decken auf, die ein Aufheizen des Gebäudeinneren durch ihre eigene Wärmekapazität puffern. Der große Aufwand, Wärme zu speichern und wieder bereitzustellen, entfällt, weil die Energie sofort verbraucht wird und daher nur kleine Puffer verwendet werden. Aufgrund dieser Kon-zeption wird durch Nutzung der kostenlosen regenerativen Sonnenenergie über das gesamte

Jahr Energie eingespart. Im Sommer versorgt die Sonne die Adsorptionsanlage mit Heißwasser und im Winter betreibt sie die Heizungsanlage. Da das frostsichere »AquaSystem« von Paradigmas Solarthermieanlagen als Wärmeträger nur Wasser enthält, kann es direkt in die Klimatisierungssysteme geleitet werden, ohne die verlustreichen Wärmeübertrager durchlaufen zu müssen.

### 3.6.3 Solare Kühlung mit offenen Systemen

Als Alternative zu den geschlossenen Systemen werden bereits seit Jahren die Systemvarianten der sorptionsgestützten Klimatisierung (SGK) oder auch (Desiccative and Evaporative Cooling) verwendet. Die Verfahren der klassischen SGK basieren auf der absorptiven oder adsorptiven Entfeuchtung der Luft und anschließender adiabaten Verdunstung. Damit kann im Sommer gekühlte und entfeuchtete Zuluft bereitgestellt werden, ohne Einsatz einer Kältemaschine. Die Klimageräte müssen um die entsprechenden Komponenten für die Entfeuchtung und Regenerierung des Luftentfeuchters erweitert werden.

Die Systeme – Kältemittel (Wasser) in Kontakt mit der Atmosphäre – werden auch mit thermischer Energie betrieben, in der Regel in Kombination mit der Kraft-Wärme-Kopplung. Bisher sind die absorptiven Verfahren allerdings mit wenigen Ausnahmen nur in der Prozesslufttechnik vertreten. Dieses energetische System arbeitet mit Luft anstatt mit Wasser. Die warme Außenluft wird angesaugt und durch ein Sorptionsrad geleitet. Dieses Sorptionsrad enthält ein Sorptionsmittel, in der Regel Silikagel, das die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit entzieht. Im Anschluss daran wird die Luft mit Wasser besprührt und kühlt sich ab. Das Silikagel muss, um für weitere Kühlzyklen zur Verfügung zu stehen, durch die Sonnenwärme regeneriert werden. Das SGK-System eignet sich aufgrund der geringen Temperaturanforderungen von etwa 60 bis 80 °C besonders für den Einsatz mit thermischer Solarenergie.

Wichtigstes Kriterium für den Einsatz der sorptionsgestützten Klimatisierung ist die Verfügbarkeit von kostengünstiger oder kostenloser Wärmeenergie. Als Kombinationsvariante bietet sich hier u. a. die Nutzung der Solarthermie in Form einer solargestützten sorptiven Klimatisierung (SSGK-Anlage) an, weil die Kollektoren einerseits zur Warmwasserbereitung verwendet, aber andererseits im Hochsommer energetische Überschüsse produziert werden, die zur Verhinderung von Übertemperaturen den Einsatz von Stillstandskonzepten erfordern. Weitere Einsatzmöglichkeiten zur Nutzung der externen Wärmequelle der Sorptionstechnologie bieten sich mit der Kraft-Wärme-Kopplung, Abwärmenutzung aus Produktionsprozessen, etc. an.

#### 3.6.3.1 Sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) oder Desiccative and Evaporative Cooling (DEC)

Die technische Umsetzung des Verdunstungsvorgangs (Verdunstungskühlung) zur Klimatisierung stellt die DEC-Klimatisierung (Desiccative and Evaporative Cooling) dar. Als offener Prozess arbeitet eine DEC-Anlage ohne Kühlтурm. Der Kühlleffekt von verdunstendem Wasser ist umso größer, je trockener die zu kühlende Luft ist. Bevor warme Umgebungsluft mit flüssigem Wasser in Kontakt kommt, wird sie daher in einer DEC-Anlage sorptiv getrocknet. Durch den Verdunstungseffekt beim Versprühen von Wasser wird die Luft anschließend ge-

köhlt. Hierbei sind Temperaturabsenkungen zwischen 4 und 8 K gegenüber der Außenluft realistisch. Das Trocknen der Luft erfolgt durch Kontakt mit absorbierenden Salzen oder Mineralstoffen. Zum anschließenden Austreiben der Flüssigkeit aus dem Adsorbent wird Wärme benötigt, d.h. hierbei handelt es sich um die »Antriebsenergie« dieses künstlichen Kälteverfahrens. Das Temperaturniveau der Antriebswärme liegt zwischen 50 und 80 °C und ist zudem von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Wegen der niedrigen Antriebstemperaturen ist dieses Verfahren auch für die Nutzung der Solarenergie interessant.

### *Nachteile des Sorptionsprozesses mit Verdunstungskühlung*

- Die Systeme mit zwei hintereinander geschalteten Rotoren gewinnen nicht nur die Wärme und Feuchte zurück, sondern auch die in der Abluft enthaltenen Schadstoffe. Der Rückgewinnungsgrad der Schadstoffe liegt je nach Schadstoff zwischen 15 bis 40 % pro Rotor. Zudem wird in der Regel nicht berücksichtigt, dass der tatsächliche Außenluftbedarf für die gleiche Luftqualität fast doppelt so hoch ist wie bei Systemen ohne Umluftanteil. Parallel dazu steigen natürlich auch die Herstellungskosten für das Luftkanalnetz und die Betriebskosten für die Luftförderung.
- Die Anordnung der Ventilatoren in den Systemen ist sehr kritisch. Bei Anlagen mit hohen externen Druckverlusten ist das System nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar, weil hier die Luftleckagen der Rotoren bis zu 20 % Umluft oder 20 % an Mehrförderung des Abluftventilators betragen kann. Bei einer nicht optimalen Einstellung der Dichtungen können diese Werte noch überschritten werden. Folgerung: Druckdifferenzen über 500 Pa zwischen Zu- und Abluft am Rotor sind zu vermeiden, da sonst der Außenluftbedarf, je nach dem Verhältnis des externen zum internen Druckverlust, um zusätzlich 10 bis 15 % ansteigt. Die Anordnung der Ventilatoren ist hierbei stets ungünstig, zum einen aufgrund des hohen Umluftanteils und zum anderen durch das nicht nutzbare zusätzlich zu fördernde Luftvolumen bzw. durch die zusätzliche Ventilatorabwärme an der kältesten Stelle im System. Da die RLT-Geräte mit einem Umluftanteil betrieben werden, muss das Abluftkanalnetz nach VDI 6022 dem Hygienezustand der Zuluft entsprechen und somit regelmäßig gereinigt werden.
- Der Außenluft wird im Kühlbetrieb als erstes Feuchte entzogen, die später im Befeuchter wieder zugeführt werden muss und die Betriebsweise aus hygienischen Gründen nicht zu empfehlen ist. Als Konsequenz ergibt sich, dass zu Zeiten hoher Keimbelaustung der Außenluft die Befeuchtung in Betrieb ist.
- Die Druckverluste der Befeuchter stehen ganzjährig an, weil der Entfeuchtungsrotor stets im Luftstrom verbleibt. Lediglich auf der Fortluftseite ist ein Bypass vorgesehen. Daraus folgt ein hoher Energiebedarf zur Luftförderung, der z.B. von Anlagensystemen mit Kaltwasserkühlern erheblich unterschritten wird.
- Bei einer teilweisen Befeuchtung mittels Umlaufwasser besteht die Gefahr der Legionellenproblematik, Verkalkung mit Druckverlusterhöhung sowie ein nicht unerheblicher Wartungs- und Inspektionsaufwand.
- Bei Systemen mit Hochdruckbefeuchter wird, neben dem zusätzlichen Druckverlust und Wartungsaufwand, entweder der Einsatz mit vollentsalztem Wasser oder nachgeschaltetem Feinfilter (F7) erforderlich.

### Anforderungen an die Komponenten

Die Auslegung einer sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage (SGK-System) basiert auf thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten, wobei für die Dimensionierung der gesamten Komponenten eine besondere Vorgehensweise zu berücksichtigen ist. Generell wird hierbei Unterschieden zwischen einer

- klassischen SGK-Anlage mit je einem Zu- und Abluftbefeuchter
- verfahrenstechnischen Kombination mittels konventioneller Kältetechnik.

Aufgrund des gegenwärtigen Standes der Produkteinführung werden in der Praxis die Verschaltungsvarianten mit der »trockenen« Sorptionsluftentfeuchtung, d. h. mittels Sorptionsregeneratoren bevorzugt. Im Prinzip ist es jedoch auch möglich, die »flüssige« Sorptionsluftentfeuchtung anzuwenden. Andererseits werden derzeit von der Herstellerseite die flüssigen Systeme noch nicht in der erforderlichen Breite angeboten.

Aufgrund der vorhandenen Rückkopplung der Raumluftzustände auf die Leistungsgrenzen der Zuluft, müssen bereits bei der Berechnung wesentliche Randbedingungen berücksichtigt werden. Die wichtigste Komponente einer sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage bildet hierbei der eigentliche Sorptionsprozess. Nachfolgend aufgeführte Anforderungen sollten durch den Sorptionsregenerator erfüllt werden:

- Umschaltbarkeit Sommer-/Winterbetrieb zwischen den Funktionen Enthalpierückgewinnung und Luftentfeuchter
- stufenlose Regelbarkeit im Drehzahlbereich von  $n = 10 \text{ l/h}$  bis  $n = 10 \text{ l/min}$
- erreichbarer Enthalpieübertragungsgrad sollte mindestens 80 % betragen
- minimaler Druckunterschied zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom bzw. Berücksichtigung der konstruktiven Maßnahmen in Form von Spülkammern etc. zur Minimierung der Leckluftrate und der Mitrotationsverluste
- Beständigkeit der hygroskopischen Eigenschaften
- gleiche Anströmflächen in der Zu- und Abluft.

Für die Befeuchtungssysteme und die Wärmerückgewinnungseinrichtungen stehen im Umfang der Dimensionierung seitens der Hersteller ausreichende Hilfsmittel zur Verfügung. Generell sollten für diese Komponenten zusätzlich auch nachfolgend aufgeführte Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Einsatz eines sehr effektiven Wärmerückgewinnungssystems mit einer Rückwärmeszahl von  $\Phi_t$  mindestens 80 %
- Sicherstellung von minimalen Druckunterschieden zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom sowie minimaler Druckverluste
- Befeuchtungswirkungsgrad im Abluftvolumenstrom von nahezu 100 %
- Zu- und Abluftbefeuchter stufenlos regelbar bis zu einem Befeuchtungswirkungsgrad von 100 %
- geringer Strom- und Wasserverbrauch
- Unempfindlichkeit gegen schwankende Wasserqualitäten.

Bei den SGK-Verfahren zur Klimatisierung sollte zudem insbesondere auf die Wasserqualität geachtet werden. Hierbei spielen insbesondere die zu erwartenden technologischen Probleme aufgrund der Wasserinhaltsstoffe eine Rolle sowie die Fragen zur Anlagenhygiene.

Bei den zwei wesentlichen Komponenten der sorptionsgestützten Klimatisierung handelt es sich um

- einen Rotationswärmerückgewinner ohne Feuchte austausch, also als Temperatur austauschrad. Um eine hohe Systemeffizienz zu erreichen, sollte dieser Wärmerück gewinner eine hohe Rückwärmeszahl aufweisen.
- einen Rotations-Wärmeübertrager als Adsorptionsluftentfeuchter (z. B. als Keramik rotor in Kapillarstruktur mit Silicagelaufbau oder als Entfeuchtungsadsorptionsre generator).

### **Sorptionsregenerator**

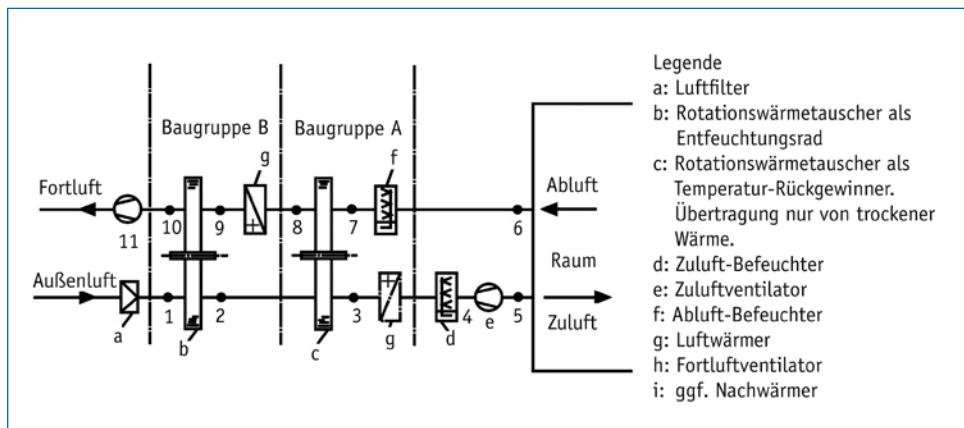
Der Sorptionsregenerator hat im Sommer die Aufgabe, die Außenluft soweit zu entfeuchten, dass durch die nachgeschalteten Komponenten in Form der indirekten und direkten Verdunstungskühlung eine ausreichend große Temperaturabsenkung der Zuluft erreicht werden kann. Bei einer guten Anlagenauslegung sind hierbei als Zulufttemperatur ca. 19 bis 20 °C erreichbar. Für den Fall einer Forderung nach einer niedrigeren Zulufttemperatur müsste ein Oberflächenkühler in den Zuluftstrom integriert werden. Für die energetische Effizienz des Verfahrens ist die minimal erforderliche Regenerationstemperatur entscheidend, die für eine kontinuierliche Luftentfeuchtung notwendig ist.

Der Sorptionsregenerator bildet die Hauptkomponente des Klimatisierungskonzeptes mit dem der Wärme- und Stoffaustausch realisiert wird. Die Sorptionsregenrateoren haben in der Regel den gleichen konstruktiven Aufbau wie die seit Jahren bekannten Regenerativ wärmerückgewinner. Das Grundprinzip besteht darin, dass eine langsam rotierende Speichermaße im Gegenstrom von zwei Luftvolumenströmen durchströmt wird. Im Prinzip können mit einem Sorptionsregenerator zwei verschiedene Betriebsweisen realisiert werden:

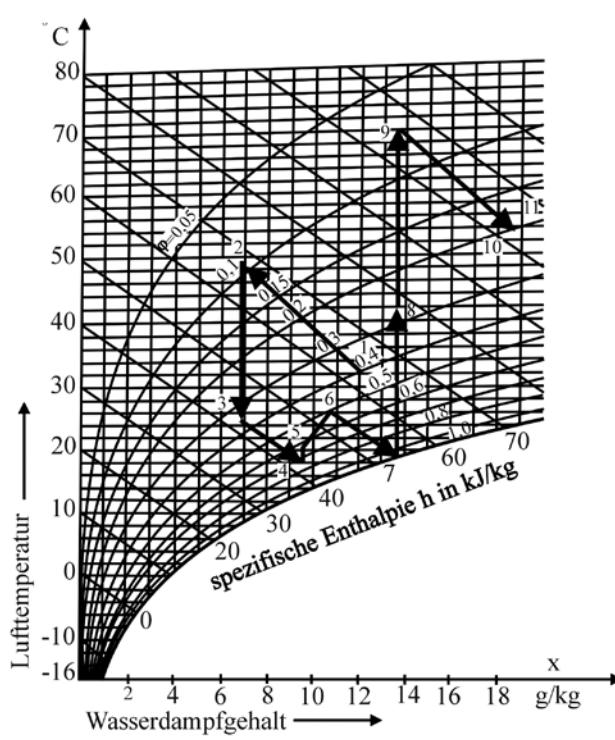
- Luftentfeuchtung im Sommer
- Enthalpierückgewinnung im Winter.

Beide Betriebsfälle sind für die energetische Effizienz des SGK-Verfahrens von gleichrangiger Bedeutung. Die Zustandsänderungen für den Entfeuchtungsfall werden in der Regel in erster Näherung isenthalp angesetzt. Hierbei lässt sich jedoch feststellen, dass die nachfolgend aufgeführten Einflüsse eine deutliche Abweichung hervorrufen: Die

- isenthalpe Zustandsänderung wird von der Verdampfungswärme bewirkt
- Sorptionswärme hängt von der Beladung der Speichermaße ab
- Schleppwärme hängt von der Regenerationstemperatur, der Wärmekapazität, der Drehzahl und der Speichermaße sowie von den Leckagen ab.



**Abb. 3-20:** DEC-Systemkomponenten einer sorptionsgestützten Klimatisierung (Sommerbetrieb)  
(Quelle: IB-THEISS, München)



**Abb. 3-21:** Zustandsverlauf im h-x-Diagramm im Sommerbetrieb einer sorptionsgestützten Klimatisierung (Quelle: IB-THEISS, München)

**Tab. 3-13:** DEC-Zustandsverlauf im h-x-Diagramm (Quelle: IB-THEISS, München)

Zustand	Zustandsänderung
$1 \rightarrow 2$	Entfeuchtung durch Absorption $x_2 < x_1 \rightarrow t_2 > t_1; h_2 \sim h_1$
$2 \rightarrow 3$	Wärmerückgewinnung: der Luft wird der Anteil der sensiblen Wärme entzogen
$3 \rightarrow 4$	Verdunstungsbefeuchtung
$4 \rightarrow 4'$	Zuluftzustand ( $4'$ ) inkl. Ventilatorwärme
$4' \rightarrow 5$	Luftzustandsänderung aufgrund der Raum-Innenlasten ( $x_5; t_5 > x_{4'}; t_{4'}$ )
$5 \rightarrow 6$	Adiabatische Kühlung durch Abluftbefeuchtung
$6 \rightarrow 7$	Wärmerückgewinnung: die Abluftwärme wird als Regenerationsluft genutzt
$7 \rightarrow 8$	Nacherwärmung
$8 \rightarrow 9$	Regeneration des WRG-Regenerators (analog $2 \rightarrow 1$ )
$9 \rightarrow 9'$	Ventilatorwärme (analog $4 \rightarrow 4'$ )

Die Auslegung der SGK-Anlage erfolgt für den gleichen Auslegungsfall wie in der traditionellen Klimatechnik, d.h. bei einer Außenlufttemperatur von 32 °C und einer rel. Außenluftfeuchte von 40 % bzw. einer Außenluftfeuchtigkeit von 12 g/kg.

### 3.6.3.2 Sorptions- und Solargestützte Klimaanlagen (SSGK)

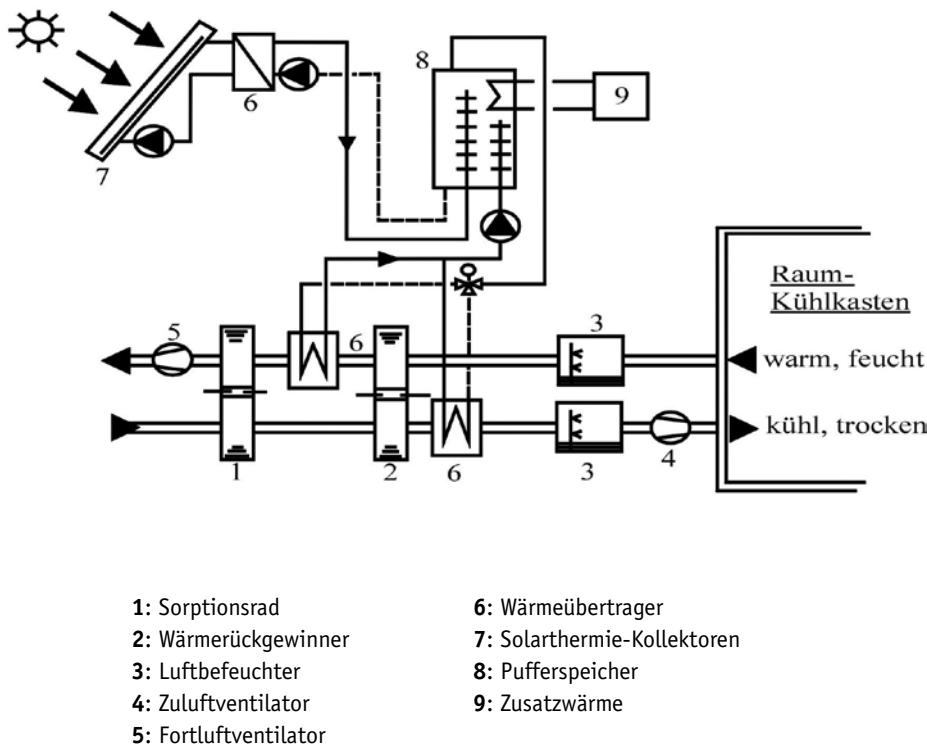
Die Systeme der Solaren Sorptiongestützten Klimatisierung (SSGK) können nach dem Beitrag der thermischen Solarenergie an der zur Regeneration des Sorptionsrades benötigten Energie unterteilt werden in:

- solarautarke Systeme
- solarunterstützte Systeme.

Bei den solarautarken Systemen wird die erforderliche Regenerationsenergie vollständig durch die Sonne geliefert. Mit diesen Systemen kann daher aber nicht an sämtlichen Stunden des Jahres mit 100 %-iger Sicherheit die Einhaltung eines bestimmten Raumluftzustandes gewährleistet werden.

Hierzu wird im ersten Schritt die Luftfeuchte in einem langsam rotierenden Sorptionsrad reduziert. Im Anschluss daran wird die erwärmte Luft über ein Wärmerückgewinnungsrad von der kühleren Raumluft abgekühlt und mittels der Verdunstungskühlung auf die gewünschte Zulufttemperatur angehoben. Hiermit geht die Leistung einer DEC-Anlage über die normale Kältebereitstellung hinaus. Das technische Entscheidungskriterium ist, ob der hygienische Luftwechsel auch zur Abfuhr der fühlbaren und latenten Wärme ausreicht.

Eine Nur-Luft-Anlage ist in diesem Fall eine geeignete Lösung. Die Variante mit Zu-/Abluft-Anlage ist nur bei ausreichend dicht ausgeführten Gebäuden sinnvoll. Bei dieser kann Niedertemperaturwärme über offene sorptionsgestützte Anlagen (DEC) oder mit konventioneller Lüftungstechnik in Verbindung mit thermisch angetriebenen Kältemaschinen eingesetzt werden. Wenn eine Zu-/Abluft-Anlage nicht eingesetzt werden kann, sind thermisch angetriebene Kaltwassererzeuger die beste Möglichkeit der Nutzung von Niedertemperaturwärme.



**Abb. 3-22:** SSGK-Klimaanlage mit hydraulischer Entkopplung von SGK-Anlage und Pufferspeicher  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Der Einsatz einer sorptionsgestützten Klimaanlage führt zu einer erheblichen Reduzierung der für die Klimatisierung erforderlichen Kälteleistung. Der Kühlbedarf kann hierbei auf etwa 35 bis 40 % gesenkt werden. Durch die Vortrocknung kann auch eine natürliche Kältequelle zur Klimatisierung eingesetzt werden. Die Kombination von sorptionsgestützter Klimatisierung, Fußbodenkühlung und Erdkältesonden erweist sich im Regelfall als ein energiesparendes und zudem umweltfreundliches Klimatisierungskonzept, das nicht nur aus ökologischen Gründen, sondern auch aus ökonomischen Gründen (Betriebskostensparnisse) eine günstige Alternative zu konventionellen Nur-Luft-Klimaanlagen darstellt.

### 3.6.3.3 Sorptionsgestützte Klimatisierung mit flüssigen Sorptionsmitteln

Die Anlagensysteme mit flüssigen Sorptionsmitteln sind konstruktiv und von der Verfahrensweise her den Anlagen mit festen Sorptionsmitteln ähnlich. Anstatt die Luft am festen Sorptionsmaterial vorbei zuleiten, wird die Sorptionsflüssigkeit in der Luft verrieselt. Als Sorbentien werden hier Wasser/Calciumchlorid und Wasser/Lithiumchlorid verwendet.

Für sämtliche Anlagentypen gilt, dass die elektrische Energie nur zum Betrieb der für die Anlagen benötigten Hilfsantriebe erforderlich ist, d. h. also kein elektrischer Energiebedarf

zur Kompression gasförmiger Kältemittel. Insofern ist der Verbrauch an elektrischer Energie wesentlich niedriger als beim Einsatz mit Kompressionskältemaschinen.

Bei den offenen Verfahren hat die Flüssigoption mit Lithiumchlorid als Sorptionsmittel ein großes Potenzial, wobei der Prozess insbesondere für die Anwendung in Klimazonen interessant ist, in denen die Luftentfeuchtung eine große Rolle spielt. Mit dieser Flüssigkeits-sorption werden durch Kühlung des Sorptionsprozesses höhere COP-Werte erreicht.

### 3.6.4 Referenzprojekte mit offenen Solarkühlsystemen

*Objektbeispiel 1:* Solare Kühlung in der Bibliothek von Mataró,  
Architekt: Miquel Brullet i Tenas

Im Neubau der öffentlichen Bibliothek in Mataró ca. 40 km nördlich von Barcelona, mit einer Nutzfläche von 3.500 m<sup>2</sup> wurde erstmalig eine gebäudeintegrierte, hinterlüftete Photovoltaikfassade mit 244 m<sup>2</sup> installiert. Die Photovoltaikelemente mit einer Gesamtfläche von 244 m<sup>2</sup> in der Südfassade und 330 m<sup>2</sup> in den südorientierten Shed-Dächern erreichen eine Spitzenlast von 55 kWp. Um die von den PV-Generatoren und Solarthermialuftkollektoren erzeugte Wärme zu nutzen, wird ein Teil der elektrischen Kompressionskühlung durch eine solar betriebene sorptionsgestützte Klimaanlage (SGK) gedeckt. Die Raumlufttechnik für den Bereich Kinderbücher und Multimedia mit einer Fläche von 550 m<sup>2</sup> wurde mit einer offenen sorptionsgestützten Klimaanlage mit integriertem Silikagel-Sorptionsrotor umgerüstet. Im vollen Regenerationsbetrieb wird eine Kälteleistung von bis zu 55 kW (Enthalpiedifferenz zwischen Raumzuluft und Außenluft) bzw. eine Kälteleistung von bis zu 35 kW erreicht.

*Objektbeispiel 2:* Service Center im Güterverkehrszentrum (GVZ) Ingolstadt,  
Architekten: pbb Architekten und Ingenieure, Ingolstadt

Die Architekten setzten bei der Gebäudetechnik hinsichtlich eines optimalen Energieverbrauchs auf regenerative Energien. Die energetische Symbiose besteht daher aus dem Einsatz von

- 300 m<sup>2</sup> Solarthermiekollektoren
- solargestützte Klimatisierung
- Ausnutzung der RLT-Nachtkühlung
- fünf DEC-Wärmepumpen
- fassadenintegrierten Photovoltaikmodulen aus 228 Dünnschichtmodulen mit 397 m<sup>2</sup> Fläche
- Nutzung der oberflächennahen Geothermie mit 72 Erdwärmesonden bis 40 m Tiefe und Betonspeicher mit integrierten Rohrregistern.

Im Gebäude J wurden zwei RLT-Zentralen mit einem Luftdurchsatz von insgesamt 8000 m<sup>3</sup>/h und Wärmerückgewinnung eingesetzt. Die Kühlung erfolgt über den DEC-Prozess. Hierbei handelt es sich um eine offene Prozessführung, d. h. die Luft wird direkt gekühlt, ohne Zwischenschaltung eines Kältemittelkreislaufes. Die Kälteerzeugung erfolgt im DEC-Prozess auf Basis der Lufttrocknung (Sorption) und einer anschließenden Verdunstungskühlung. Zur Regeneration (Desorption) des Sorptionsgenerators wird die durch die Solarthermie gewonne-

ne Wärme verwendet. Jede DEC-Anlage hat eine Kühlleistung von ca. 38 kW und besteht primär aus den Komponenten:

- Sorptions- und Wärmerückgewinnungsrotor
- Zu- und Abluftventilator
- Lufterwärmer zur Regenerationsluft- und Zuluftwärzung
- adiabate Befeuchter im Zu- und Abluftstrom.

Mit der Aufteilung der Kollektoren in zwei Felder bietet sich die Möglichkeit, verschiedene Kollektortypen in einem Feldversuch zu vermessen. Die Solarthermieanlage mit 280 Flachkollektoren stellt primär die Energie für die Regenerationsluft der DEC-Anlage zur Verfügung, dient aber auch zusätzlich zur Wärmeversorgung des Gebäudes.

Die Kühlung erfolgt analog zur Heizung über die Wärmepumpen und die Bauteilaktivierung.

Die Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 18 kWp, besteht aus fünf Wärmepumpen mit einer Gesamtleistung von 320 kW und einer Kälteleistung von insgesamt 240 kW. Die Abwärme der Kondensatoren der Wärmepumpen wird über die Sorptionsrotoren der zwei DEC-Anlagen genutzt, um das Gebäude mit der erforderlichen Energie zur Gebäudeheizung und Wassererwärmung zu versorgen. Der Verdampfer entzieht hierbei die erforderliche Verdampferenergie aus dem Erdspeicher und den Erdsonden bzw. im Falle einer ausreichenden solaren Einstrahlung auch direkt aus der Solarthermieanlage. Aufgrund der hydraulischen Schaltung wird der Solarertrag der Kollektoren stark erhöht, weil hierbei auch die Kollektorerträge bei niedrigem Temperaturniveau erfasst werden. An Tagen mit einer hohen Sonneneinstrahlung und hohen Außentemperaturen ist der Verdampfer direkt in den Kältekreislauf eingebunden. Die im Kondensator entstehende Abwärme dient dann zur Wassererwärmung und zur unterstützenden Regenerierung des Sorptionsrotors der DEC-Anlage oder wird direkt in den Erdspeicher eingespeist.



Abb. 3-23: GVZ-Halle J, Ingolstadt (Quelle: pbb Architekten-Ingolstadt)

**Tab. 3-14:** Referenzprojekte – Anlagen mit Desiccative and Evaporative Cooling (DEC)  
(Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Alki-technik-Firmenzentrale in Ingolstadt/Bachschuster Architektur, Ingolstadt	Sorptionsunterstützte Klimatechnik (SGK)/DEC-Anlage	
Neubau der Hauptverwaltung Gelsenwasser AG	Sorptionsunterstützte Klimatechnik (SGK)/Abwärme des BHKW zur DEC-Anlage	Erdwärmesonden, reversible Wärmepumpe/Photovoltaikanlage/Gebäudeleittechnik
Service Center im Güterverkehrszentrum (GVZ) Ingolstadt/pbb Architekten und Ingenieure, Ingolstadt	Sorptionsunterstützte Klimatechnik (SGK)/DEC-Anlagen	5 Wärmepumpen mit 72 Erdwärmesonden in 40 m Tiefe, fassadenintegrierte Photovoltaik mit CIS-Modulen, Solarthermie

### 3.6.5 Innovationen in der Solar-KlimaKälte-Technologie

Die Forschungsanlage im »inHaus 2« der Fraunhofer Gesellschaft wurde mit der innovativen Technologie einer sorptionsgestützten Klimatisierung ausgerüstet. Als Innovation zu der bekannten Produktpalette wurde vom Produkthersteller Menerga eine energiesparende Technologie mit einem Absorptionsprozess zur Entfeuchtung der Luft entwickelt, die ohne Kompressionskältemaschinen auskommt. Das RLT-Gerät nutzt hierbei den Sorptionsprozess zur Entfeuchtung, wobei die Luft an der Oberfläche eines Rieselfilms aus einer konzentrierten Salzlösung getrocknet wird. Die Regeneration der Salzlösung erfolgt durch das Austreiben des Wassers mittels Erwärmung (hier Fernwärme) bei ca. 55 bis 70 °C. Als Wärmequelle kann somit auch die Solarthermie eingebunden werden.

Zur Kühlung der Luft werden unterschiedliche Technologien eingesetzt: Die Grundlast wird über die oberflächennahe Geothermie abgeführt, die in Verbindung mit einem hybriden Kompakt-Kaltwassererzeuger betrieben wird, der bei steigendem Kühlbedarf zugeschaltet wird. Innerhalb des RLT-Zentralgerätes wurden in einer Kaskadenschaltung drei Verfahren zur Kälteerzeugung realisiert. Bei niedrigen Außentemperaturen erfolgt die Kaltwassererzeugung über die »Freie Kühlung« und bei steigender Außentemperatur mittels Verdunstungskühlung (adiabat). In der letzten Stufe, d. h. bei sehr hohen Außentemperaturen, wird die Kälte über eine Kompressor-Kältemaschine erzeugt.

Mit dem RLT-Zentralgerät wird die Luft über einen Absorptionsprozess mit wässriger Lithiumchloridlösung (LiCl) entfeuchtet. Zur Regeneration des Absorptionsmittels reichen Temperaturen von 55 bis 70 °C aus. Insofern kann hier als Wärmequelle für den Absorptionsprozess die Solarthermie, Kraft-Wärme-Kopplung, Abwärme aus Produktionsprozessen, etc. genutzt werden. Auf dem Gebäudedach wurden 17 m<sup>2</sup> selektiv beschichtete Solarflachkollektoren installiert und unter einem Neigungswinkel von 30° nach Süden ausgerichtet. Zur Minimierung der Speicherverluste wurde ein Pufferspeicher mit 1,5 m<sup>3</sup> Inhalt im Solarkreis, als reiner Solarspeicher ohne Nachheizmöglichkeit eingebunden, der bis zu 95 °C aufgeheizt werden kann.

Die Komponenten innerhalb des RLT-Zentralgeräts ermöglichen, dass die vorgegebene Luftkondition mittels einer adiabaten Verdunstungskühlung sowie Entfeuchtung durch eine hygroskopische Salzlösung erreicht werden. Bei der Entwicklung der Absorber und Regenraternen wurde auf einen möglichst effizienten Wärme- und Stoffübergangswert zurückgegriffen, d.h. es wurde hier die Füllkörpertechnologie eingesetzt, bei der die zu entfeuchtende Luft im Kreuzstrom zur Salzlösung geführt wird. Die weiteren Komponenten sind ein Wärmeübertrager für die indirekte Verdunstungskühlung sowie ein Zu- und Abluftventilator. Derzeit werden einige Pilotprojekte in der Betriebsphase getestet.

#### *Funktionsprinzip*

Im Kühlbetrieb sorgt eine Befeuchtungseinheit im Abluftteil des Wärmeübertragers für eine Temperaturabsenkung der Zuluft ohne Stoffübertragung, d.h. es findet keine Feuchteerhöhung der Zuluft statt. Bei der Regeneration wird die verdünnte Salzlösung (wässrige Lithiumchloridlösung mit ca. 40 % Gewichtsanteil) erwärmt und danach wieder aufkonzentriert. Da die Abluft aus der Verdunstungskühlung bereits einen hohen Feuchtegrad hat, bietet sich hierzu die Außenluft an. Im Gegensatz zu Systemen mit Entfeuchtungsrotoren hat die Regeneration keinen direkten Einfluss auf die Zustandsänderungen im Zuluftteil. Die Entfeuchtung und Regeneration verhalten sich unabhängig voneinander und können auch zeitversetzt ablaufen. Die Speicherung der Salzlösungen ermöglicht die Regeneration zu Zeiten, in denen viel solare Wärme oder ein Wärmeangebot aus anderen Quellen (Abwärme, etc.) zur Verfügung steht. Die Technologie ermöglicht zudem die verlustfreie Speicherung der Solarenergie und anderer Wärmeenergien in Form von konzentrierter Salzlösung. Wenn keine Entfeuchtung gefordert wird, kann der Absorber auch im Bypass geschaltet werden.

Bei der sorptionsgestützten Klimatisierung kann die frei werdende Absorptionswärme durch die integrierte Verdunstungskühlung abgeführt werden. Die Wärmeleistung verhält sich unter der Voraussetzung eines isothermen Prozesses proportional zum Luftvolumenstrom und der geforderten Entfeuchtungsbreite (g/kg trockene Luft). Die Proportionalitätsfaktoren ergeben sich aus der Verdampfungsenthalpie des Wassers und der Dichte der Luft. Für diesen Teilprozess ist ein zusätzlicher Kaltwasserkreislauf in die adiabate Verdunstungskühlung eingebunden, der die Absorberflüssigkeit vor der Verrieselung in einem Plattenwärmeübertrager abkühlt. Da hierdurch kein Kühlтурm erforderlich wird, werden auch die Investitionskosten zur erforderlichen Wärmeabfuhr auf ein Minimum reduziert.

Der Konstruktionsaufbau des Regenerators wurde analog zum Absorber aufgebaut. Neben der Pumpenenergie zur Förderung der Salzlösung wird hier allerdings Wärme erforderlich. Ein Vorteil gegenüber Systemen mit festen Sorbentien besteht in der Zeitunabhängigkeit von Absorption und Regeneration aufgrund der Speicherfähigkeit der wässrigen Lösungen. Gegenüber einem Warmwasserspeicher, z. B. für die Solarthermie, ist die Speicherdichte der wässrigen Salzlösung um das 5-fache höher.

### Betriebsvarianten

Im Sommerbetrieb oder bei Übertemperatur wird die Luftmenge durch die Bypassschaltung erhöht:

- Allgemeiner Sommerbetrieb: RLT-Technologie mit adiabater Verdunstungskühlung
- Sommerbetrieb mit Solarregeneration: Um die durch die Feuchteaufnahme verdünnte Salzlösung wieder zu regenerieren wird die erwärmte Salzlösung im Desorber umgewälzt. Der ausgeschiedene Wasserdampf wird von einem kleinen separaten Außenluftstrom aufgenommen und mit dem Fortluftstrom abgeführt. Die so regenerierte Salzlösung kann somit wieder Feuchtigkeit aufnehmen.
- Sommerbetrieb bei hoher Außenluftfeuchte: An den Tagen, an denen die Außenluft die Schwülegrenze erreicht (»Hundstage«), wird die Außenluft im Absorber entfeuchtet. Die freiwerdende Sorptionswärme wird durch die adiabate Verdunstungskühlung auf die erforderliche Zulufttemperatur gekühlt.

#### 3.6.5.1 Kälteerzeugung mit thermomechanischen Systemen

Für die solar betriebenen thermomechanischen Systeme stehen zwei Verfahren zur Verfügung: der Vuilleumier-Prozess und der Rankine-Prozess, die allerdings in der Praxis noch nicht eingesetzt werden.

Beim Vuilleumier-Prozess wird eine Kombination von Stirling-Arbeitsgasverdichter mit Stirling-Kälteerzeugung genutzt. Die beiden Stirlingelemente sind gasseitig verbunden, nicht zu verwechseln mit den Stirling-Kältemaschinen, die mechanisch durch einen Stirlingmotor angetrieben werden. Nach dem Vuilleumier-Prinzip können sehr zuverlässige Apparaturen konstruiert werden, weil hier die Druckverhältnisse klein sind und somit die Belastungen für Lager, Dichtungen u.ä. gering bleiben.

Beim thermomechanischen Rankine-Prozess wird thermisch erzeugter Dampf in mechanische Energie zum Antrieb eines Motors umgewandelt. Dieser Motor wiederum treibt den Kompressor der Kompressionskältemaschine an. Der offensichtliche Nachteil des Systems liegt in der zweistufigen Konversion der Antriebsleistung von thermischer in mechanische und anschließend von mechanischer in Kompressionsleistung. Demgegenüber ist als Vorteil die Flexibilität der energetischen Versorgung zu nennen. Denn ist das System an ein elektrisches Netz angeschlossen, so kann – wenn kein Kühlbedarf gegeben ist – erzeugte elektrische Energie in das Netz eingespeist werden und umgekehrt bei mangelnder solarer Versorgung, das System mit nicht solar erzeugter elektrischer Energie problemlos versorgt werden.

#### 3.6.5.2 Langzeitspeicher (thermochemischer Speicher)

Der entscheidende Vorteil eines thermochemischen Speichers besteht in der nahezu verlustfreien Wärmespeicherung mit hoher Energiedichte und über einen längeren Zeitraum. Geeignete Prozesse sind u. a. die Adsorption eines Arbeitsmittels an einem Feststoff. Der Speicher wird geladen, indem durch Wärmezufuhr dem Speichermedium, z. B. Wasser entzogen wird. Im Umkehrschluss des Vorgangs, bei der Anlagerung der Wassermoleküle an das Sorptionsmaterial, wird die Wärme wieder freigesetzt. Aus diesem Grund wird der Vorgang

auch als »chemische Wärmepumpe« definiert. Die Be- und Entladung kann im Prinzip beliebig oft wiederholt werden. Gegenüber den konventionellen Heißwasserspeichern können die thermochemischen Systeme mit einer vier- bis fünfmal höheren volumenspezifischen Wärmemenge beladen werden.

Diese sind darüber hinaus in der Lage, bei der entsprechenden Anlagentechnik auch Kälte zur Raumklimatisierung bereitzustellen. Zudem können die thermochemischen Speicher auch zum Lastausgleich im Nah- und Fernwärmennetz genutzt werden und ermöglichen so die Platzierung der erforderlichen Spitzenbereitstellung. Vom eingesetzten Speichersorptionsmaterial hängen sowohl die Speicherdichte, die erforderliche Betriebstemperatur und die erreichbare Nutztemperatur als auch die dynamischen Eigenschaften ab. Silikatgels (stark poröse, glasartige Substanzen) wie auch Zeolithe (Gruppe von wasserhaltigen Metall-/Aluminosilikaten) besitzen eine große innere Oberfläche und sind in der Lage, große Mengen Wasser absorptiv zu binden.

Derzeit sind ca. 40 natürliche und über 100 synthetische Zeolithe bekannt, die durch Ionenaustausch oder durch die Dotierung mit hygrokopischen Salzen modifiziert und somit in ihrer Energiespeicherfähigkeit verbessert werden können. Für die Desorption benötigen die Zeolithe gegenüber den Silikatgelen höhere Arbeitstemperaturen (über 100 °C), können aber im Entladeprozess höhere Temperaturen liefern und sind auch in Heizsystemen mit höheren Vorlauftemperaturen anwendbar. Durch die Variation des Herstellungsverfahrens lässt sich die Struktur dem jeweiligen Verwendungszweck anpassen. Wärmespeicher auf Silikatbasis sind insbesondere für die Beladung durch Solarkollektoren geeignet, da Silikatgel adsorbiertes Wasser bereits bei niedrigen Temperaturen abgibt.

### 3.6.5.3 Kleinst-Solarkälteerzeugungsaggregate

Die Haupteinsatzgebiete erstrecken sich über Arztpraxen, Banken, Boutiquen, Hotels, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie sonstige Zweckbauten. Die Sorptionskältemaschinen im kleineren Leistungssegment mit 3,5 bis 25 kW können ideal zur energiesparenden Klimatisierung in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie kleineren Büro- und Gewerbegebäuden eingesetzt werden. Diese kompakten Maschinen arbeiten mit Wasser als Kältemittel und sind nahezu geräuschlos und wartungsmäßig. Zur Raumkühlung dienen in der Regel konventionelle RLT-Geräte (Splitgeräte), die mit den stromhungrigen elektrisch betriebenen Kompressoren über die Sommermonate einen maximalen Stromverbrauch zur Spitzenlastzeit benötigen. Diese Tatsache führte in den letzten Jahren regelmäßig zur Überlastung der Stromnetze. Solare Kältemaschinen haben den Vorteil, dass diese Geräte gerade zu dem Zeitpunkt, wenn die Außentemperaturen von 20 bis 32°C ansteigen, ihre höchste Kühlleistung liefern. Diese Geräte präsentieren sich als umweltfreundliche Alternative zu den Splitgeräten.

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Technologien und Systeme zur thermisch angetriebenen Kälteerzeugung und Klimatisierung entwickelt, die auf dem Sorptionsprinzip basieren, d. h. der reversiblen Anlagerung eines Arbeitsstoffes an einem Sorptionsmittel. Die Systemvarianten, werden je nach dem, ob es sich bei der Anlagerung um ein Oberflächen- oder Volumeneffekt handelt, als Adsorption (Oberfläche) oder Absorption (Volumen) definiert. Ferner wird noch zwischen den offenen und geschlossenen Verfahren sowie zwischen festen und flüssigen Sorptionsmitteln unterschieden.

Die mit Wärme (Sonnenenergie, Abwärme, etc.) angetriebenen thermischen Kältemaschinen sparen gegenüber den mit elektrischem Strom betriebenen Kompressionskältemaschinen nicht nur bis zu 70% elektrische Energie, sondern entlasten auch als Klimaschonendere Systemlösung die Umwelt bis zu 30% niedrigere CO<sub>2</sub>-Schadstoffemissionen. Silikatgel ist umweltfreundlich: Ozonschicht-Abbaupotenzial ODP = Null und Treibhauspotenzial GWP = Null.

Die Konzipierung dieser Geräte beinhaltet eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Kälteleistung, d. h. die Kälteleistung muss auch dann zur Verfügung stehen, wenn gerade keine Solarstrahlung vorhanden ist. In der Regel treten aber insbesondere in den frühen Morgenstunden Probleme auf. Weil das Kollektorfeld aber während dieser Zeit noch nicht ausreichend Leistung bereitstellen kann, gehen die Systeme frühestens gegen 10 Uhr in Betrieb. Ferner liegt das Ziel bei der solaren Kühlung in der Einsparung von Primärenergie begründet. Neben der Reduktion der Stromverbräuche für den Systembetrieb ist auch ein möglichst hoher Deckungsanteil solar erzeugter Kälteleistung gewünscht. Der Stromverbrauch beim Anlagenbetrieb kann durch den Einsatz effizienter Pumpen und Ventilatoren reduziert werden. Um den solaren Deckungsanteil zu erhöhen, muss der Einsatz der konventionellen Back-up-Systeme (Wärmeerzeuger zur Aufheizung der Antriebsseite der Kältemaschine) reduziert oder vermieden werden.

Im kleineren Leistungssegment werden schlüsselfertige Systemlösungen im Bereich der solaren Kühlung angeboten. Die Chancen in den Anwendungsbereichen liegen darin, mit mehr Volllaststunden pro Jahr, z. B. mit einer Kaskadenlösung in Kombination mit einer Kompressorkälteanlage für ein Kühllager. Dort könnte der Strom über BHKW erzeugt werden und mit der Niedertemperaturabwärme eine Absorptionskältemaschine (AKM) betrieben werden, die das Temperaturniveau der Kondensation im Kompressionsteil deutlich verringert.

Potenziale zur Effizienzsteigerung von AKM sind im Bereich der Anpassung der Maschinen an die spezifischen Anwendungsbedingungen zu finden, z. B. an das Temperaturniveau von BHKW, von Solarsystemen oder von Fernwärmeanlagen. Hier müssten die AKM auf eine größere Temperaturdifferenz ausgelegt werden. Energieverbesserungen sind aber auch durch andere Stufigkeiten möglich, z. B. bei der Kopplung einer AKM mit einem Brennstoffzellenaggregat. Durch die Überlagerung eines Double- und eines Single-Effekt-Kreislaufes kann die AKM an das Temperaturniveau der Brennstoffzelle oder einer anderen Wärmequelle besser angepasst werden. Damit lässt sich ein Wärmeverhältnis von 1,15 und höher erreichen. Hier besteht natürlich noch Entwicklungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Korrosion in derartigen Systemen.

Auf der Systemseite ist insbesondere die stärkere Standardisierung der Solarkälteanlagen zu nennen. Bei Kleinanlagen mit einer Kälteleistung bis ca. 25 kW geht der Trend zunehmend zu Komplettlösungen. Einerseits zur optimalen Abstimmung der einzelnen Komponenten und zum anderen zur Integration der unterschiedlichsten diversen Komponenten zum Gesamtsystem, analog zu den Solarkombisystemen (Wärmepumpe, Speicher, Solarthermie) oder der Kompaktanlage aus Wärmeerzeuger und Pufferspeicher in einer Baugruppe. Bei sämtlichen Kompakteinheiten stellt die Regelungstechnik einen besonderen Aspekt dar, denn durch eine mangelhafte Regelungsstrategie können der Jahreswirkungsgrad und somit die Wirtschaftlichkeit erheblich reduziert werden.

## 1. Solare Raumluftkühlung mit der »CitrinSolar«-Systemtechnologie

Bei der Kälteerzeugung besteht eine hohe zeitliche Übereinstimmung von Kältebedarf und Solarangebot. In den Sommermonaten können die Überschusserträge mithilfe der solaren Kühlung effizient zur Klimatisierung des Gebäudes genutzt werden. Das vorinstallierte Solar-Kühlungssystem »CitrinSolar« ist mit einer Absorptionskältemaschine ausgerüstet, die aufgrund der Nutzung solar erzeugter Wärme angetrieben wird. Die thermische Solar-energienutzung zur Warmwasserbereitung ist bewährter Stand der Technik. Zunehmend werden hierzu Kollektorflächen installiert, um auch einen großen Teil des Heizwärmebedarfs solar decken zu können. Über die Sommermonate führten bisher die großen Kollektorflächen zu hohen ungenutzten solaren Wärmeerträgen, da die Wärme über längere Zeit nur sehr aufwendig speicherbar ist. Aufgrund der Nutzung der sommerlichen Wärmeerträge zur Kälteerzeugung kann die Effizienz des Gesamtsystems erhöht werden, da der Klimakältebedarf und die Sonneneinstrahlung in den überwiegenden Anwendungsfällen einen weitgehend ähnlichen Verlauf kennzeichnen.

## 2. Absorptionskältegerät chillii PSC 12 von SolarNext/Pink

Die thermische Kühlung mit Solarthermie oder Biomasse kann zu einer deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Allerdings können niedrige Leistungszahlen schnell zu hohen Primärenergieverbräuchen führen, wenn mit nicht regenerativen Energieträgern nachgeheizt wird. Aus diesem Grund muss vor allem bei einstufigen Sorptionskältemaschinen der solare Deckungsgrad hoch sein (> 70 %) oder besser ein vollständiges solares Heizsystem vorliegen.



**Abb. 3-24:** Absorber chillii PSC 12 (Quelle: SolarNext)

### 3. Solare Klimatisierung (Solar Air-Conditioning – SAC)

Die Hauptproblematik der Anwendung der solaren Kühlsysteme liegt in der genauen Abstimmung der tatsächlichen Kühllast mit den Auslegungsparametern der Absorptionskältemaschine. Hierbei arbeiten die einfach aufgebauten Anlagensysteme auf der Basis der solarthermisch angetriebenen Absorptionskältemaschinen (AKM) mit Auskopplung als Kaltwassersysteme vorteilhaft.

#### 4. Climatewell/Schweden

Solare Absorptionsmaschine auf der Basis einer Lithiumchlorid-Absorptionskältemaschine von Climatewell AB/Schweden. Die Kühlleistung beträgt 10 kW, bei voller Beladung 20 kW. Im Gegensatz zu den anderen Absorbern speichert die Climatewell-Maschine Kälte, aber auch Wärme als chemische Energie in zwei Speichern, die alternierend geladen werden. Die Speicherkapazität beträgt im Kühlfall 60 kWh und im Heizfall 76 kWh.

Im kleineren Leistungssektor haben sich in den letzten Jahren auf Basis der Adsorptions-technologie mit dem Stoffpaar Silikagel/Wasser nachfolgend aufgeführte Produkthersteller etabliert:

5. Invensor GmbH, Berlin, mit einer Kälteleistung von 5 bis 50 kW, mit Zeolithe/Wasser.
6. Die an der Shanghai Jiao Tong University (SJTU) in China entwickelte Adsorptionskältemaschine vom Typ SWAC-10 mit dem Stoffpaar Wasser/Sikagel hat eine Kälteleistung von 10 kW und wird von der chinesischen Firma Jiangsu Shuangliang Air Conditioner Equipents hergestellt und seit 2008 in mehreren Projekten getestet.
7. SorTech AG, Halle (Saale): Adsorptionskälte-Prototyp mit einer Kälteleistung von 7,5 kW bzw. 15 kW.

### 3.6.6 Förderung und normative Rahmenbedingungen

Die Solarthermie wird in Deutschland durch Investitionsförderungen und die Gewährung verbilligter Kredite gefördert. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) gewährt für die Erstinstallation einer 20 bis 40 m<sup>2</sup> großen Solarkollektoranlage zur solaren Kälteerzeugung eine Förderung von 210 € pro angefangenen m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche. Jeder weitere Quadratmeter kann darüber hinaus mit bis zu 45 € gefördert werden (ausführliche Informationen befinden sich auf der Internetseite des BAFA).

Zudem können für Investitionsmaßnahmen ab 40 m<sup>2</sup> Kollektorfläche bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) Darlehen beantragt werden.

#### Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung führt das BMU mit der Fördermaßnahme Solarthermie2000plus die langfristig angelegten Forschungsaktivitäten zur thermischen Nutzung der Sonnenenergie im Niedertemperaturbereich fort. Gefördert wird die Planung, Errichtung und Erprobung von Pilot- und Demonstrationsanlagen mit einer erforderlichen Mindestgröße von 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und die Begleitforschung in ei-

nem Zeitraum zwischen fünf und acht Jahren mit 30 bis 50 % der Investitionskosten der Solaranlage.

Bei Projekten mit besonderem Pilotcharakter kann die Förderung auch darüber liegen. Mess-, Daten- und Anzeigetechnologie können bis zu 100 % gefördert werden.

### **Förderprogramm »Solarthermie2000plus«**

Es richtet sich insbesondere an die Gebäudeeigner großer bestehender oder neu zu errichtender Gebäude oder Liegenschaften im öffentlichen oder gewerblichen Bereich, Fördermaßnahmen zur Forschung an Hochschulen, Forschungsinstituten sowie an Unternehmen.

### **Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)**

Sie fördert Technologieentwicklungen, beispielhafte Systeme und Methoden zum Klimaschutz, die die Schonung der fossilen Energieträger zum Ziel haben, insbesondere auch in der Kältetechnik. Für Pilot- und Demonstrationsanlagen stehen öffentliche Fördermittel zur Verfügung.

### **Impulsprogramm für Kleinst-KWK-Anlagen**

Auch das Impulsprogramm für Kleinst-KWK-Anlagen bis max. 50 kW<sub>el</sub>, mit mindestens 5000 Vollaststunden im Jahr, wird die Investition kleiner Solarkälteerzeuger positiv beeinflussen. Die thermische Kälteerzeugung wird im Gesetzestext derzeit zwar nicht direkt ausgewiesen, es wird aber erwartet, dass aufgrund der Umsetzung des EEG analog auch die Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung begünstigt wird. Zudem wird sich das EEG auch im Bereich der solaren Kühlung positiv auswirken, weil durch die steigende Nachfrage nach solartechnischer Heizungsunterstützung mit nutzbaren Wärmeüberschüssen zu rechnen ist, die letztlich wieder in Kälte umgewandelt werden können.

Letztlich könnte von der Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz ein Investitionsimpuls für die thermisch betriebenen Kältemaschinen ausgehen. Anstatt wie bisher das Biogas unmittelbar an der Biogasanlage zu »verstromen«, kann es nun im Erdgasnetz an beliebiger Stelle in die KWKK-Anlage mit nahezu dreifachem Gesamtnutzungsgrad in Strom, Wärme und auch in Kälte umgewandelt werden.

## **3.6.7 Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Solarkältesysteme lässt sich nur differenziert und anlagenspezifisch beurteilen. Die unterschiedlichen Systemlösungen müssen in Abhängigkeit von der Bauphysik und Gebäudefunktionalität individuell auf die Anwendungstechnologie abgestimmt werden. Die Ökonomie hängt auch von einer Reihe von Rahmenbedingungen ab, wie z. B.

- der klimatischen Lage des Standortes
- dem zeitlichen Auftreten der Kühllasten
- der zusätzlichen Nutzung der Sonnenkollektoren zur Warmwasserbereitung, etc.

Um die Wirtschaftlichkeit von Systemen der solar unterstützten Klimatisierung in der Zukunft weiter zu verbessern, müssen jedoch noch eine Reihe von Maßnahmen optimiert wer-

den. Einerseits können technische Verbesserungen an den Komponenten, wie z. B. eine höhere Effizienz der thermisch angetriebenen Kältemaschinen bzw. Klimatisierungsverfahren, zu Kostenreduktionen führen. Andererseits sollte aber eine weitere Senkung der Investitionskosten für Solarthermieanlagen angestrebt werden. Dieses betrifft insbesondere die Solarthermie-Großanlagen, die in der Regel zur solar unterstützten Klimatisierung eingesetzt werden. Letztlich wird sich eine erfolgreiche Markteinführung insbesondere der Absorptionsanlagen im kleineren Leistungsbereich von 3 bis 15 kW ohne die entsprechende Unterstützung von Förderungsmaßnahmen, z. B. im Rahmen eines angemessenen Markteinführungspakets, weiterhin hinauszögern.

## 3.7 Eisspeicheranlagen

### 3.7.1 Grundlagen

Bei sämtlichen Gebäudevarianten, in denen Kaltwasser für die RLT-Anlagen benötigt wird, stellt sich auch die Frage nach dem energetischen Einsatz einer Eisspeicheranlagen. Einerseits ist die Erzeugung von Kälteenergie sehr aufwendig, andererseits können durch die Auslegung der Kältemaschinen und deren Betriebsweise Kosten eingespart werden. Wesentlich ist aber auch Pufferspeicher zu verwenden, analog dem Prinzip in der Warmwasserversorgung, z. B. Brennwertwärmeerzeuger mit Solareinbindung und Pufferspeicher.

Um eine Eisspeicheranlage konzipieren zu können, müssen das Lastprofil für den Spitzentag und die zur Verfügung stehende Ladezeit angegeben werden. Ferner sollte das hydraulische Prinzipschema zwischen Eisspeicher und Kältemaschine bekannt sein (Reihenschaltung, Parallelschaltung), da es auch einen Einfluss auf die Auslegung des Systems hat. In jedem Fall bewirkt der Einsatz eines Eisspeichers eine signifikante Reduktion der Betriebskosten. Die kurze Amortisationszeit und die lange Lebensdauer vervielfachen den Spar-Effekt. Die Eisspeicher sind zudem überaus robust und äußerst wartungsfreundlich. Mithilfe eines Eisspeichers werden zudem längere Maschinenlaufzeiten und dadurch ein höherer Anlagennutzungsgrad erreicht.

Der Einsatz von Eisspeichern hat nicht nur Auswirkungen auf die Dimensionierung der kältetechnischen Anlage, sondern beinhaltet auch hinsichtlich der Systemauswahl des Rückkühlwerks ökonomische Vorteile. Bemerkenswert ist, dass sich in Verbindung mit der Speicherung feststellen lässt, dass der luftgekühlte Kondensator energetisch nicht ungünstiger ist als ein Kühlturn. Auch derartige Einflüsse sind unbedingt bei der Entscheidung hinsichtlich eines Eisspeichersystems zu berücksichtigen.

Im Bereich der Eisspeicheranlagen sollten auch detailliertere Angaben zum Qualitätsnachweis getroffen werden, d. h. klare, deutlich nachweisbare und überprüfbare technische Daten, die den Ausschreibungsleistungen gerecht werden. Immer häufiger kommt es vor, dass eine bestimmte Leistung installiert wird, die entweder gar nicht benötigt wird oder viel zu knapp dimensioniert wurde. In der Regel stellt sich heraus, dass sowohl die Speicherleistung als auch die Abschmelzleistung oder die Abtauleistung und die erzeugte Eismenge verwechselt werden oder nicht richtig verstanden wurden. Im Bereich der Gebäudeklimatisierung bedeutet aber die Abtauleistung das Hauptkriterium, d. h. die Frage nach der Speicherleistung sollte stets zweitrangig betrachtet werden.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt zur Entscheidung des Einsatzes einer Eisspeicheranlage besteht auch in der Dimensionierung der Komponenten. Wird z. B. eine RLT-Anlage mit einer Kühldecke betrieben, dann können die Rohrleitungs- und Armaturendimensionen wesentlich kleiner ausgelegt werden, weil die Eisspeicheranlage mit viel niedrigeren Vorlauftemperaturen betrieben werden kann, als dieses bei einem Kaltwassersatz der Fall wäre.

Der Einsatz einer Kältespeicheranlage wird dann erforderlich, wenn bei kleinen Verteilernetzen ein zu häufiges Takten des Kälteerzeugers und damit erhöhter Verschleiß unterbunden werden sollen. Andererseits sind die marktgängigen Kältemaschinen noch nicht in der Lage, ihre Leistung stufenlos bis auf Null herunterregeln zu lassen. Häufig werden bei kleinen und mittleren Anlagen kombinierte Systeme aus Kältemaschine und integriertem Pufferspeicher angeboten. Es kann aber auch aus anderen Gründen notwendig oder wirtschaftlich interessant sein, große Kältekapazitäten vorzuhalten. Um große Kältemengen Platz sparend speichern zu können, werden Eisspeicher eingesetzt. Durch den Phasenwechsel von Flüssig zu Eis haben diese Speicher eine 20-fach höhere Energiedichte gegenüber Speichern für Klimakaltwasser. Das Aufladen, d. h. die Eisbildung, erfolgt in der Nacht und das Entladen durch Abschmelzen des Eises am Tag in Zeiten des Kältebedarfs.

Die Eisspeicher sparen zwar keine Energie, können aber die Betriebskosten der Kälteversorgung erheblich minimieren. Der Betrieb der Kältemaschinen wird in die Zeiten verlagert, in denen der Strom zu günstigeren Niedertarif bezogen werden kann. Gleichzeitig werden die elektrischen Lastspitzen, die sich auf den Leistungspreis auswirken, gekappt.

In der Klimatechnik werden aus energetischen Gründen immer häufiger wartungsfreie Eisspeichersysteme integriert. Mit dieser Technologie werden die täglichen Lastspitzen oberhalb von 50 % der Spitzenlast aus dem Eisspeicher gedeckt. In diesem Fall deckt die Kältemaschine außer ihrer elektrischen Anschussleistung und der installierten Rückkühlleistung nur noch die Grundlast. Ein weiterer Einfluss ist die Dauer, in der die Kältemaschine im Voll- und Teillastbereich arbeitet. Die jeweiligen Anteile ändern sich durch den Einsatz eines Eisspeichers und durch das Betriebskonzept sichtbar. Der Energiebedarf einer Kälteanlage mit einem Eisspeicher wird in der Regel über die Temperaturniveaus im Verdampfer und Verflüssiger abgeschätzt. Als Wärmeträger dient Sole, gegebenenfalls mit einer hydraulischen Entkopplung über einen Plattenwärmeübertrager mit einer mittleren Temperaturdifferenz von ca. 2 K.

Der Einsatz von Eisspeichern eignet sich insbesondere für Einkaufszentren, Büro- und Verwaltungskomplexe, Krankenhäuser, Industriebetriebe, Kinos, Theater u. ä. als eine effiziente und kostengünstige Lösung. Innerhalb dieser Nutzungsgebiete schwankt der Kältebedarf über 24 Stunden stark. Nachts wird zur Kühlung nur wenig oder keine, tagsüber jedoch sehr viel Kälte benötigt. Da die konventionellen Kühl- und Kälteanlagen auf Spitzenlast ausgelegt werden müssen, ist ihr Nutzungsgrad während vieler Betriebsstunden nur gering, während die Investitions- und Betriebskosten unnötig steigen. Eine Investitionsentscheidung zugunsten eines Eisspeichers ist in den Fällen vorteilhaft, wenn eine

- Stromkostenoptimierung erreicht werden soll
- Anlagenerweiterung vorliegt
- Notkälteversorgung erreicht werden muss.

## Stromkostenoptimierung

Eine Stromkostenoptimierung wird erreicht, wenn sich die elektrische Lastspitze des Gebäudes an einem Sommertag einstellt und durch Abschneiden der Spitzenkältelelast die gesamte elektrische Lastspitze des Gebäudes gesenkt hat und so auch der zu entrichtende Leistungspreis reduziert werden kann. Stromkosten können auch reduziert werden, wenn zur Kälteerzeugung ein kostengünstiger Nachtstromtarif genutzt werden kann und durch den Einsatz der Eisspeicher der elektrische Strombezug insgesamt vergleichbar wird und damit der Benutzungsrabatt, der prozentual auf die Jahresstromrechnung berechnet wird, erhöht werden kann.

Die Investition eines Eisspeichers rechnet sich auch in den Fällen, wenn für eine bestehende Kälteanlage die Kälteleistung vergrößert werden soll, ohne die Kältemaschine, die elektrischen Versorgungsanlagen (Transformator, Schaltschrank, etc.) und die Rückkühl-anlagen zu erweitern.

Für den steigenden Bedarf an Kühlenergie im Bereich der Gebäude sind folgende Tendenzen verantwortlich:

- Zunahme der äußeren Lasten aufgrund der architektonischen Gestaltung der Gebäudehülle mit hohen Anteilen transparenter Bauteile
- Zunahme der inneren Lasten durch technische Ausrüstung (Beleuchtung, Computer, Personal, etc.)
- zunehmende Komfortansprüche.

Eines der Hauptkriterien besteht darin, dass für RLT-Anlagen in kurzen Tagesperioden sehr große Mengen Kaltwasser zur Verfügung gestellt werden muss.

Zur Entscheidung eines ökologischen und ökonomischen Einsatzes ist es nicht nur erforderlich, nur die einzelnen Eisspeichersysteme zu vergleichen, sondern auch die erforderlichen Kriterien herauszustellen und diese miteinander zu vergleichen. Zu diesen Kategorien gehört auch die Wartungsfrage, die ebenso wichtig einzustufen ist wie Fragen des Energieverbrauchs. Bei einer konventionellen Kälteerzeugung mit elektrisch angetriebenen Kolbenkaltwassersätzen (KoKM), steigen der Elektroenergieverbrauch und der damit verbundene Primärenergieeinsatz. Zudem müssen aufgrund der täglichen Lastspitzen im Sommer hohe Versorgungsleistungen vorgehalten werden. Andererseits sind in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern die Perioden mit hohen Kältespitzenlasten insgesamt relativ kurz. Daraus resultiert ein ausgeprägter Spitzenlastbereich mit relativ geringen Kälteabsätzen.

Der Einsatz von Absorptionskältemaschinen (AKM) zur Grundlastdeckung ist allgemein bekannt und wird häufig angewendet. Dagegen stehen zur Deckung der Spitzenlast nur zwei ökonomisch vertretbare Lösungen zur Verfügung:

- Fernkältezuspeisung
- Einsatz eines Kaltwasserspeichers.

In der Praxis haben sich bereits etliche Kältespeicherprinzipien als Kleinspeicher durchgesetzt. Im Bereich der Großspeicher werden unter Beachtung der Randbedingungen die Kaltwasserspeicher verwendet. Der Aufbau eines derartigen Kaltwasserspeichers wird so konzipiert, dass die Be- und Entladung über den direkten Wasserübertrag realisiert wird. Eine thermische Schichtung soll die Effektivität des Speichers so weit wie möglich erhöhen

(Minimierung der inneren Verluste). Die äußeren Verluste werden durch eine Wärmedämmung im Bereich der Speicherhülle begrenzt. Für Kaltwasserspeicher existieren z. Zt. drei Konstruktionsvarianten:

- Stahlbeton mit außen liegender Wärmedämmung
- Stahl mit außen liegender Wärmedämmung
- Sandwichkonstruktion aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit innenliegender Wärmedämmung.

Im Allgemeinen sind die Absorptionskältemaschinen (AKM) in der Nacht bis in die frühen Morgenstunden nicht ausgelastet, sodass diese Grundlastmaschinen den Speicher beladen können.

Die wesentlichen Vorteile der Speicherlösungen basieren auf niedrigeren Investitionskosten. Der Speicher verdrängt ab bestimmten Kapazitäten die Kältemaschinen für den Spitzenbedarf.

Durch den Speichereinsatz können energetische, ökonomische und ökologische Vorteile erreicht werden. Diese positiven Effekte dienen zur Verstärkung der Technik der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Die technischen Vorteile eines Speichers sind in großen Kältesystemen gut umsetzbar. Konstruktiv werden wegen der minimalen Vorlauftemperatur von ca. 5 °C Kaltwasserspeicher (Tankspeicher) favorisiert. Bei bestimmten Speichergrößen können Quantitäts- und Qualitätssprünge auftreten, weil der Speicher eine signifikante Spitzenleistung zur Verfügung stellt. Diese Sprünge haben natürlich auch einen großen Einfluss auf die Kosten der Systemfindung.

### **Notkälteversorgung**

Der Einsatz von Eisspeichern sollte auch dann erfolgen, wenn die Kälteversorgung während eines Stromausfalls für einige Stunden gesichert werden muss, z. B. für die Funktionsbereiche von Fernmelde-Multi-Switching-Stationen, Fernmeldezentralen, Datenverarbeitungszentren, Reinraumtechnologien, Thermokonstanträumen, OPs in Krankenhäusern, etc.

*Beispiel:* 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.

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 Solarthermieanlage, die Wärme aufnimmt und wieder abgibt.

### 3.7.2 Eisspeichersystemvarianten

Prinzipiell ist es möglich, Kälte in Form von Kaltwasser zu speichern, wobei aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen zwischen dem Speicherwasser mit  $\leq 0^\circ\text{C}$  und der Kaltwasservorlauftemperatur von  $+6^\circ\text{C}$  die Speicherbehälter überdimensionale Abmessungen erfordern. Selbst dann, wenn die Rücklauftemperatur des Kaltwassers auf  $+15^\circ\text{C}$  angehoben würde, ergibt sich noch eine wirksame mittlere Temperaturdifferenz von  $\Delta t = 10\text{ K}$ . In Verbindung mit der spezifischen Wärme von Wasser würde sich eine Speicherkapazität von  $Q = 11,6\text{ kWh/m}^3$  ergeben. Um derartig große und schwere Wasserspeicher nicht zu errichten, ist es ratsam, hier Eisspeicher zur Kältespeicherung einzusetzen, da in diesem Fall die Schmelzwärme des Wassers noch genutzt werden kann. Über die Temperaturdifferenz hinaus kann die Schmelzwärme des Wassers mit  $93\text{ kWh/m}^3$  genutzt werden und durch diesen Effekt die spezifische Speicherkapazität erhöht werden.

Die derzeit verwendeten Techniken beschränken sich auf drei Systeme, die sich hauptsächlich durch den Wärmeübergang zur Bildung von Eis oder zum Schmelzen des Eises unterscheiden. Die Verfahrenstechnik der Eisspeichersysteme stellt sich daher als direkte und indirekte Kühlung dar.

#### 3.7.2.1 Direkte Systeme

Es gibt Systeme des positiven Übergangs und Systeme des wechselnden inneren Übergangs. Das Funktionsprinzip der direkten Systeme erfolgt nach dem Prinzip des externen Schmelzvorganges, bei dem getrennte Kreisläufe für den Lade- und Entladebetrieb verwendet werden. Der Ladevorgang erfolgt in den meisten Fällen über Direktverdampfung des Kältemittels in Rohrbündel- oder Plattenwärmeübertrager, die in einem mit Wasser gefüllten Speicher (Eisspeicher) integriert sind. Als Alternative zum Plattenverdampferprinzip bietet sich das Baudelot-Prinzip an, bei dem das Wasser über die Platten herunterfließt. Hierbei friert ein Großteil des Wassers an die Platten an und setzt sich zu Eis um. Dadurch, dass die Kälteanlage mit einer Umschaltautomatik versehen wird, wird jeweils periodisch eine Platte mit heißem Kältemittel versorgt, wodurch die angefrorene Eisscholle abspringt und in den Behälter herunterfällt. Hier wird also das Wärmepumpenprinzip angewandt, wobei gleichzeitig eine Wirkungsgraderhöhung erreicht wird.

**Vorteile:**

- sehr hohe Entladeleistungen durch direkten Wärmeübergang
- relativ niedrige, lang anhaltende, konstante Vorlauftemperaturen im Entladungsbetrieb von ca.  $1^\circ\text{C}$
- günstige Betriebskosten, da die Verdampfungstemperatur nur knapp unter dem Gefrierpunkt liegt. Mit zunehmender Eisdicke verringert sich dieser Vorteil jedoch gegen Null
- günstiger Aufbau des Kälteerzeugungssystems durch Kältemittelverrohrung ohne Zwischenträgermedium.

### Nachteile:

- aufwendige kältetechnische Verrohrung zu den Eisspeichern, dadurch große Kältemittelmengen
- Gefahr des Kältemittelverlustes; zusätzliche Be- und Entlüftung des Eisspeicherraumes
- korrosionsanfällig
- störanfällige Eisdickenmessung, daraus folgt die Gefahr der Eisblockbildung.

### 1. Systeme des positiven Übergangs

Das System des positiven Übergangs setzt sich zusammen aus einem wärmeisolierten Speicher, in der Regel aus verzinktem Stahlblech oder Beton, in dem sich Kupferrohre, korrosionsbeständige Stahlrohre oder eine Reihe metallischer Platten befinden. Die Rohre bzw. die Platten stellen den Verdampfer der Kältemaschine dar, da in ihrem Inneren flüssiges Kältemittel bei einer unter 0 °C liegenden Temperatur verdampft wird. Die äußere Oberfläche der Rohre oder Platten dient als Träger der Eisschicht, die aus dem im Behälter befindlichen Wasser ausfriert. Das Wasser des Sekundärkreises durchströmt den Behälter und kühlt sich in direktem Kontakt mit dem Eis ab. Das Speicherwasser wird zusätzlich durch Druckluft oder durch ein Rührwerk bewegt, damit sich Klareis gleichmäßig auf der Oberfläche bildet. Wenn der Verbraucherkreislauf ein Drucksystem darstellt, dann wird es notwendig, den Speicher durch einen Wärmeübertrager hydraulisch von diesem zu trennen. Bei diesem System wird der Wärmeübergang als »positiv« bezeichnet, da die Richtung des Wärmeflusses sowohl beim Laden als auch beim Entladen stets dasselbe ist. Ein zusätzlicher Nachteil besteht darin, dass die Kältemaschine nur mit schlechter Leistungszahl oder mit einem hohen Aufwand in den Tagesbetrieb überführt werden kann. Die Kältemaschine dient daher in den meisten Fällen nur zum Laden des Eisspeichers.

Bei den ältesten Systemen in der Eisspeichertechnik, die mit Rohrschlangen arbeiten, handelt es sich um klassische Eisspeicheranlagen mit Direktverdampfung. Dies bedeutet, dass das Wärmeübertragungssystem aus einem Rohrschlaufensystem besteht, welches in einem Behälter integriert ist. In den Rohren verdampft das Kältemittel und das im Behälter befindliche Wasser wird zum größten Teil in Eis umgesetzt, d. h. um die Rohre bildet sich eine Eisschicht. Die Dicke dieser Eisschicht um die Rohre hat eine wirtschaftliche Grenze. Es kostet z. B. wesentlich mehr Energie, wenn eine Eisschicht von 60 mm angefroren werden soll, als wenn diese nur 30 mm beträgt.

Zur Erstellung von technischen Eisspeicherarbeitsunterlagen ist es erforderlich die Unterschiede zwischen der Eisspeicherleistung, Abschmelzleistung und der gespeicherten Eismenge darzustellen.

Bei der Erzeugung von Eis spielt die Oberfläche des benötigten Wärmeübertragers eine wichtige Rolle. Um die gleiche Menge Eis anzufrieren, wird bei einer wirtschaftlichen Eisschicht eine zugeordnete Austauschfläche des Wärmeübertragers benötigt. Ein weiteres Kriterium für ein optimiertes Eisspeichersystem stellt die Zeiteinheit dar, in der die gespeicherte Energiemenge zur Verfügung gestellt werden soll.

## 2. Systeme mit wechselndem inneren Übergang

Bei den Systemen mit wechselnden, inneren Wärmeübergang besteht der isolierte Speicher aus Kunstharz oder aus Polyethylen. Das Innere wird von einem System dünner Rohre durchsetzt, die normalerweise aus Plastik und unter Beibehaltung von konstanten Abständen als Spirale oder Schlangen aufgebaut sind. Das Innere dieser Rohre wird von einer Mischung aus Wasser und einem Frostschutzmittel (Antifriegen, Glykol, etc.) durchströmt, das im Fall der Speicherung mit einer Kältemaschine auf eine negative Temperatur heruntergekühlt wird (analog dem Prinzip der Kühllemente für Campingkühltaschen).

Das Äußere der Rohre dient hierbei als Träger der Eisschicht, die aus dem sich im Speicher befindlichen Wasser ausfriert. Gegenüber dem System mit positivem Übergang wird hier das im Speicher befindliche Wasser nicht in den Wärmeträgerkreislauf eingebunden, sondern dient nur als Speichervolumen. Es ist in diesem Fall ebenfalls die Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel, die beim Entladen erst die Rohre durchströmt, um im Anschluss die Verbraucher mit Kaltwasser (Kälte) zu versorgen. Aus diesem Grund wird das System als »wechselnder innerer Wärmeübergang« gekennzeichnet.

### 3.7.2.2 Eisspeicher als Indirektkühlsysteme (wechselnder, äußerer Übergang)

Bei Systemen des wechselnden äußeren Übergangs wird eine Kältesole oder ein Festkörper als Zwischenmedium eingesetzt. Die indirekten Systeme bestehen aus einem geschlossenen Kreislauf, der sowohl die Ladefunktion (Eisbildung) als auch die Entladefunktion (Abschmelzen des Eises) erfüllt. Diese Bauart arbeitet stets mit Sekundärkreisläufen auf der Basis von Glykol-Wasser-Gemischen.

Dieses System besteht aus einem isolierten Speicher aus verzinktem Stahlblech oder Beton, dessen Inneres eine Vielzahl von Füllkörpern beinhaltet, die mit Wasser gefüllt sind. Diese Füllkörper stellen den Eisspeicher dar, wobei sich zwischen diesen Füllkörpern eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel befindet, das periodisch durch eine Kältemaschine auf einen negativen Temperaturwert abgekühlt wird.

Je nachdem, ob die Temperatur des Wärmeträgers negativ oder positiv ist, wird das in den Füllkörpern befindliche Wasser eingefroren oder abgeschmolzen. Dieser Wärmeträger versorgt gleichfalls direkt die Wärmeübertrager der Verbraucher, z. B. die Luftkühler innerhalb der RLT-Zentralgeräte. Bei diesem System wird der Wärmeübergang als »äußerer wechselnder« bezeichnet und er eignet sich als einziger dazu, in einen geschlossenen Druckkreislauf der Kälteerzeugung und -verteilung mit eingebunden zu werden. Bei diesem System zeigt sich der Nachteil, dass sich die Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel auf das gesamte Kältesystem verteilt. Aus diesem Grund wird häufig ein Wärmeübertrager zwischen den Kälteerzeugerkreislauf und den Verbraucherkreis geschaltet.

Die indirekten Eisspeichersysteme sind von der Installation her preiswerter, verursachen aber wesentlich höhere Betriebskosten. Entscheidend ist hier auch die Vorhaltung des größeren Platzbedarfs.

### 3.7.2.3 Hybrideisspeicher

Der Hybrideisspeicher stellt eine Kombination des direkten und des indirekten Eisspeichersystems dar. Neu an diesem Eisspeichersystem ist die gleichzeitige (hybride) Entladung des Speichers über einen Wärmeübertrager (Glykolkreislauf) und einem zusätzlichen Wasser-kreislauf. Der leistungssteigernde Wasserkreislauf entsteht dadurch, dass der Glykolkreis im Entladebetrieb rund um die Wärmeübertragerrohre bereits nach kurzer Entladezeit einen Zwischenraum erzeugt, sodass ein zweiter Wasserkreislauf aktiv werden kann. Durch das Einblasen von Luft in den Eisspeicherbehälter wird eine optimale Wärmeübertragung erreicht und damit die Leistung erhöht.

### 3.7.2.4 Binäreis-System

Bisher galten Wasser und Luft als klassische Medien für die Kälteverteilung. Wasser hat aufgrund seiner höheren Dichte und höheren Wärmekapazität den großen Vorteil, dass der Energiebedarf für die Förderung und der Platzbedarf für die Leitungen deutlich kleiner sind als bei Luft. Wo immer möglich sollte daher der zu fördernde Luftvolumenstrom auf das Minimum beschränkt bleiben, das aus anderen Gründen (Luftqualität im Raum, Hygiene) erforderlich ist. Ansonsten sollte die Kälteverteilung mit dem Medium Wasser erfolgen. Luft-Wasser-Systeme haben daher die Nur-Luft-Anlagen weitgehend verdrängt. Die am häufigsten vorkommenden Luft-Wasser-Systeme sind Induktionsanlagen und Kühldecken mit kontrollierter Lüftung.

Durch die niedrigen Temperaturspreizungen (bei Kühldecken bis herab zu 2 K) müssen gegenüber den Heizungsanlagen wesentlich höhere Wasservolumenströme gefördert werden. Dieses erfolgt auch wesentlich mehr Sorgfalt bei der Planung, Ausführung und Einregulierung von Kaltwasseranlagen.

Ein Medium mit noch wesentlich höherer Energiedichte als Wasser ist ein Gemisch aus feinsten Eiskristallen und Wasser, das bei entsprechender Zusammensetzung pumpfähig ist. Dieses Binäreis wird in speziellen Eiserzeugern hergestellt. Die Vorlauftemperatur kann hierbei sehr stabil auf dem Gefrierpunkt gehalten werden und das Verteilmedium lässt sich auch zur Kältespeicherung einsetzen. Das flüssige, speicherbare und pumpfähige Eis mit mikroskopisch kleinen Eiskristallen bietet ein breites Anwendungsspektrum.

### 3.7.3 Referenzprojekte

**Tab. 3-15:** Referenzprojekte – Anlagen mit Eisspeichersystemen (Quelle: IB-THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Anna Amalia Bibliothek in Weimar K.-H. Schmitz und Hilde Barz-Malfatti, Weimar	Kälteerzeugung mit zwei Kaltwassersätzen und integriertem Eisspeichersystem; Nutzung der Rückkühlwärme für den Sommerwärmebedarf	Teilweise thermische Bauteiltemperierung, Kalt-Entrauchungsanlage, Gebäudeautomatisation
Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf Meyer Architekten BDA, Düsseldorf	Eisspeichersysteme (CALMAC-GfKK, Typ 1190) totale Speicherkapazität: 670 kWh latente Speicherkapazität: 570 kWh Kälteleistung während der Entladezeit: 65 kW	Ent-/Ladezeit: 7 h/10 h Kaltwassertemp. 10/4 °C
Deutscher Bundestag, Spreebogen	Kältespeicher: Speicherung von winterlicher Umweltkälte zu sommerlichen Gebäudekühlung	Pflanzenöl-BHKW, stromgeführt, 400 kW <sub>el</sub> Zwei saisonale Aquifer-Energiespeicher, Absorptionskältemaschinen/Wärmepumpen, DEC-Anlagen, Photovoltaik

### 3.7.4 Wirtschaftlichkeit

In der Regel stellen sich die reinen Investitionskosten einer Eisspeicheranlage als geringfügiger Anteil der Gesamtkosten für die KlimaKälteversorgung eines Gebäudes heraus. Auf jeden Fall werden durch den Einsatz eines Eisspeichersystems die Betriebskosten entscheidend gesenkt.

Bereits während der Planungsphase sollte je nach dem Anwendungsfall, der Größe und dem Leistungsbedarf untersucht werden, welches der Systeme von der Investition, den Betriebskosten und letztendlich von der Amortisation her am günstigsten ist.

## 4.0 Beleuchtungstechnik

### 4.1 Grundlagen

Die Verbesserung der Energieeffizienz bzw. die Reduzierung des Stromverbrauchs zählt mit zur größten Aufgabe um dem bereits sichtbaren Klimawandel entgegen zu wirken. Allein im Bereich der energieeffizienten Beleuchtungsanlagen steckt ein hohes Einsparpotenzial. Die künstliche Beleuchtung stellt im Energiepass einen ökologischen Schwerpunkt dar, denn die Energiequelle des elektrischen Stroms wird im Gegensatz zu anderen Energieträgern mit 2,7-fach berechnet. Der Energiebedarf für die Kunstbeleuchtung errechnet sich aus der elektrischen Anschlussleistung und der effektiven Betriebszeit der Anlage, wobei hier auch die Aspekte der Tageslichtnutzung und Präsenzkontrolle mit einfließen. Gutes Licht innerhalb der Büros-, Verwaltungen, Betriebe, etc. erhöht das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter. Der Einsatz einer guten Beleuchtung muss aber nicht gleichzeitig eine Kostenmehrung bedeuten und konträr zur Energieeinsparung stehen. Das zentrale Leitthema sollte daher lauten: Höhere Lichtqualität mit weniger Energieaufwand.

Im Bereich der Lichttechnik wurden in den letzten Jahren markante Fortschritte erreicht. Hochmoderne Lampen und neue Leuchtmittel bieten umfangreiche Vorteile, sodass auch die Erneuerung veralteter Beleuchtungsanlagen hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Beleuchtungsqualität am Arbeitsplatz zwingend notwendig wird. Die Anforderungen an die Beleuchtungstechnologie wurden durch neue Erkenntnisse und den Einsatz moderner Kommunikations- und Informationstechnologien komplexer. Tatsache ist, dass in der Praxis die meisten der zehn bis fünfzehn Jahre alten Beleuchtungssysteme nicht mehr den neuen Vorgaben entsprechen und von der Beleuchtungsqualität sowie der Energieeffizienz her mangelhaft sind. Fakt ist auch, dass sich die Investitionskosten für eine Beleuchtungsmodernisierung nicht nur in kürzester Zeit amortisieren, sondern auch noch in mehrfacher Hinsicht bezahlt machen:

- Die Beleuchtungstechnik benötigt wesentlich geringere elektrische Anschlusswerte, wodurch letztlich der Energieaufwand erheblich reduziert wird.
- Die Ermüdung, z. B. an den Bildschirmarbeitsplätzen, wird reduziert und die Fehlerquote gesenkt.
- Das Arbeitsumfeld der Mitarbeiter wird angenehmer und die Leistungsbereitschaft gefördert.

In der Praxis lässt sich häufig ein Synergieeffekt feststellen, wenn die Maßnahmen der Energieeinsparung oder rationellen Verwendung von Energie gleichzeitig die Qualität des Raumklimas verbessern. Dies trifft nicht nur für den erhöhten Wärmeschutz mit der Folge geringeren Heizwärmeverbrauchs und behaglicher Oberflächentemperaturen oder den optimierten Sonnenschutz mit reduzierten Kühllasten und angenehmem sommerlichem Raumklima zu, sondern insbesondere auch für die Beleuchtungstechnologie.

In der Beleuchtung von Funktionsgebäuden mittels energieeffizienter Lampen, elektronischer Betriebsgeräte, optimierter Leuchten, innovativer Tageslichtplanung und abgestimmter Beleuchtungs-Kontrollsysteme steckt ein großes energetisches Einsparpotenzial.

Egal, welchen Weg der Modernisierung der Gebäudebetreiber oder Eigentümer beschreitet, wichtig ist, die Beleuchtungsaufgabe als Gesamtsystem zu betrachten und zu optimieren. Neben der Auswahl des Leuchtmittels spielen Faktoren wie die

- Sehauflage
- Leuchte
- Beleuchtungstechnologie
- Architektur
- Tageslichtnutzung

eine entscheidende Rolle.

Um in Neubauten eine möglichst optimale beleuchtungstechnische Arbeitsumgebung zu gewährleisten, müssen sich die derzeit noch standardmäßig ausgeführten Planungsabläufe ändern. Wird die technische Gebäudeausrüstung erst zu dem Zeitpunkt geplant, wenn der Entwurf des Gebäudes abgeschlossen ist, dann lassen sich in der Regel eben nur noch Kompromisslösungen realisieren, die letztlich bezogen auf die im Betrieb erzielbare Energieeffizienz negative Auswirkungen nach sich ziehen.

In der Beleuchtungstechnologie werden nachfolgende Begriffe und Einheiten definiert:

- Elektrische Leistung (P) des Leuchtmittels, d. h. der Lampe in Watt (W)
- Lichtstrom ( $\Phi$ ), die gesamte von der Lichtquelle abgegebene sichtbare Lichtleistung in Lumen = lm
- Lichtausbeute, als Maß für die Energieeffizienz des Beleuchtungssystems in Lumen/Watt
- Lichtstärke (I), als Maß für die Intensität des Lichts in einer bestimmt definierten Richtung
- Beleuchtungsstärke (E) in Lux (lx), als Lichtstrom, der auf eine bestimmte Fläche auftrifft ( $1\text{lx} = 1\text{lm/m}^2$ ).

### DIN EN 15193

Die DIN EN 15193-1:2008-03 »Energetische Bewertung von Gebäuden – Energetische Anforderungen an die Beleuchtung« (Deutsche Fassung EN 15193:2007) enthält die Berechnungsmethoden für die Abschätzung des zur Beleuchtung von Gebäuden erforderlichen Energiebedarfs und stellt numerische Indikatoren für Anforderungen an die Energie für die Beleuchtung im Hinblick auf Zertifizierungszwecke zur Verfügung. Die Norm kann sowohl für bestehende Gebäude als auch für die Planung neuer oder renovierter Gebäude verwendet werden und bietet zudem eine Referenzbasis für Zielvorstellungen für die zur Beleuchtung aufzubringende Energie. Insofern bietet die Norm eine Methodik zur Berechnung des dynamischen Energieverbrauchs für die Beleuchtung im Hinblick auf eine energetische Gesamtbewertung von Gebäuden an. Die Norm ist sowohl für bestehende als auch für die Planung neuer Gebäude sowie auf die Gebäudesanierung anwendbar. Hierbei werden die Gebäude in die nachfolgenden Kategorien unterteilt:

- Bürogebäude, Bildungsstätten, Krankenhäuser
- Hotels, Groß- und Einzelhandelsgeschäfte
- Restaurants, Sportstätten und Produktionsbetriebe.

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

Dies gilt gleichermaßen für Neubauten und Bestandsgebäude.

Die DIN EN 15193 stellt Methoden zur Ermittlung des Beleuchtungsenergiebedarfs zur Verfügung und beinhaltet sowohl eine Anleitung zur Festlegung von Grenzwerten für die Beleuchtungsenergie als auch eine Berechnungsmethodik für die Bewertung der Energiemenge, die für eine Kunstlichtversorgung eines Gebäudes notwendig ist. Der Anteil des Tageslichtes geht über den Betriebszeitfaktor der Kunstlichtbeleuchtung in die Berechnung des Energiebedarfs mit ein. In der Norm werden Maßnahmen für die Einsparung von Beleuchtungsenergie vorgeschlagen; im Anhang C und H werden zusätzlich Informationen über das Thema Tageslicht zur Verfügung gestellt.

Die Norm enthält zudem Hinweise zur getrennten Erfassung des Energieverbrauchs für die Beleuchtung, sodass die Effizienz energiesparender Maßnahmen besser überprüft werden kann. Zudem wird auch für Zertifizierungszwecke eine numerische Kenngröße für den Beleuchtungsenergiebedarf bereitgestellt. In den Berechnungen wird auch z. B. berücksichtigt, wie viel Tageslicht den einzelnen Räumen zu den Betriebszeiten zur Verfügung steht. In einem Anhang werden für die Beleuchtungsplanung auf die Praxis bezogene unterschiedliche Maßnahmen zur Reduzierung des Beleuchtungsenergiebedarfs bereitgestellt.

Die Methodik und das Format der Darstellung der Ergebnisse in der DIN EN 15193 würden den Anforderungen der Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden genügen. Diese Richtlinie wird in Deutschland durch die EnEV umgesetzt, die zur die Berechnung des Energiebedarfs für die Beleuchtungstechnik allerdings nicht auf die DIN EN 15193, sondern auf die DIN V 18599-4 Bezug nimmt, da die DIN V 18599-4 im Gegensatz zu der DIN EN 15193 zusätzlich verschiedene Verfahren zur Verfügung stellt, die die Planung einer Beleuchtungsanlage unter Beachtung einer bestimmten Beleuchtungsart und eines definierten Wartungswerts der Beleuchtungsstärke ermöglicht. Im Rahmen des öffentlich rechtlichen Nachweisverfahrens muss aus diesem Grund die DIN V 18599-4 verwendet werden.

#### 4.1.1 Energetische Anforderungen an die Beleuchtung

##### Vornorm DIN V 18599-4

Ausgabe: 2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung.

Mit der EnEV 2009 strebt die Bundesregierung eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden an. Die von der EU-Kommission erlassene Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, die in Deutschland durch die EnEV 2007 umgesetzt wurde, soll auch das Potenzial im Bereich der Licht- und Elektrotechnik unterstützend freisetzen. Die Bewertungsmethode der am 1.10.2007 in Kraft getretenen EnEV 2007 wurde hierzu gegen-

über der bisher gültigen EnEV 2002 erweitert. In der Neufassung der Verordnung der EnEV 2009 werden nun auch die Energieaufwendungen für die Gebäudeklimatisierung und Beleuchtungszwecke primärenergetisch denen der Beheizung gegenüber gestellt. Die EnEV 2009 nimmt im Bereich des Nichtwohnungsbaus auf eine neu entwickelte technische Regelsetzung Bezug, die in der Normenreihe DIN V 18599 »Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung« detailliert erläutert wird.

Das in der neuen DIN V 18588-4 (Teil 4: »Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung«) definierte Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs für Beleuchtung beschreibt nachfolgend aufgeführte Teilbereiche:

- beleuchtungstechnisch erforderliche Zonierung des Gebäudes
- Ermittlung des spezifischen Leistungsbedarfs entsprechend der Nutzung und Qualität nach den gültigen Beleuchtungsnormen DIN 5035 und DIN EN 12464
- Berücksichtigung der Tageslichtnutzung
- Berücksichtigung des Einflusses von Präsenzmeldesystemen.

Hierzu wird der spezifische elektrische Leistungsbedarf alternativ wie folgt ermittelt:

- einfach anwendbares Tabellenverfahren
- angepasstes Wirkungsgradverfahren
- fachtechnische Planung der Beleuchtungsanlage.

Die in der DIN V 18599-4 zu berücksichtigenden beleuchtungstechnischen Einflüsse umfassen die installierte Anschlussleistung des Beleuchtungssystems, die Tageslichtversorgung, Beleuchtungskontrollsystme und Nutzungsanforderungen. Das Nachweisverfahren wurde vollständig neu entwickelt, weil bisher keine geeigneten Bewertungsmodelle vorlagen. Der Geltungsbereich umfasst ausschließlich die Beleuchtung zur Erfüllung der Sehauflage in Nichtwohngebäuden, d. h. die dekorativen Beleuchtungen werden nicht berücksichtigt.

Die künstliche Beleuchtung wirkt als Wärmequelle in der thermischen Zonenbilanz. Die Wärmegewinne fließen auf monatlicher Basis in das in der DIN V 18599-2 beschriebene thermische Modell ein. In den Wintermonaten sind sie zur Herabsetzung des Heizwärmebedarfs nutzbar. Dagegen kann die künstliche Beleuchtung in den Sommermonaten zur Überhitzungsgefahr führen und somit den Energiebedarf der Kühlung vergrößern. Der Energiebedarf für Beleuchtung muss daher für Bauanträge (bei Neubauten und der umfassenden Modernisierung im Bestand) im Bereich des Nichtwohnungsbaus auf der Basis der DIN V 18599 ausgewiesen werden. Zudem wird der Energiebedarf auch als Bilanzierungsanteil im Energieausweis ausgewiesen, damit die energetische Qualität eines Gebäudes auch nach außen hin dokumentiert und eine energetische Vergleichbarkeit von Immobilien möglich wird. Die Energieausweise sind seit 1.7.2009 auch für Nichtwohngebäuden im Bestand bei der Veräußerung oder der Neuvermietung vom Gebäudeeigentümer vorzulegen. Im Bestand besteht jedoch die Wahlfreiheit zwischen einer verbrauchsdaten- und einer bedarfsbasierten Variante.

In der DIN V 18599-4 wird zudem das Nachweisverfahren zur Ermittlung des monatlichen und jährlichen Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke in Nichtwohngebäuden festgelegt. Das Verfahren umfasst die beleuchtungstechnisch erforderliche Zonierung des Gebäudes und

die Ermittlung der spezifischen elektrischen Bewertungsleistung des künstlichen Beleuchtungssystems sowie die Berücksichtigung der Tageslichtnutzung mit Einfluss der Präsenzmeldesysteme.

Der Gesetzesgeber will zukünftig nur noch Direktbeleuchtungen und Lampen zulassen, die im Vergleich so hocheffizient sind wie die stabförmigen Leuchtstofflampen. Neben den stabförmigen Leuchtstofflampen werden bereits viele weitere kompakte Entladungs- und Hochdrucklampen sowie LEDs eingesetzt, die energetisch sehr effizient sind.

Mit der DIN V 18599 lässt sich auch der langfristige Energiebedarf für Gebäude oder auch Gebäudeteile ermitteln und die Einsatzmöglichkeiten der erneuerbaren Energien für die Gebäude abschätzen. Die Methode ist für zu errichtende Gebäude sowie für bestehende Gebäude oder für Baumaßnahmen im Bestand gleichermaßen bestimmt.

Die für die Beleuchtung relevanten Teile der DIN V 18599 gliedern sich in nachfolgend aufgeführten Teile:

- Teil 1: Allgemeines, Definitionen, Bilanzierungsmethode, Zonierung, Primärenergiefaktoren, ggf. Umwelteinflüsse
- Teil 4: Endenergie Beleuchtung
- Teil 10: Randbedingungen, Nutzungen
- Teil 12: Energieausweis.

Die Zonierungs- und Verknüpfungsregeln sind im Teil 1 enthalten, die Teile 2 bis 4 beinhalten die Rechenmethoden für den Nutzbedarf der konditionierten Gebäudezonen. Die Teile 5 bis 9 behandeln den Endenergiebedarf der unterschiedlichen Anlagentechniken und Teil 10 die Randbedingungen und Standardprofile für die unterschiedlichsten Gebäudenutzungen. Die Teile können je nach Ausstattung beliebig miteinander kombiniert werden.

Das Energieeinsparpotenzial durch Tageslicht findet in einem dreistufigen Verfahren Eingang in die Bewertung. In einer ersten Stufe wird die Tageslichtversorgung von Innenräumen aufgrund der Raum- und Fassadengeometrie klima- und lageunabhängig klassifiziert. In einer zweiten Stufe wird der lichttechnische Einfluss der Fassadenbauteile berücksichtigt. Letztlich schließt sich in einer dritten Stufe die Korrelation der so klassifizierten Tageslichtversorgung mit monatlichen bzw. jährlichen klima-, lage- und nutzungsabhängigen Energiebedarfswerten für Beleuchtungszwecke an.

Die künstliche Beleuchtung wirkt als Wärmequelle in der thermischen Zonenbilanz. Die Wärmegewinne fließen auf monatlicher Basis in das in der DIN V 18599-2 beschriebene thermische Modell ein. In den Wintermonaten sind sie zur Herabsetzung des Heizwärmebedarfs nutzbar. Dagegen kann die künstliche Beleuchtung in den Sommermonaten zur Überhitzungsgefahr führen und somit den Energiebedarf der Kühlung vergrößern. Das Verfahren umfasst gegebenenfalls eine erforderliche Unterteilung in Gebäudezonen nach Beleuchtungstechnischen Berechnungsbereichen. Bei den Berechnungsbereichen, die an transparente Fassaden angrenzen, sind die tageslichtversorgten Raumbereiche in Abhängigkeit von der Fassadengeometrie zu ermitteln.

Der Endenergiebedarf für Beleuchtungszwecke wird in jedem zu betrachtenden Berechnungsbereich als Produkt aus elektrischer Anschlussleistung und einer effektiven Betriebszeit der künstlichen Beleuchtung ermittelt. Das Produkt aus elektrischer Anschlussleistung wird im Verfahren als elektrische Bewertungsleistung definiert, um dieses auch begrifflich

von der eigentlichen elektrischen Lastauslegung der Beleuchtungsstromkreise zu trennen. Die effektiven Betriebszeiten berücksichtigen, ausgehend von der Gesamtbetriebszeit der Beleuchtungsanlage, das energetische Einsparpotenzial aufgrund der Tageslichtnutzung und einer eventuellen Abwesenheit der Nutzer in den jeweils betrachteten Bereichen.

Die elektrische Bewertungsleistung kann alternativ über ein schnell anwendbares Tabellenverfahren, das im Wesentlichen über die Beleuchtung (direkt, direkt-indirekt oder indirekt), den Lampen- und Vorschaltgerätetyp und den Einfluss der Raumgeometrie parametrisiert wird, über ein angepasstes Wirkungsgradverfahren oder eine lichttechnische Fachplanung ermittelt werden.

### **DIN EN 12665**

Ausgabe: 2011-09, Licht und Beleuchtung, Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2002

Die DIN EN 12665:2002-09 »Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung« (Deutsche Fassung prEN 12665: 2009 dient als Ersatz für die DIN 5035-1:1990-06 und definiert generell die Begriffe für lichttechnische Anwendungen. Die DIN EN 12665 bietet für Planer, Errichter und Prüfer von Beleuchtungsanlagen nur eine geringe praktische Hilfestellung. Der Grund liegt darin, dass diese Norm überwiegend aus theoretischen Erläuterungen zu den lichttechnischen Begriffen und einer Fülle von Querverweisen aufgebaut ist. Die DIN EN 12665 enthält zwar Rahmenbedingungen zur Festlegung der Anforderungen an Beleuchtungsanlagen, geht jedoch andererseits im Gegensatz zur bisher geltenden DIN 5035-1 nicht auf die konkreten Anforderungen und deren Bewertung ein.

## **4.2 Energieeinsparung in der Beleuchtungstechnik**

Die neueren Entwicklungen im Bereich der Lampen und Betriebsgeräte lassen erkennen, dass sich eine erhöhte Lichtqualität bei gleichzeitiger Energieeinsparung realisieren lässt.

Mit einer im alten Stil dimensionierten, ausgeführten und betriebenen konventionellen Beleuchtungsanlage kann durch

- Einsatz moderner Spiegelrasterleuchten
- Austausch mittels T8 Lampen ( $\varnothing$  26 mm)
- Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte (EVG)
- Verwendung von T5 Lampen ( $\varnothing$  16 mm) und Cut off-EVG
- Reduzierung der Teillastverluste
- tageslichtabhängige Raumbeleuchtungssteuerung

eine Energieeinsparung bis zu 70 % erreicht werden.

### **4.2.1 Energetische Leuchten- und Lampentechnologie**

Aufgrund der innovativen Entwicklungen wurden die Lichtausbeute von Lampen sowie der Wirkungsgrad der Leuchten wesentlich verbessert. Die Möglichkeiten Energie und Kosten zu

sparen, bietet sich mit verbesserter Reflektortechnologie und Beleuchtungssystemen sowie durch den Einsatz energieoptimierter Lampen und elektronischer Betriebsgeräte an.

Mit der neuen DIN EN 12464 lassen sich teilflächenbezogene, arbeitsbereichs- oder raumbezogene Beleuchtungsanlagen konzipieren, die hohe Nutzerakzeptanz und eine individuelle Lichtgestaltung erlauben.

#### 4.2.1.1 Auswahlkriterien für Leuchten

Die Auswahlkriterien für Leuchten erstrecken sich über:

- Lichtlenkungstechnologie
- Diffusionsoptik
- Prismenoptik
- Eldacon (Electric Light Directing Array Communication)
- Pendelleuchte hybrid
- Spiegelwerfer-Leuchtsysteme
- Xenon-Leuchten.

#### 4.2.1.2 Auswahlkriterien für Lampen

Zu den energetischen Auswahlkriterien der Lampen sollte das EnergyLabel berücksichtigt werden. Der Bereich der energetisch effizienten Lampen erstreckt sich über:

- Glühlampen
  - Standardglühlampen
  - Halogenglühlampen mit Keramikbrenner CDM (Ceramic Discharge Metal Halide)
  - Niedervolt-Halogenglühlampen
  - Energiesparlampen (ESL)
- Entladungslampen
  - Kompakte Leuchtstofflampen
  - Kompakte Leuchtstofflampen mit integriertem Vorschaltgerät
  - Halogen-Metalldampflampen
  - Natriumdampf-Hochdrucklampen
- LED-Technologie.

#### Halogenglühlampen

Die Halogenglühlampen geben warmweißes, dimmbares Licht ab und verfügen durch ihr kontinuierliches Spektrum über eine optimale Farbwiedergabe. Durch die kompakte Form lässt sich das Licht sehr gut richten und eine brillante Lichtwirkung erreichen.

#### Niedervolt-Halogenglühlampen

Die Niedervolt-Halogenreflektorlampen mit Kaltlichtspiegel enthalten nur einen geringen Infrarotanteil im Lichtkegel und führen bei den beleuchteten Objekten zu einer geringen Wärmeleistung.

### Vorteile der Niedervolt-Halogenglühlampe:

- hohe Lichtausbeute, d. h. bei gleicher elektrischer Leistung ist der Wendeldraht für die Niedervoltwendel deutlich dicker als bei den Hochvoltwendeln. Dieses ermöglicht auch einen Betrieb bei höheren Temperaturen.
- brillantes Licht und hohe Farbtemperatur.

Aufgrund der ausgezeichneten optischen Eigenschaften und der kompakten Wendel eignen sich die Niedervolthalogenlampen sehr gut zum Einsatz in Reflektoren, z. B. bei der Akzentbeleuchtung.

### Vorteile der Hochvolt-Halogenglühlampe:

- Hiermit wird der direkte Einsatz von 230V-Glühlampen ermöglicht. Die höhere Lichtausbeute der Halogenglühlampe erreicht im Vergleich zu Glühlampen zudem eine längere Lebensdauer und/oder mehr Lichtstrom.
- Für den Betrieb ist kein Transformator, etc. erforderlich.

### Energiesparlampen (ESL)

Ein nennenswerter Einsatz der Energiesparlampen (ESL) bietet sich nur bei den Kleinverbrauchern und Haushalten an. Statistische Erhebungen belegen, dass im Falle eines Ersetzes sämtlicher Glühlampen (GL) durch ESL der Stromverbrauch in Deutschland um 1% reduziert werden könnte. Andererseits haben Abschätzungen ergeben, dass dieser Lampenaustausch zu einem realistischen Einsparpotenzial von 0,33 % führt, was in etwa 0,06 % des deutschen Endenergiebedarfs entspricht.

Der Begriff »Energiesparlampe« wurde ausschließlich zum Vergleich mit der Standardglühlampe eingeführt, sagt aber gleichzeitig nicht aus, dass es sich um eine besonders energieeffiziente Lampe handelt. Eine höhere Energieeinsparung lässt sich mit anderen modernen Lampen einsparen, z. B. mit den stabförmigen Leuchtstofflampen, Kompaktleuchtstofflampen mit Stecksockel, Halogen-Metalldampflampen, Natriumhochdrucklampen, etc. Dieses beinhaltet jedoch deren Einsatz in die entsprechend konstruierten Leuchten. Die ESL sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt. Hierbei handelt es sich um Kompaktleuchtstofflampen mit integriertem Vorschalt- und Zündgerät sowie Edison-Schraubsockel (E14 und E27). Aufgrund der bis zu fünffach höheren Lichtausbeute der Energiesparlampen gegenüber den Standard-Glühlampen (GL) werden in der Regel Energieeinsparungen von bis zu 70% erreicht.

Aus Tab. 4-1 ist der Vergleich der Anschlussleistung, Lichtströme sowie das Verhältnis der Lichtausbeute von GL zu ESL sowie eine Austauschzuordnung auf der Basis etwa der gleichen Lichtströme ersichtlich. Die Lichtausbeute der Glühlampen beträgt 9 bis 14 lm/W und die der ESL 40 bis 65 lm/W. Die stabförmigen Leuchtstofflampen erreichen dazu vergleichsweise bis zu 96 lm/W.

**Tab. 4-1:** Vergleich der energetischen Daten von GL und ESL (Quelle: IB-THEISS, München)

Standard-Glühlampe (GL)		Energiesparlampe (ESL)		Vergleich
Leistung (W)	Lichtstrom (lm)	Leistung (W)	Lichtstrom (lm)	ESL/GL
25	230	5	200	4,3
40	430	7	400	5,3
60	730	11	600	4,5
75	960	15	900	4,7
100	1.380	20	1.200	4,3
2 x 60	1.460	23	1.500	5,4

Vorteile von Energiesparlampen:

- Durch eine Lampe mit geringerer Leistung wird jetzt der gleiche Lichtstrom bzw. die gleiche Lichtstärke erzeugt. Insofern kann z. B. eine 12 V-50 W-50 mm-Lampe zur Akzentbeleuchtung durch ein Produkt mit beschichtetem Brenner mit nur 35 W ersetzt werden.
- Senkung der Wärmeverluste; weil die Wärmestrahlung zum Teil zum Aufheizen der Wendel verwendet wird, ist als Folge auch die Wärmeverluste, z. B. von beleuchteten Exponaten, deutlich geringer.
- erhöhte Lebensdauer; weil die Lichtausbeute der beschichteten Lampen größer ist, erreichen diese bei gleichem Lichtstrom oder gleicher Lichtstärke auch eine längere Lebensdauer.

Nachteile von Energiesparlampen:

- Keine Dimmbarkeit, d. h. bei einem Dimmversuch können an der Lampe oder am Dimmer irreparable Schäden auftreten.
- Das Licht der Energiesparlampen mit elektronischen Vorschaltgeräten ist hochfrequent moduliert und hierdurch visuell »flimmerfrei«. Die hochfrequente Modulation kann jedoch Infrarot-Übertragungssysteme (z. B. Fernbedienungen) stören.

Glühlampen enthalten keine nennenswerten Schadstoffanteile. Demgegenüber enthalten die Energiesparlampen etwa 5 mg Quecksilber und sind aus diesem Grund als Sondermüll zu entsorgen.

### Entladungslampen:

#### *Leuchtstofflampen*

Die Leuchtstofflampen zeichnen sich durch eine hohe Lichtausbeute und lange Lebensdauer aus. Die Lichtfarben dieses je nach Betriebsgerät auch dimmbaren Lampentyps sind warm-, neutral- oder tageslichtweiß. Lineare Leuchtstofflampen und kompakte Leuchtstofflampen erzeugen gleichermaßen diffuses Licht und eignen sich aus diesem Grund primär für eine gleichmäßige, wirtschaftliche Grundbeleuchtung. Für Sanierungen bzw. Modernisierungen lassen sich mit modernen Spiegelrasterleuchten in vielen Anwendungsfällen zwei Leuchtstofflampen durch eine ersetzen.

### *Hochdruck-Entladungslampen*

Hochdruck-Entladungslampen werden überwiegend im Bereich von Verkaufsstätten eingesetzt und haben ein großes Helligkeitsvermögen. Dieser Lampentyp hat zudem eine hervorragende Lichtausbeute, einen hohen Lichtstrom und eine lange Lebensdauer zu verzeichnen.

### *Halogen-Metalldampflampen*

Die modernen Halogen-Metalldampflampen mit Keramikbrennern verfügen über eine ausgewogene Farbstabilität und Farbwiedergabe sowie einen integrierten UV-Schutz.

Nachteil: Die in den Lichtfarben warmweiß, neutralweiß und tageslichtweiß erhältlichen Metalldampflampen lassen sich nicht dimmen.

### *Natriumdampf-Hochdrucklampen*

Das warmtonige Licht der Natriumdampf-Hochdrucklampen eignet sich insbesondere für Kontur, z. B. Verkaufsbereiche für Lebensmittel, Textilien und schmeichelt Hauttönen (Kosmetikverkaufsstätten, etc.).

### **Leuchtdioden (LED)**

Die Zukunft der Beleuchtungstechnik gehört unzweifelhaft den Leuchtdioden (Light Emitting Diodes), die sich mit der geringen Baugröße insbesondere durch eine sehr lange Lebensdauer auszeichnen. Die Technologie der LED hat in den letzten Jahren nicht nur rasante Fortschritte zu verzeichnen, sondern wird in ihrer Lichtqualität und Effizienz noch weitere positive Ergebnisse erzielen. Lichtausbeuten von 100lm/W – analog zur Leistung einer Halogen-Metalldampflampe – sind bald erreicht und auch höhere Werte realistisch. Die elektrische Leistung der marktreifen Hochleistungsleuchtdioden liegt derzeit bereits bei Werten zwischen 3 und 5W. Im Philips-Forschungslabor in Aachen sollen bereits LED mit Leistungen bis zu 20W existieren. Die farbigen LEDs eignen sich durch ihr hoch gesättigtes Licht ideal zum Bau von RGB-Farbymischleuchten.

Nachteil: Verglichen mit anderen Lampentypen ist der Lichtstrom jedoch noch wesentlich geringer.

Die LED funktionieren nach dem umgekehrten Prinzip der Photovoltaik und wandeln Strom direkt in Licht um. Die Hauptvorteile sind neben dem niedrigen Energieverbrauch die praktisch unbegrenzt lange Haltbarkeit von weit über 100.000 Betriebsstunden, die Robustheit sowie die geringe Wärmeabgabe. Die Farbe des Lichts hängt vom verwendeten Material ab. Seit der Entwicklung von weißen LED in den 1990er-Jahren zeichnen sich fast unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten ab. LED haben derzeit zwar noch einen geringeren Lichtstrom und damit eine geringere Energieausbeute als Leuchtstofflampen, übertreffen diese aber wegen ihres gerichteten Lichts bei der Lichtstärke in eine bestimmte Richtung. Sie sind aus diesem Grund beim Ausleuchten einzelner Bereiche oder Objekte in der Regel die energiesparendere Variante.

Der Entwicklungsstand in der LED-Technologie eröffnet im Bereich der Innenraumbeleuchtung ständig neue Einsatzmöglichkeiten. Zusätzlich erschließen sich auch neue Anwendungen, wie z. B. im Bereich der Außenbeleuchtung und als Medienfassaden.

Die LED verfügen über Vorteile, die von anderen Leuchtmitteln nur bedingt zur Verfügung gestellt werden:

- immer höhere Lichtausbeute
- mechanisch robuste und extrem kompakte Bauweise
- einfache Dimmbarkeit, lange Lebensdauer
- umfangreiche Möglichkeiten zur spektralen Anpassung.

Damit sind Möglichkeiten zur Miniaturisierung von komplexen optischen Komponenten verbunden. Beachtet werden sollte jedoch, dass an die Fachkräfte aufgrund der elektrischen, thermischen und optischen Eigenschaften bei der Ausführung der LED-Beleuchtungsvarianten besondere Anforderungen gestellt werden.

#### 4.2.1.3 EnergyLabel

Die EU-Richtlinie 98/11/EG vom 27. Januar 1998 regelte bereits die Klassifizierung von »Lampen für Haushaltsanwendungen«. Danach müssen diese Lampen bzw. deren Verpackung mit dem EnergyLabel gekennzeichnet sein, dessen Einteilung insgesamt sieben Gruppen von A bis G umfasst. Hierbei steht A für »sehr effizient« und G für »weniger effizient«. So hat z. B. eine Glühlampe mit 60W die Einstufung E und erreicht eine im Lichtstrom in etwa gleiche Energiesparlampe mit Glühlampenkolben 15W bereits die Einstufung A.

Übersicht der EU-Vorgaben (nur Richtlinien, d. h. die Gesetzbildung ist Ländersache!):

1. 2002/91/EG (16-12-2002) EPBO
2. 2005/32/EU (06-07-2005) EuP (Energy using Products)
3. 2006/32/EG (05-04-2006) Smart Metering
4. 2009/125/EG 31-10-2009) ErP (Energy related Products).

Die EU-Vorgaben: Verordnung über ErP mit Energielabel über Produkte, die elektrische Energien verbrauchen, hat die 2005/32/EU (06-07-2005) EuP (Energy using Products) abgelöst.

Die Regulierung erfolgt über die Lebensdauer und Beleuchtungsqualität nach den BAT-Ansatz (Best Available Technology) und löst mit dem EnergyLabel (Lumen/Watt) die CE-Kennzeichnung ab.

#### 4.2.1.4 Stufenweiser Auslauf der Glühlampen

Seit 1. September 2009 wird in den EU-Ländern schrittweise das Ende der Glühlampen eingeläutet. Hierbei handelt es sich um eine Verordnung der EU-Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hinblick auf die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an nicht gerichtete Haushaltlampen. Die EGV 244/09-Verordnung wurde am 18. März 2009 unter dem Titel: »Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltlampen mit ungebündeltem Licht« verabschiedet. Da die neue EU-Richtlinie sehr umfangreich ist, wird hier lediglich auf den Stufenplan zum Auslauf der Glühlampen bis 2012 hingewiesen. Die Bezeichnung »Glühlampe« ist hier als Oberbegriff zu verstehen, d. h. darunter fallen auch Halogen-Glühlampen (auch mit anderen Sockeln, wie z. B. G9/R7s). Gegenwärtig sind von dieser Aktion nur die sogenannten »nicht gerichteten Haushaltlampen für Raumbeleuchtung« und Netzspannung mit

Lichtstromwerten von 60 bis 1.200 lm betroffen. Die Reflektorlampen werden erst Ende 2009 einer Regelung unterzogen.

Die Richtlinie zum »Glühlampenverbot« definiert konkret, ab welchem Zeitpunkt die einzelnen Watt-Bereiche aus dem Handel gezogen werden müssen. Geregelt ist also der Verkauf (das in den Verkehr bringen) der Glühlampen, nicht aber deren Nutzung (Verwendung) im Haushalt. Die noch im Haushalt gelagerten Glühlampen können natürlich noch weiter betrieben werden, d.h., dass der Prozess der endgültigen letzten Glühlampen und damit das Ende der Edison-Ära gleitend erfolgt.

**Tab. 4-2:** EU-Stufenplan zum Auslauf der Glühlampen bis 2012 (Quelle: EGV 244/09)

Stufe	Auslauf ab 1. September des Jahres	Vorgabe Lichtstrom (lm) betroffener Glühlampensysteme	Vom Auslauf betroffene Watt-Bereiche konventioneller Glühlampen bzw. Halogen-Glühlampen	Noch verfügbare bekannte Watt-Bereiche von Glühlampen bzw. Halogen-Glühlampen (klar; mindestens EnergyLabel D und E)
1	2009	> 950	100 W; 150 W; 200 W sowie sämtliche Glühlampensysteme matt/siliziert 15 W bis 200 W	75 W; 60 W; 40 W; 25 W; 15 W
2	2010	> 725	75 W (hinzukommend)	60 W; 40 W; 25 W; 15 W
3	2011	> 450	60 W (hinzukommend)	40 W; 25 W; 15 W
4	2012	> 60	40 W; 25 W; 15 W (hinzukommend)	Keine (nur noch Lampen mit dem Energy-Label B und C)

**Hinweise:**

- Die Stufe 1 gilt auch für die in Haushalten weit verbreitete Halogen-Glühlampe mit Sockel R7s 300 W und 500 W. Als Ersatz für diese Lampen empfehlen sich die Typen 230 W oder 400 W (EnergyLabel C) mit nahezu gleichem Lichtstrom.
- Ausschlaggebend für das Auslaufen weiterer Typen innerhalb der Stufen 1 bis 4 ist stets der vorgegebene Lichtstromwert. Zugunsten der Übersichtlichkeit sind hier nur die Haupttypen aufgeführt.
- Der Stufenplan umfasst insgesamt sechs Stufen. Als Auslaufdaten gelten für Stufe 5 der 1. September 2013 und für Stufe 6 der 1. September 2016 (darüber hinaus ergehen weitere Vorgaben im Sortiment).

Für die einzelnen zeitlichen Stufen wurden Grenzwerte für den Lichtstrom und die Watt-Bereiche der Glühlampen festgelegt. Somit wurden bis 2012 sämtliche Glühlampenarten für die Raumbeleuchtung aus dem Handel genommen, soweit sie nicht mindestens die Klasse C aufweisen. Die Vorgabe zur Stufung auf Basis des Lichtstroms gilt auch für Halogen-Glühlampen. Anschließend gelten bis September 2016 für die restlichen klaren Glüh-

lampensysteme schärfere Effizienzvorgaben, sodass z. B. nur noch Lampen der Art mit dem EnergyLabel C zulässig sind. Die Glühlampen mit schlechterer Energieeffizienz (F und G) liegen bereits zum September 2009 aus.

## 4.3 Innovationen und Systemlösungen

### 4.3.1 Intelligente Betriebsgeräte für zeitgemäße Beleuchtungslösungen

Für Vermieter von gewerblich genutzten Gebäuden und Raumgruppen ist es schwierig im Vorhinein zu erkennen, welcher Nachmieter welche Raumnutzungsart benötigt. Um überhaupt eine Energieeinsparung zu erreichen, wurde in der Vergangenheit zur Beleuchtung der Mieteinheiten für nahezu jede Leuchtstofflampe ein eigenes, ganz bestimmtes elektronisches Vorschaltgerät (EVG) eingesetzt. In den seltensten Anwendungsfällen konnten mit nur einem EVG unterschiedliche Lampentypen in eingeschränktem Leistungsbereich betrieben werden. Vor der Entwicklung der T 15 (16 mm) Leuchtstofflampen gab es grundsätzlich pro Lampenlänge nur eine Lampenleistung. Mit Einführung der T 5-Leuchtstofflampen hat sich dieses geändert. Hier sind mindestens zwei Lampen gleicher Länge, jedoch mit unterschiedlicher Leistung vorhanden.

Ein intelligentes EVG mit Mikroprozessor erkennt dagegen die unterschiedlichen Lampentypen anhand der elektrischen Parameter, auch mit unterschiedlicher Leistung, selbstständig. Die modernen elektronischen Vorschaltgeräte arbeiten äußerst effizient und erreichen zudem die Energieklassifizierung A. Gegenüber den konventionellen Drossel-Starter-Leuchten (KVH-Leuchten) sparen die mit EVG ausgerüsteten Leuchten bis zu 30 % Energie.

Die neue Generation der EVGs mit Cut-off-Technologie schaltet nach der erfolgten Lampenzündung die Wendelheizung ab. Aufgrund der geringeren Wendelbelastung wird auch die Lampenlebensdauer erhöht. Zudem reduziert die Cut-off-Technologie die Temperatur innerhalb der Leuchte, wobei gleichzeitig der Energieverbrauch noch weiter gesenkt wird.

Eine Sicherheitsabschaltung am Lebensdauerende der Lampe (EOL-Abschaltung) verhindert zuverlässig gefährlich hohe Temperaturen innerhalb der Leuchte und beseitigt außerdem das störende Blinken der zündunwilligen alten Lampen.

### 4.3.2 Dimmbare elektronische Transformatoren für Hoch- und Niedervoltglühlampen

Im Fachhandel ist ein neuer patentierter dimmbarer elektronischer Transformator für Hoch- und Niedervolt-Glühlampen erhältlich, der sich durch nachfolgend beschriebene Vorteile auszeichnet.

Beim Dimmen bleibt der vom Netz aufgenommene Strom in etwa sinusförmig und in Phase mit der Netzspannung, hierdurch wird ein Leistungsfaktor von über 0,95 erreicht. Dieses hat zur Folge, dass zum Dimmen sowohl der Phasenanschnitt-Dimmer als auch der

Phasenabschnitt-Dimmer mit ihren erheblichen Nachteilen hinsichtlich der Netzstrom-Oberschwingungen, Verzerrungsblindleistung und des niedrigen Leistungsfaktors nicht mehr benötigt werden. Die Lampen verhalten sich beim Dimmen annähernd wie bei Ohmschen Widerständen. Aus diesem Grund ist es auch zu erwarten, dass die bisher verwendete Glühlampendimmtechnik mit den stark verzerrten, nichtsinusförmigen Netzspeisestromen, alleine wegen der auftretenden Netzrückwirkungen, in absehbarer Zukunft nicht mehr zugelassen sein wird.

### 4.3.3 Innovationen aufgrund optischer Beschichtungen

In Halogenglühlampen werden jetzt neben den metallischen Reflektionsschichten, z. B. aus Aluminium, auch noch Systeme mit zwei unterschiedlichen Beschichtungsverfahren hergestellt. Hierbei handelt es sich um Absorptionsschichten, d.h. Pigmente, die ein Teil des Spektrums absorbieren, oder um Interferenzschichten. Bei der Verwendung von Interferenzschichten werden Teile des Spektrums reflektiert. Für Halogenglühlampen lassen sich unter Verwendung der o. a. Beschichtungen folgende Effekte erzielen:

- Erhöhung der Lichtausbeute
- Änderung des Spektrums bzw. der Farbtemperatur
- verbesserte optische Eigenschaften
- Veränderung des Wärmehaushaltes, z. B. Kaltlichtspiegel für Reflektorlampen
- Infrarotreflektierende Beschichtung auf Halogenbrennern.

Neben dem Lichtstrom entsteht in einer Halogenglühlampe auch ein Anteil an Wärmestrahlung. Aufgrund der modernen Beschichtungstechnik ist es jetzt auch möglich, diese Wärmestrahlung zum Aufheizen der Wendel zu verwenden. Durch diesen Effekt wird weniger elektrische Energie benötigt und es steigt außerdem die Lichtausbeute der Lampe, die als Lumen pro Watt (lm/W) definiert wird. Die durch die Beschichtung erhöhte Lichtausbeute der Halogenglühlampe kann jetzt in den nachfolgend aufgeführten Produkteigenschaften umgesetzt werden.

### 4.3.4 Ferroelektrische Kondensatoren (FEC) zur Zündung von Halogenmetaldampf- oder Natriumhochdrucklampen

Ferroelektrische Materialien sind durch ein angelegtes elektrisches Feld polarisierbar. Im Unterschied zu den nicht ferroelektrischen Materialien bleibt hier nach der Trennung des elektrischen Feldes eine Rest-Polarisation erhalten. Bei Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) handelt es sich um die Kombination eines dielektrischen und ferroelektrischen Materials. Bei Temperaturen oberhalb von  $120^\circ\text{C}$  ist  $\text{BaTiO}_3$  stabil und verhält sich wie ein normales Dielektrikum mit einer sehr hohen Dielektrizitätskonstante. Unterhalb von  $120^\circ\text{C}$  treten allerdings strukturelle Verzerrungen auf und es kommt zu einer spontanen Polarisation, wobei das Material ferroelektrisch wird.

Für die technische Umsetzung dient  $\text{BaTiO}_3$ -Keramik als Kondensatorwerkstoff zur Herstellung der ferroelektrischen Kondensatoren (FEC). Bei den ferroelektrischen Kondensatoren wird das nichtlineare Verhalten für die Zündenergie beim Lampenstart genutzt. Der ferro-

elektrische Kondensator wird bei den hohen Temperaturen des Brenners nicht zerstört und wird aus diesem Grund auch im Lampeninneren angeordnet. Aus diesem Grund ist jetzt auch die Verwendung eines externen Zündgerätes nicht mehr erforderlich.

## 4.4 Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)

### 4.4.1 Beleuchtungssteuerung

Der Nutzen von programmierbaren Steuerungen ist in der Beleuchtungstechnologie eindeutig. Die Lichtgestaltung (Architekturbeleuchtung, Bildschirmarbeitsplatzbeleuchtung [BAP]), etc. fordert neben den Anforderungen nach flexiblem Licht, dynamischem Licht, szenischem Licht, individuellem Licht insbesondere eine Lichtplanung und Ausführung nach energetischen Lichtlösungen. Die Entscheidungskriterien für Architekten, Bauherren und Lichtplaner liegen insbesondere auch darin begründet, die Aspekte zum Energiemanagement zu berücksichtigen. Hier stellt sich stets die Frage, wie der Einsatz der Lichtsteuerungen den Energieverbrauch senken kann ohne die Beleuchtungsqualität am Arbeitsplatz und das erforderliche normgerechte Beleuchtungsniveau in Frage zu stellen. Die Lichtsteuerungen können unter zwei Gesichtspunkten zur Reduzierung der elektrischen Energie beitragen:

- Tageslichtabhängige Steuerungen reduzieren den elektrischen Energieverbrauch bei ausreichender Tageslichtversorgung.
- Nutzungsabhängige Steuerungen reduzieren das Beleuchtungsniveau bei geringeren Anforderungen an das Beleuchtungsniveau sowie in nicht genutzten Räumen.

Zum Trend in der Beleuchtungstechnologie ergibt sich die Feststellung, dass sich die zukünftigen Entwicklungen auf dem Beleuchtungssektor aus lichtgestalterischen Gründen und insbesondere aus Energiespargründen schwerpunktmäßig auf räumliche und zeitlich differenzierte Lichtanwendungen mithilfe von Lichtsteuerungen konzentrieren.

Eine entscheidende Voraussetzung liefern hierzu die rasanten Fortschritte in der Elektronik, die es ermöglichen, den wirtschaftlichen Einsatz programmierbarer Lichtsteuerungsanlagen mit hohem Bedienkomfort zu realisieren. In Zukunft werden weiterhin programmierbare Lichtsteuerungen zur Standardausrüstung in der Gebäudetechnik gehören. Im einfachsten Fall heißt dieses, dass das Licht in der gewünschten Qualität und Quantität jederzeit auf Knopfdruck abrufbar ist oder automatisch im Sinne einer »intelligenten Beleuchtungsarchitektur« zur Verfügung steht.

Die Elektronik hat zwischenzeitlich aber auch die Betriebsmittel der für die Lichtsteuerung wichtigen Lampen in der Innen- und Außenbeleuchtung revolutioniert. So gehören dimmbare elektronische Transformatoren und Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen und kompakte Leuchtstofflampen zur Standardinstallation, die natürlich mit der Lichtsteuerungsanlage direkt angeschlossen werden.

#### 4.4.1.1 Leistungselektronik

Nicht nur die Wahl des Leuchtmittels und der Leuchte, sondern auch der Einsatz der Beleuchtungskontrollsysteme senkt den Aufwand für elektrische Energie nachhaltig. Hier sollte bereits in der Vorplanungsphase der Grundsatz gelten, dass

- je mehr Tageslicht vorhanden ist, desto weniger Kunstlicht wird erforderlich
- die Beleuchtung nur aktiviert wird, wenn im Raum Personen anwesend sind.

Diese Vorgaben lassen sich mit einer tageslichtabhängigen und anwesenheitsbezogenen (Präsenzdetektion) Beleuchtungsregelung mit geringen Investitionskosten und ohne Schwierigkeiten umsetzen.

#### 4.4.1.2 Modernes Lichtmanagement

Bei der tageslichtabhängigen Beleuchtungsregelung wird das Kunstlicht aktiviert oder langsam stufenlos hinzu dosiert, wenn das Tageslichtangebot sinkt. Im Hintergrund verbirgt sich ein Lichtmanagementsystem, das den Abgleich von Tages- und Kunstlicht automatisiert. Die Komponenten dieses Lichtmanagementsystems bestehen aus dimmbaren elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) und Signalverstärkern mit Lichtsensoren, die die Helligkeit messen. Diese Licht- oder Helligkeitssensoren können im Raum, direkt an den einzelnen Arbeitsplatzleuchten oder im Außenraum installiert werden. Jeder Sensor wird entweder einer Leuchte oder einer Leuchtgruppe (bezogen auf Raumzonen) zugeordnet. Er misst die tatsächlich vorhandene Beleuchtungsstärke (bezogen auf seine Referenzfläche) und regelt im Bedarfsfall das künstliche Licht automatisch auf den voreingestellten Sollwert. Hierdurch wird das Beleuchtungsniveau im Raum konstant gehalten (Konstantlichtregelung). Bei mehreren Leuchtenachsen im Raum sollte jede Achse (Leuchtenreihe) getrennt geregelt werden, um eine optimale Tageslichtnutzung zu erreichen.

Während die Leuchten, die von den Fenstern weiter entfernt sind, in der Regel mehr Kunstlicht abgeben müssen, um das erforderliche Beleuchtungsniveau am Arbeitsplatz zu halten, können die Leuchten in fensternahen Bereichen stärker gedimmt werden und müssen daher auch weniger Kunstlicht abgeben. Mithilfe der tageslichtabhängigen Beleuchtungssteuerung lassen sich bis zu 75 % des Energiebedarfs für künstliche Raumbeleuchtung einsparen.

Eine zusätzliche Reduzierung des Energiebedarfs wird durch die Integration einer präsenzabhängigen Beleuchtungssteuerung, die jedoch in den Einzelbüros eine deutlich höhere Energieeinsparung bewirkt als in Gruppen- oder Großraumbüros. Wenn zudem innerhalb des Lichtmanagements Bewegungsmelder integriert wurden, wird die Beleuchtung eines Raumes sofort aktiviert, sobald eine Person den Raum betritt. Befindet sich dagegen diese Person nicht mehr im Raum, dann wird die künstliche Beleuchtung zeitversetzt ausgeschaltet. Mit dieser anwesenheitsabhängigen Steuerung lässt sich ein Energieeinsparpotenzial bis zu 50 % erreichen.

Technisch realisierbar sind tageslicht- und anwesenheitsabhängige Beleuchtungsregelungen sowohl über Leuchten mit eigenen Kontrollsystemen als auch über ein raumbezogenes Lichtmanagement mit DALI (herstellerübergreifend) oder die Integration in die Gebäudesystemtechnik mit KNX/EIB bzw. LON.

#### 4.4.1.3 Das DALI-Lichtmanagement

Beim Lichtsteuersystem DALI (Digital Addressable Lighting Interface) handelt es sich um ein einfaches digitales Bussystem, das aus wenigen Komponenten besteht. Die Arbeitsgemeinschaft DALI ist ein Zusammenschluss im Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie (ZVEI), der die Hersteller und Förderer von lichttechnischen DALI-Betriebsgeräten und DALI-Steuerungen angehören. Grundbaustein des DALI-Standards ist das Dali-EVG, ein digital adressierbares elektronisches Vorschaltgerät. Die Anbindung untereinander und zu einem DALI-Steuergerät erfolgt durch eine handelsübliche fünfadrige NYM-Leitung. Die Verdrahtung kann frei erfolgen. Die erforderlichen Lichtsensoren werden ebenfalls an das Steuergerät angeschlossen.

Das DALI wurde speziell auf die Anforderungen der modernen Beleuchtungstechnologien für die digitale Lichtregelung abgestimmt und steht für ein intelligentes, funktionales Lichtmanagement, das einfach anzuwenden und wirtschaftlich effizient ist. Beim DALI-System handelt es sich nicht um ein neues System, wie z. B. EIB oder LON, sondern um ein genormtes Protokoll digitaler DALI-Betriebsgeräte aus der Lichttechnik für ein raumbezogenes Lichtmanagement, das sehr flexibel und für die Elektrofachkraft ohne besondere Vorkenntnisse sofort anwendbar ist.

Option: DALI ist bei Bedarf durch Schnittstellenmodule in die übergeordnete Gebäude-systemtechnik mit EIB (European Installation Bus) oder LON (Local Operating Network) einzubinden. DALI steuert das Licht mit allen daran beteiligten DALI-Komponenten und kann jedes Gerät individuell ansprechen, z. B.

- jedes EVG, d. h. jede Leuchte gleichwertig bis zu 16 Gruppen zuordnen
- einzeln mit 16 Lichtwerten für Beleuchtungs-Inszenierungen definieren
- sämtliche EVG synchron dimmen.

Digital Addressable Lighting Interface (DALI) ist ein nach der IEC 929 (IEC-Standard; definierte, digitale Schnittstellen für Klemmen und Leitungen) genormter neuer Standard zur digitalen Steuerung von lichttechnischen Betriebsgeräten. Das System ist sowohl für die Lichtregelung in Einzelräumen als auch in Verbindung mit Gebäudemangement-Systemen geeignet, jedoch nicht für die komplexe Gebäudetechnik. Falls gewünscht, kann DALI jedoch zusätzlich über Schnittstellen in eine übergeordnete Gebäude-systemtechnik eingebunden und als kostengünstiges »Subsystem« verwendet werden.

Das DALI-System kann überall dort eingesetzt werden, wo eine Beleuchtung mit Leuchstofflampen erfolgt. Als standardisierte Kommunikationsschnittstelle ermöglicht es eine flexible und kosteneffiziente Lichtregelung, die auf individuell adressierbaren EVG's basieren, wobei die Schalt- und Dimmfunktionen über die Steuerleitung aktiviert werden. Hierdurch können Leuchten im gleichen Stromkreis unabhängig voneinander geregelt werden. Außerdem können, wenn z. B. die Benutzer (Mieter) wechseln oder eine Nutzungsänderung des Raumes erfolgt, die einzelnen Leuchten auf einfachste Weise umkonfiguriert werden, d. h. ohne eine kostenaufwändige Verkabelungsänderung. Dieses ist auch besonders vorteilhaft für den ausgedehnten Zwischenbereich von Lichtsteuerungen, in dem Bus-Systeme zu aufwendig und klassische Installationen zu unflexibel sind. Das Schalten und Dimmen lässt sich auch mit der Vorschaltgerätedressierung kombinieren, sodass verschiedene Leuchten

unabhängig voneinander über die Steuerleitung geschaltet und geregelt werden können. Das DALI-Lichtmanagement wurde daher als standardisierte Schnittstelle zur Steuerung von elektronischen Vorschaltgeräte (EVG) für Entladungslampen in Lichtsteuer- und Lichtregelanlagen von Räumen konzipiert, die über digitale Steuersignale einzeln oder in Gruppen individuell adressiert und auch angesteuert werden können.

Das DALI-Beleuchtungssystem lässt sich daher ideal in Räumen einsetzen, in denen erhöhte Anforderungen an das Lichtmanagement hinsichtlich der Funktion, des Komforts, der Lichtgestaltung bzw. der Energieeffizienz gestellt werden.

Zur Systementscheidung können nachhaltig u. a. folgende Aspekte zählen:

- Hörsäle-, Konferenz- und Seminarräume benötigen z. B. eine funktionale Beleuchtung, wobei je nach der momentanen Nutzung von Redner- und Lichtbildvorträgen unterschiedliche Beleuchtungssituationen mit einem Tastendruck abrufbar sind.
- In Multifunktionsräumen – von Hotel- und Gaststättenbetrieben – lassen sich Komfortfunktionen, z. B. das Arbeiten mit Lichtszenen, verwenden.

Besondere Lichteffekte werden dagegen in Boutiquen, Museen, Geschäftsbeleuchtung, Schaufenstern, etc., bei der Präsentation von Waren und Exponaten, benötigt.

Die Energieeinsparung spielt dagegen primär in Büro- und Arbeitsräumen, Hörsälen, Verwaltung, etc. eine entscheidende Rolle.

#### *Beispiel: Beleuchtungsniveauregelung*

Neben der Lichtgruppen- und Lichtszeneneinstellung können bei Bedarf auch diverse lichttechnische Geräteparameter definiert werden. Durch eine tages- oder jahreszeitabhängige Lichtfarbe sollen z. B. das Wohlbefinden, die Motivation und Leistungsfähigkeit der Menschen gefördert werden. Die Lichtfarbe wird hierbei elektronisch stufenlos von warmweiß bis tageslichtweiß verändert. Mithilfe der Elektronik ist schon heute ein Lichtmanagement möglich, das sowohl diesen Bedürfnissen als auch den Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz Rechnung trägt. Mit einer tageslichtabhängigen Beleuchtungssteuerung am Arbeitsplatz kann z. B. bis zu 75 % an Energie eingespart werden. Dieses wird durch den Einsatz von EVG erreicht, die schon heute in bis zu 50 % aller neuen technischen Leuchten verwendet werden.

Das menschliche Auge reagiert bei geringer Beleuchtungsstärke extrem empfindlich. Darauf werden unregelmäßige und sprunghafte Änderungen ebenso wie die lineare Veränderung der Beleuchtungsstärke in diesem Bereich als unangenehm empfunden. Aus diesem Grund erfolgt der Dimmverlauf einer DALI-Beleuchtungsanlage für das menschliche Auge absolut gleichmäßig. In 256 verschiedenen Dimmschritten (1 Datenbyte = 8 Datenbits) sowie in einer der Augenempfindlichkeit des Menschen nachempfundenen, logarithmischen Dimmkurve wird dieses realisiert. Der Benutzer kann somit nur eine gleichmäßige Veränderung des Beleuchtungsniveaus wahrnehmen.

#### 4.4.1.4 Innovationen zur Regelung von Leuchtstofflampen

##### Reduzierung der Teillastverluste

Der Wirkungsgrad jedes elektrisch betriebenen Gerätes ist lastabhängig und reduziert in der Regel mit sinkender Last auch die Energieeffizienz. In der Praxis ist es aber sehr häufig, dass die Beleuchtung im Teillastbereich betrieben wird. Untersuchungen bestätigen, dass eine regelbare Leuchte während einer jährlichen Betriebszeit von 2.800 h im Mittel lediglich zu 27 % ausgelastet ist. Aufgrund dieser Tatsache sollten unbedingt Lösungsansätze zur Teillastoptimierung angestrebt werden.

Mit der patentierten »Sensonick«-Elektronik des Herstellers Alteme Licht AG, Aarau (CH) wird der Teillasteffekt reduziert, wobei ein Teil der Lampen mit voller Leistung betrieben wird und nur die restlichen Leuchtmittel gedimmt werden. Aufgrund der intelligenten elektronischen »Sensonick« kann die Leistungsaufnahme (W) zwischen halber Lichtleistung und einem Lichtstrom von 1 % um bis zu 45 % reduziert werden. Derartige Leuchtensteuerungen lassen sich insbesondere in den modernen Büros mit großen Fensterflächen integrieren. In der Praxis lässt sich natürlich der Teillasteffekt nicht völlig unterbinden aber dennoch stark reduzieren. Nach Herstellerangaben lassen sich mit einer einzigen Leuchte mit integrierter »Sensonick«-Steuerung 200 € einsparen. Diese Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert auf einer mittleren Leistungsreduzierung von 21 W und einer jährlichen Betriebszeit von 2.772 h. Als Ergebnis können 58,2 kWh per anno eingespart werden.

##### corridorFUNCTION

Mit der in Transformatoren integrierten »corridorFUNCTION« bietet TridonicAtco eine Systemlösung für Gebäude an, in denen aus gesetzlichen Gründen Licht rund um die Uhr Pflicht ist, aber auch für Hotels, öffentliche Gebäuden oder Krankenhäuser. Kombiniert mit einem Bewegungsmelder dimmt das System sofort auf ein definiertes Lichtniveau hoch, sobald eine Person den Raum betritt. Ist niemand anwesend, sinkt die Beleuchtungsstärke ab. Neben dem voreingestellten Profil können auch individuelle Dimmwerte oder Dimmzeiten eingestellt werden.

##### ActiLume-System

Das System »ActiLume« von Philips dient der automatischen Regelung von Leuchtstofflampen. Das direkt in die Leuchte integrierte Lichtregelsystem ist in vielen Einbau-, Pendel-, Anbau- und Stehleuchten standardmäßig verfügbar. Es ermöglicht die tageslicht- und präsenzabhängige Regelung, lässt sich zudem auch manuell mit einem Taster oder einer Fernbedienung bedienen. Zudem stehen hier vorprogrammierte Funktionsarten für verschiedene Anwendungen zur Verfügung. Es lässt sich per Plug&Play einfach installieren und bietet neben angemessenen Sehbedingungen am Arbeitsplatz auch die Möglichkeit, bis zu 75 % an Energie einzusparen. Je nach An- oder Abwesenheit von Personen schaltet das System die Beleuchtung automatisch ein oder aus und regelt sie außerdem entsprechend dem einfallenden Tageslicht. Das Beleuchtungsniveau bleibt so stets gleich. Mit einem einfachen Sensordruck lässt sich das System mit vorprogrammierten Einstellungen auf Großraum- oder Einzelbüro umschalten.

Das System arbeitet mit Vorschaltgeräten und besteht aus einer Sensor- und Steuereinheit, die in einer Leuchte integriert und sofort einsatzbereit ist. Sie enthält drei Sensoren: einen Lichtsensor für die tageslichtabhängige Regelung, einen Bewegungsmelder zur Anwesenheitskontrolle und einen Infrarotempfänger für die Fernbedienung. Die Beleuchtung lässt sich außerdem manuell über einen verdrahteten Schalter mit einfacher Drucktaste oder über eine Fernbedienung steuern.

## 4.5 Gebäudeleittechnik (GLT)

Die ansteigenden Anforderungen und komplexer werdende Abläufe in der Gebäudetechnik sowie die Steuerung und Überwachung der Funktionen und Zustandsmeldungen der einzelnen Installations- und Einrichtungssysteme, wie z. B. Heizung, RLT-, Klima- und Kälte-technik, Melde- und Überwachungssysteme, Beleuchtungstechnik, Jalousiesteuерungen, Zugangskontrollen, Brandmeldesysteme, etc., erfordern die Einbeziehung sämtlicher Einzel-systeme in eine intelligente Gebäudesystemtechnik.

Mithilfe der Mikroelektronik und der Datenübertragung ist es möglich, alle erforderlichen Systemgruppen miteinander »kommunizierend« über ein gemeinsames BUS-Netz zu verbinden. Die Informationen von Sensoren, z. B. Lichtschranken, Infrarotempfänger, Helligkeits-sensoren, Präsenzmelder, Windmesser, etc.) werden über das BUS-Netz weitergeleitet. Durch geeignete Zuordnungen der Sensoren (Empfänger) und Aktoren (Schaltorgane) lassen sich die Steuerungen und Regelungen umfangreicher Funktionen programmieren.

Die BUS-Systeme vereinen höheren Beleuchtungskomfort, einfache Vernetzung von Ge-werken und Energieeinsparungen. Sämtliche elektrischen Verbraucher werden mit Spannung versorgt. Die Steuersignale werden über die BUS-Leitung gesendet: Wind- und Strahlungs-sensoren, Schalter und Infrarotsender liefern Eingangssignale, die umgewandelt und an die zu steuernden Leuchten und Jalousien gesendet werden. Mit der modernen Gebäudeauto-mation kann die optimierte Tageslichtnutzung mit den Funktionen der Gebäudehülle und -technik verknüpft werden, wobei die Gesamtenergieeffizienz erheblich ansteigt.

### 4.5.1 Objektbeispiele und Referenzprojekte

*Objektbeispiel:* Tonhalle Düsseldorf

Architekten: HPP Henrich, Petschnigg & Partner, Düsseldorf

Der von Wilhelm Kreis 1926 nach neoklassizistischem Vorbild entworfene runde Kuppelbau für ein Planetarium beherbergt heute mit seiner neuen Tonhalle den bedeutendsten Konzertsaal Düsseldorfs. Die Sanierung, die auch die Erneuerung der gesamten Gebäudetechnik umfasste, hat zu einer erheblichen Verbesserung der Beleuchtung und der Akustik geführt.

*Energiekonzept und Gebäudetechnik*

Im Zuge der Renovierung wurde neben den brandschutztechnischen Auflagen (Brandab-schnitte und Konzipierung der Flucht- und Rettungswege) auch die energetische Optimie- rung die RLT-Anlagen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden innerhalb der Zentraleinhei- ten umfangreiche Filterstufen und Wärmerückgewinnungssysteme integriert sowie die



**Abb. 4-1:** Tonhalle Düsseldorf (Quelle: Tomas Riehle, Köln)

Ventilatoren mit Direktantrieben versehen und mit Frequenzumformern ausgerüstet. In die Ansaugkammern wurden neue Schalldämpfer und innerhalb der RLT-Zentralen neue Abluftventilatoren einschließlich Schalldämpfern, Wärmerückgewinnern und adiabaten Fortluftbefeuern installiert. In den einzelnen Fortluftzonen dienen die Fortluft-Wärmeübertrager gleichzeitig zur Rückkühlung der Kältemaschine.

Die Außenluft wird im Sommer adiabat gekühlt. Diese energiesparende Kühlungsvariante erfolgt als FCKW-freie Naturlüftung auf einfachste Art und Weise durch die ohnehin abzuführende Fortluft mittels Oberflächenbefeuelter. Der Effekt: Die erzeugte Verdunstungskälte in der Fortluft wird über das Kreislaufverbundsystem zur Kühlung der Außenluft verwendet. Eine Feuchteübertragung erfolgt hier nicht. Das Befeuchtungswasser wird mit entwässertem Wasser über je eine Umkehrsmoseanlage erzeugt. Für den Entrauchungsfall wird ein Teil der RLT-Anlagen über die Zuluftsäulen zum Einbringen der Nachströmluft verwendet. Diese RLT-Anlagensysteme sind über die Schiene der Notstromversorgung gekoppelt, wobei im Entrauchungsfall die Frequenzumformer und Sicherheitseinrichtungen überbrückt werden.

**Tab. 4-3:** Referenzprojekte – Energetische Beleuchtungssysteme (Quelle: IB THEISS, München)

Projekt/Architekt	Rationelle Energietechnologien	Besonderheiten
Bürohochhaus »BS 4« der TU Braunschweig (Energie- und komfortgerechte Gebäude- sanierung)	<p>Die thermische Gebäudesimulation und Wärmebrückenanalyse hat zu folgenden Einzelmaßnahmen geführt: verbesserter Wärmeschutz, Fassadensanierung, Austausch der Verglasung sowie Austausch der PCB-haltigen Kondensatoren der Leuchtstofflampen und Sanierung der Innenbeleuchtung. Um die Wirksamkeit der einzelnen Sanierungsmaßnahmen zu erhöhen, wurde im 10. OG eine dezentrale Gebäudesystemtechnik (LON-System) installiert. Über die Gebäudeleittechnik (GLT) erfolgen neben der Stör- und Ereignismeldungen nachfolgend aufgeführte Steuerungen und Regelungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Einzelraumregelungen (Heizung)</li> <li>– Beleuchtung, Sonnen- und Blendschutz</li> <li>– Gebäudeautomatisierung (sommerliche Nachtkühlung) und Meßdatenerfassung.</li> </ul>	<p><b>Tageslicht</b> Eine Verbesserung des Tageslichtanteiles in der Innenzone wird durch transparente Innenwände, Materialien mit hohem Reflexionsvermögen sowie durch lichtlenkende Elemente, z. B. Lamellensysteme oder Lichtschwerter, erreicht.</p> <p><b>Kunstlicht</b> Mit einer Sanierung der Innenbeleuchtung inkl. Neugestaltung der Reflektionsflächen sowie einer Ausstattung nach dem Stand der Technik erfolgt neben der erheblichen Komfortanhebung insbesondere eine Reduzierung der Stromkosten um ca. 55 %.</p>
Finanzamtszentrum Aachen; Bau- und Liegenschaften NRW, Aachen pbs Architekten Gerlach, Krings, Böhning	Die mehr als 500 Büroräume und Bildschirmarbeitsplätze werden mittels geeigneter BAP-Beleuchtung in Form linearer Profilsystem ausgeleuchtet. Die sowohl direkt als auch indirekt wirkenden Pendelleuchten lenken und entblenden das Licht innerhalb der Grenzwerte des Blendungsbewertungsverfahrens (UGR).	Das System benötigt, bezogen auf eine Beleuchtungsstärke von 100 Lux, nur einen geringen Energiebedarf von 2,1 W/m <sup>2</sup> .
Capricorn Haus in Düsseldorf, Gatermann + Schossig, Köln	Das siebengeschossige Büro- und Gewerbegebäude wurde auf einem mäanderförmigen Grundriss konzipiert. Die Tageslichtlenkung in tiefere Raumzonen erfolgt über feststehende, in das Oberlicht integrierte Retrolamellen. Mit der Gebäudeautomation lassen sich die Beleuchtungs- und Verschattungstechnik sowie die Heizungs-, WRG- und Klima/Kältetechnik automatisch an jeder der 1.280 Raumachsen regeln.	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 zwei Wärmepumpen über die geothermische Energiequelle.

## 4.6 Tageslichtsysteme

Der Grad der Tageslichtnutzung in den tagsüber genutzten Räumen ist mit entscheidend für den Energiebedarf der Beleuchtung. In der Bewertung wird das Energieeinsparpotenzial durch Tageslicht in Innenräumen mit einem dreistufigen Verfahren berücksichtigt. Im einfachen Verfahren wird der Quotient aus Fenster- und Bodenflächen herangezogen. In der zweiten Stufe ist die Raum- und Fassadengeometrie zu klassifizieren und der lichttechnische Einfluss der Fassadenbauteile bzw. der Tageslichtsysteme zu berücksichtigen. In weiteren Schritten werden die Tageslichtsysteme durch neue und noch weiter zu entwickelnde Rechenmodelle berücksichtigt.

Je nach Art und Nutzung von Büro- und Verwaltungsgebäuden entfällt auf die Beleuchtung ein Anteil von ca. 20 bis 40 % des Gesamtenergieverbrauchs. Der Jahresenergiebedarf lässt sich durch optimierte Tageslichtnutzung bei verbesserter Aufenthaltsqualität wesentlich reduzieren. Gleichzeitig muss aber dafür gesorgt werden, dass ein unkontrolliert hoher Tageslichteintrag nicht zu Überhitzung und infolgedessen zu steigenden Kühllasten führt. Die technisch umsetzbaren Systemlösungen durch den Einsatz innovativer Tageslichtsysteme in Kombination mit intelligenten elektronischen Kontrollsystmen bereiten keine Schwierigkeiten.

Am effektivsten wirkt sich natürlich eine Raumbeleuchtung aus, die erst gar nicht eingeschaltet werden muss, d. h. also nur eine Tageslichtbeleuchtung. Ein Tageslichteintrag in die Raumtiefe ist bei gleichzeitigem Sonnen- und Blendschutz möglich. Die Nutzung des Tageslichts verbraucht keinerlei Energie und reduziert außerdem die Kühllast. Durch die scheibenintegrierten Lichtlenksysteme zur blendungsfreien Beleuchtung können auch tiefer gelegene Räume mit Tageslicht versorgt werden. Das Licht kann z. B. außerhalb der Sommermonate über die schräge Decke, oder Deckenspiegel in den Raum gelenkt werden.

Eine optimierte Tageslichtnutzung setzt eine gewerkeübergreifende Systemlösungen mit Lichtlenkung, Sonnenschutz, Blendschutz, Elektrotechnik und den Einsatz der Gebäudeautomatisation voraus. Die verfügbaren Systeme zur Tageslichtlenkung erlauben sowohl die Versorgung mit direktem Sonnenlicht als auch mit diffusem Tageslichtanteil. Die Einsparpotenziale zur Reduzierung des Energiebedarfs durch den Einsatz der Tageslichtsysteme können jedoch erst durch eine geeignete Steuerung und Regelung der künstlichen Beleuchtung voll ausgeschöpft werden. Die Beleuchtungselektronik bildet nicht nur für Neubauten, sondern auch für Sanierungen im Bestand eine wesentliche Komponente zum wirtschaftlichen Betrieb und zur Energieeinsparung. Zudem lassen sich bei zeitlich unterschiedlicher Belebung von Räumen sich durch den Einsatz von Präsenzmelder erhebliche Einsparpotenziale ausschöpfen. Lichtmanagementsysteme ermöglichen einen bedarfsgerechten Betrieb von Beleuchtungsanlagen für wechselnde Nutzungen und bieten neuen Komfort mit dynamischem Licht. Insofern lässt sich bei einer Beleuchtungsmodernisierungen bei gleichzeitig angehobenem Lichtkomfort eine Betriebskostenreduzierung gegenüber der Altanlage bis zu 80 % realisieren.

## Planungsgrundsätze

- So weit wie möglich natürliches Tageslicht verwenden.
- Direktes Tageslicht wird von den meisten Personen als am angenehmsten empfunden und ist zudem kostenlos. Bei großen Fensterflächen ist allerdings ein zusätzlicher Schutz, z. B. mittels Außenjalousien, Markisen, etc., erforderlich, damit es innerhalb der Nutzungsbereiche in den Sommermonaten nicht zur Überhitzung und in den Wintermonaten zu keiner zu großen Abkühlung kommt. Eine innovative Lösung bietet sich in der Lichtleittechnologie an, mit der es möglich ist, die direkte Sonnenstrahlung abzuschirmen und das Tageslicht in die Raumtiefe zu lenken.
- Nur die nach der gültigen Norm vorgegeben und ausreichenden, d. h. nicht überdimensionierten, Beleuchtungsstärken zugrunde legen. Sinnvoll ist hier auch im Falle einer flexiblen Bürogestaltung (Einzel-, Gruppenarbeitsplätze) die bereichsabhängigen Anpassung der Beleuchtungsstärken nach DIN 5035.
- Die Beleuchtung sollte auf die arbeitsrelevanten Zeiten und Betriebsteile beschränkt werden. Bewährt haben sich hier Dämmerungsschalter, Bewegungsschalter und Zeitschalter.
- Es sollten generell Lampen und Leuchten mit hohem energetischen Wirkungsgrad eingesetzt werden. Allein durch Verwendung geeigneter Reflektoren lässt sich bei gleicher Beleuchtungsleistung die erforderliche Lampenanzahl um mehr als 30% reduzieren.
- Die Effizienz der Beleuchtung kann maximiert werden, wenn die Lampen so angeordnet werden, dass sie die betreffenden Bereiche zielgerichtet und optimal ausleuchten.
- In der lichttechnischen Planungsphase sollten zugeordnete Lampengruppen zu eigenen Stromkreisen zusammengefasst werden. So können je nach Tageslicht, z. B. die Lichtbänder im Fensterbereich separat abgeschaltet werden.
- Insbesondere muss auf die regelmäßige Reinigung der Lampengehäuse und der Reflektoren geachtet werden. Insbesondere in Produktionsbetrieben mit hoher Schmutzbelastung der Raumluft kann die Lichtausbeute der Beleuchtungsanlage bereits nach 3.000 Betriebsstunden bis zu 20% abnehmen.

Bei der Planung und Ausführung von Beleuchtungsanlagen sollte möglichst viel natürliches Tageslicht genutzt werden.

Im Gebäude ersetzt die natürliche Tagesbelichtung eine künstliche Beleuchtung, die mit der hochwertigen Energieform Strom betrieben werden müsste. Der Einsatz von Tageslichtsystemen ist energetisch sehr lohnend, da Sonnenlicht 1:1 Elektrizität ersetzt. Der Wirkungsgrad ist sogar noch besser, wenn berücksichtigt wird, dass Strom ja von den Beleuchtungsgeräten gar nicht zu 100% in Licht gewandelt wird, sondern immer auch Abwärme anfällt.

Der Einsatz von Tageslicht verhindert daher auch die Überhitzung aus der Abwärme künstlicher Beleuchtung und vermindert somit Kühllasten. Zur Kühlung werden in der Regel ebenfalls strombetriebene Kompressionsmaschinen benutzt.

Tageslicht hat zudem eine positive physische und psychische Wirkung auf den Menschen. Dieser Effekt steigert wiederum die Arbeitseffektivität von Mitarbeitern.

Die Tageslichtsysteme lenken das Tageslicht in die Raumtiefen, in denen es benötigt wird, verteilen es also gleichmäßiger im Raum und machen es so gerade in Arbeitsräumen besser nutzbar. Darüber hinaus sind viele Tageslichtsysteme so konstruiert, dass sie aus dem Spektrum der einfallenden Strahlung Licht mit einem höheren kurzweligen Anteil, also mit mehr sichtbarem Licht pro Strahlungsenergie, herausselektieren. Direkte Sonneneinstrahlung mit hohem Infrarotanteil wird reflektiert, um möglichst wenig unerwünschte Wärme-gewinne zu erzielen. Einige Tageslichtsysteme sind so in der Lage, den energetisch hochwertigsten Anteil, die kurzwellige Strahlungsenergie, gezielt aus dem Strahlungsangebot herauszufiltern und für die Tätigkeiten der Nutzer verfügbar zu machen. Auf diese Weise selektieren sie aus der Sonneneinstrahlung Solarenergie mit einem höheren Exergiegehalt heraus.

Natürliches Licht wirkt sich nicht nur positiv auf das persönliche Befinden aus, sondern auch auf die Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz. Aus diesem Grund spielt das Tageslicht in der Gebäudeplanung eine große Rolle.

### **Solarpaneel zur Tageslichtnutzung für Dächer und Fassaden**

Innenliegende Räume, die auf natürlichem Weg kein Tageslicht erhalten, sind in ihrer Nutzungsmöglichkeit sehr eingeschränkt. Auch lange, dunkle Flure, die nur an den Kopfseiten mit Tageslicht versorgt werden, sind wenig reizvoll. Sie benötigen meist zusätzliche Energie für das erforderliche Kunstlicht. Lassen sich aufgrund der Lage dieser Räumlichkeiten im Gebäude keine Oberlichter oder Lichtkamine einsetzen, bestehen wenige Chancen, ihre Attraktivität durch Tageslichtbeleuchtung zu verbessern.

Mit dem sogenannten »Parans Solar Lighting« ist es nunmehr möglich, Licht bis zu einer Strecke von etwa 20 m mittels faseroptischen Kabeln zu transportieren. Dabei wird Sonnenlicht durch außen angebrachte, etwa 1 m<sup>2</sup> große Solarpaneel aufgefangen, über optische Linsen gebündelt und in ein flexibel verlegbares Glasfaserkabel eingekoppelt. Die 64 Fresnellinsen, die pro Solarpaneel benötigt werden, sind beweglich und werden dem Sonnenstand nachgeführt, um den Einfallswinkel des Lichtes zu optimieren. Innerhalb des Gebäudes wird das Licht über Beleuchtungskörper an den jeweiligen Innenraum abgegeben. Ein Solarpaneel belichtet einen Raum von 20 bis 30 m<sup>2</sup> Größe. Die Schwankungen des veränderlichen Sonnenlichtes bleiben dabei präsent. Das System ist deshalb bei Sonnen-einstrahlung besonders effektiv.

Umgesetzt wurde die Glasfaserbeleuchtung bereits in verschiedenen Großprojekten unter anderem im Museum of Technology in Malmö/Schweden, im Modehaus Viktoria Arena in Göteborg/Schweden, in der X-Ray Klinik im Hospital von Södertälje/Schweden sowie im Möbelhaus Ikea in Bilbao/Spanien.

#### **4.6.1 PCM-Tageslichtsystem**

Mit der »Solaren Umweltfassade« – bestehend aus PCM (Phase Change Material) – werden nicht nur die Gestaltungsvarianten der modernen Architektur erweitert, sondern auch die Behaglichkeitskriterien innerhalb der Räume erhöht und gleichzeitig eine Energieeffizienz erreicht. Als Teil der Fassadendämmung wandelt die PCM-Fassade die Sonnenwärme in Heizungsenergie um und sorgt zudem als lichtdurchlässige Fassadenkonstruktion für blendfreie

Arbeitsplätze, ohne Verschattungsanlage und nahezu ohne künstliche Beleuchtung. Aufgrund dieser kombinierten Systemlösung ermittelt sich eine Energiebilanz, die die Grenzwerte der EnEV klar unterbietet. Die PCM-Fassade als kombiniertes Tageslichtsystem nutzt die Sonnenenergie als Licht- und Wärmequelle und benötigt keine Energiewandler oder Energieträger. Die Räume werden aufgrund der hohen Lichttransmissionswerte ( $\tau_L$ ), gleichmäßig und blendfrei ausgeleuchtet. Die PCM-Fassade als kombiniertes Tageslichtsystem hat zudem einen guten U-Wert mit niedrigem g-Wert. Dieses hat zur Folge, dass in den Wintermonaten eine effektive Dämmung erreicht und während der Sommermonate eine Überhitzung durch die Sonne verringert wird.

### 4.6.2 Lichtregelnde Fenster

Umfangreich sind hier die Möglichkeiten, die bisher nur durch Verschattungselemente, vermeidbare Raumüberhitzung durch bessere Lösungsansätze zu ersetzen. Dazu gehören verschiedene Methoden zur Beseitigung des Wärmestaus, verlustbehaftet und auch mit aktiver Nutzung des Wärmeüberschusses. Besondere Aufmerksamkeit verdienen Forschungen zur Schaffung von Glasscheiben, die automatisch Menge und Verteilung des einfallenden Lichtes verändern. Das wird mit einem System erreicht, dessen abstandsgesteuerte Optiken die Strahlungsdurchlässigkeit (Transmission) des direkten Sonnenlichtes verändern. Ein aussichtsreiches Konzept zum Dosieren der Lichtmenge verfolgen die BASF, das Fraunhofer ISE und drei weitere Industriepartner mit dem Verbundvorhaben »The otrop 2«. Die thermotropen Schichtungen reagieren, wie erste Versuche bestätigen, bereits auf Temperaturen zwischen 20 bis 30 °C und werden undurchsichtig wie Milchglasscheiben.

Verschattungssysteme wie Verglasungen mit gaso- oder elektrochromen Schichten sind in der Entwicklung. Im Anwendungsfall der gasochromen Schichten kann durch ein Gasgemisch die solare Transmission innerhalb weniger Sekunden von 75 auf 25 % reduziert werden.

### 4.6.3 Lichttransport über größere Strecken

Die Systeme zur Tageslichtleitung gehören zu den sogenannten indirekten Lichtlenksystemen und sind in der Lage das Licht über weitere Strecken zu transportieren, als dieses mit den Tageslichtlenksystemen möglich ist. Aus diesem Grund werden die Systeme zur Tageslichtleitung dort eingesetzt, wo Licht bis zu seinem Bestimmungsort einen längeren Weg zurücklegen muss. Lichtleitende Systeme dienen in der Regel dazu, Räume zu belichten, die ansonsten ohne Tageslichtversorgung wären, z. B. dort, wo ein Fenstereinbau nicht möglich ist.

Die lichtleitenden Systeme bestehen aus einem Lichtsammler zur Lichteinkopplung, einem lichtleitenden Transportmedium sowie einer Möglichkeit der Lichtverteilung im Raum. Sonnen- oder Zenitlicht wird im Bereich der Dachfläche gesammelt und z. B. über lichtbündelnde Fresnel-Linsen in ein Rohr oder in ein Leitungsnetz eingekoppelt. Durch die Auskleidung des Rohres mit einer reflektierenden Prismenfolie wird das Licht ohne große Verluste über mehrere Meter durch das Gebäude transportiert und zum eigentlichen Lichtauslass geleitet.

Zu den lichtleitenden Systemen gehören z. B. Heliostaten, Lichtkamine oder Lightpipes (Sonnenleuchten). Lightpipes sind in der Lage, über den Lichtsampler eingekoppeltes Sonnenlicht über mehrere Meter zu transportieren, sodass der Raum direkt über das lichtdurchlässige Rohr der Sonnenleuchte belichtet werden kann.

#### **4.6.4 Sonnenschutz und Tageslichtlenkung**

Prismen werden immer häufiger in verschiedenen Ausführungen zur Tageslichtlenkung eingesetzt. Sie funktionieren nach dem Prinzip der Lichtbrechung; das heißt, der einfallende Sonnen- oder Tageslichtstrahl erfährt beim Auftreffen eine Richtungsänderung. Dadurch kann Sonnenlicht zurück reflektiert, aber diffuses Licht nahezu ungehindert hindurch gelassen werden. Das diffuse Licht wird gleichzeitig so umgelenkt, dass es über eine reflektierende Decke bis zu 8 m in die Raumtiefe transportiert wird.

Bei den meist aus hochtransparentem Acrylglas bestehenden Prismenplatten ist die nach außen liegende Seite glatt, während die Innenseite die Form rechtwinkliger Dreiecke bildet. Das Licht, das unter  $90^\circ$  auf die Hypotenuse des Dreiecks auftrifft, wird durch Totalreflexion an den Prismenflanken zurückgeworfen. Prismen sind sowohl in vertikale als auch in horizontale Flächen einsetzbar und eignen sich somit gleichermaßen zur Regulierung der Sonneneinstrahlung vor der Fassade als auch im Dachbereich, z. B. bei glasüberdeckten Atrien oder Glasdächern.

Werden Prismensysteme in eine gläserne Dachfläche integriert, vermeiden sie Blendeffekte und eine Überhitzung des Raumes, sodass nur in Einzelfällen weitere Maßnahmen zur Klimatisierung getroffen werden müssen. Bei dachintegrierten Systemen liegen Prismen meist wartungsfrei im Scheibenzwischenraum, oder sie werden als bewegliche Lamellenkonstruktion oberhalb oder unterhalb der Glasfläche integriert.

Um Prismen als optimierten transluziden Sonnenschutz einsetzen zu können, muss Sonnenlicht allerdings genau senkrecht auf die Prismenflanken auftreffen. Da die Sonne im Tages- und Jahresverlauf ihre Position jedoch dauernd verändert, führt der Prismeneinsatz nur dann zu einer optimalen Wirkung, wenn sie in Form von drehbaren Lamellen der Sonne durch elektronisch gesteuerte Antriebssysteme nachgeführt werden. Der Einsatz von Prismenlamellen ermöglicht nicht nur bedarfsgerechteren Sonnenschutz, sondern auch ein höheres Energieeinsparpotenzial. Da die Elemente im Winter parallel zum Sonneneinfall gedreht werden können, kann bei Bedarf auch eine passive Solarbeheizung der Räume erfolgen.

#### **4.6.5 Tageslichtleitung durch Heliostaten**

##### **4.6.5.1 Lichttransport mittels Spiegelsystemen**

Heliostaten sind Spiegelsysteme, die es ermöglichen, Licht mehrfach umzulenken, damit es in Bereiche gelangt, die sonst kein oder nur wenig Tageslicht erhalten. So können sie unabhängig vom Sonnenstand ausgeleuchtet werden. Die Spiegel sind bis zu  $5\text{ m}^2$  groß und werden der Sonne in zweifacher Richtung nachgeführt, da die Sonne sowohl ihren Höhen- als auch ihren Azimutwinkel ständig verändert. Eine Heliostatenanlage arbeitet allerdings

nur dann wirklich effektiv, wenn direktes Sonnenlicht zur Verfügung steht; bei bedecktem Himmel findet keine nennenswerte Lichtlenkung statt.

In der Regel werden die Heliostaten auf dem Dach integriert, um das Licht z.B. durch gebäudehohe Räume lenken zu können. Ein zweiachsig der Sonne nachgeföhrter Empfangsspiegel, leitet das einfallende Licht auf einen oder mehrere weitere Spiegel, durch die es schließlich gezielt und ohne Verluste über Fenster, Lichtschächte oder Lichtkuppeln in das Gebäude gelenkt wird.

Der Einsatz einer Heliostatenanlage verringert den Energieverbrauch und die Kosten für die Beleuchtung. Der Wartungsaufwand des Systems ist jedoch relativ hoch, da die Spiegel der Witterung ausgesetzt sind und eine exakt definierte Nachführung des Empfangsspiegels gewährleistet bleiben muss. Die Spiegelanlage ist für die Belichtung von Bürogebäuden, Schulen oder Museen genauso einsetzbar wie für Erschließungsbereiche und Lichthöfe. Für Wohnbereiche oder kleinere Bauaufgaben eignet sich aufgrund des technischen Installationsaufwandes und der Kosten primär der Einsatz von Lichtkaminen.

#### 4.6.5.2 Spiegelschacht zur Raumbelichtung im Untergeschoss

Räume, die in einem Untergeschoss liegen, benötigen Tageslicht, wenn sie langfristig oder nachträglich zu Aufenthaltszwecken genutzt werden sollen. Übliche Kellerlichtschächte bieten hierfür eher unbefriedigende Lösungen, da nur wenig Bezug zum Außenraum hergestellt werden kann und der Lichteinfall selten ausreicht. Oft muss deshalb ganztägig Kunstlicht hinzugeschaltet werden. Eine Möglichkeit zur ausreichenden Tagesbelichtung von Kellerräumen stellt der in der Schweiz produzierte sogenannte Heliobus dar.

Bei einem Heliobus handelt es sich um einen Spiegelschacht für den Lichttransport in Räume im Untergeschoss, für deren geplante Nutzung ein herkömmlicher Lichtschacht nur eine unzureichende Lichtquelle darstellen würde. Es handelt sich dabei um einen Schachteinsatz, der über seine spiegelnden Oberflächen und seine Geometrie nicht nur die einfallende Lichtmenge vergrößert; es kann über die Spiegeloberflächen auch ein Bezug zur Außenwelt hergestellt werden. Auf diese Weise lassen sich eher unattraktive und dunkle Untergeschossräume gestalterisch aufwerten und dauerhaft nutzbar machen.

#### 4.6.5.3 Lichttransport in fensterlose Räume

Bei der indirekten Umlenkung von Tageslicht, wie sie z. B. durch Heliostaten oder Lichtkamine erfolgt, wird Sonnenlicht im Bereich der Dachfläche gesammelt und mittels eines reflektierenden Rohres oder eines Leitungsnetzes durch das Gebäude zum eigentlichen Lichtauslass geleitet. Dem Prinzip der Tageslichtleitung folgend, wird das Licht über eine lichtbündelnde Linse in den sogenannten Kamin eingekoppelt und über die reflektierenden Wände im Innenrohr weitertransportiert. Das System besteht aus einer durchsichtigen Acrylglasdecke auf dem Dach, durch die das Tageslicht in eine mit einer hoch reflektierenden Schicht versehene Röhre mit 30 cm Durchmesser fällt. Üblicherweise werden die Lichtkamine dort eingesetzt, wo ein normaler Fenstereinbau nicht möglich ist oder wo vorhandenes Tageslicht nicht ausreichend vorhanden ist. Ihre Reichweite ist allerdings begrenzt: Bis zu etwa vier Metern kann Tageslicht mit nur geringem Verlust in das Gebäudeinnere geleitet werden. Lichtkamine werden bei der Montage an die vorhandene Dachneigung angepasst.

In ungewöhnlich großem Maßstab wurden Lichtkamine in Form von drei Glassäulen am Potsdamer Platz in Berlin realisiert. An deren oberstem Ende sorgt ein der Sonne nachgeführter Heliostat für den optimalen Lichteinfall. Die Lichtrohre sind mit einer speziellen hoch reflektierenden, transparenten Folie ausgekleidet. Sie sollen Tageslicht in die unter dem Platz liegenden verschiedenen Ebenen des unterirdischen Bahnhofs lenken, reichen für eine Beleuchtung jedoch allein nicht aus und müssen durch Kunstlicht ergänzt werden. In der Nacht werden die Lichtrohre durch die Einkoppelung von Kunstlicht zu leuchtenden Säulen.

#### 4.6.6 Intelligente Sonnenschutztechnologie

Mit der modernen Gebäudesystemtechnik und innovativen Antriebssystemen muss die Energieeffizienz und Intelligenz kombinierbar sein. Elektrisch betriebene Rollläden werden daher im Zusammenspiel mit intelligenten Sensoren zeitgesteuert oder witterungsgeführt aktiviert. Mit den Rolladensteuerungen und Jalousieantrieben wird mit automatischer Funksteuerung oder auf Knopfdruck Energieeinsparung, Sicherheit und Komfort realisiert. Bei Einbruch der Dunkelheit schließen die Rolläden automatisch und isolieren die Fenster zusätzlich. Insbesondere während der Heizperiode wirken die Rolläden wärmeisolierend und energiesparend. So lassen sich über die Wintermonate bis zu 12 % der Heizkosten sparen. In den Sommermonaten schließen die Jalousien bei Sonneneinstrahlung und halten die Raumtemperatur kühl.

Die Fassadensteuerung trägt zu der Verknüpfung von künstlichem und natürlichem Licht bei. Wird der Sonnenschutz bei hoher Lichteinstrahlung nach unten gefahren, dann wird im Bedarfsfall die Beleuchtungsstärke mittels der Büroleuchten nachgeregelt.

#### 4.6.7 Objektbeispiel

*Objektbeispiel:* Lichtkonzeption im Deutschen Bundestag Berlin

Beim Umbau des Reichstagsgebäudes zum Deutschen Bundestag Berlin galt es eine Symbiose aus der historischen Bausubstanz mit moderner Funktionalität herbeizuführen. Aus diesem Grund musste die Funktionalität des Objekts der Superlative auch nach völlig neuen Lichttechnischen Kriterien gestaltet werden. Der Umbau erfolgte seitens des Architekturbüros Sir Norman Forster and Partners. Primär galt es die gegenseitige Beeinflussung des Tageslichts und des Kunstlichts der Leuchstofflampen optimal und energetisch zu nutzen. Zudem erschien die ganzheitliche Betrachtung der Lichtgestaltung einschließlich der Tageslichtsysteme seitens der beauftragten Lichtplaner nicht nur in der das Gebäude überragenden gläsernen Kuppel von größter Bedeutung, sondern auch in den vier durch Glasdächer beleuchteten Fraktionssälen im Dachgeschoss.

Die Siteco-Traunreut entwickelte ein Sonnenlicht filterndes Raster, das sich speziell in Dachverglasungen integrieren lässt. Die Wirkung des Micro-Sonnenschutzrasters beruht auf der Nutzung der hervorragenden Reflexionseigenschaft eines mit Reinstaluminium bedampften Kunststoffrasters. Der Sperr- und Durchlassbereich dieses Tageslichtsystems wird durch die besondere Profilstruktur der Längs- und Querlamellen erreicht.

Das in den nach Osten bzw. Westen geneigten Glasdächern der Fraktionssäle integrierte Micro-Rastersystem erhält die Dynamik des Tageslichtes und gewährleistet zugleich eine homogene Lichtdurchflutung innerhalb der Innenraumkubatur, ohne dass es bei Sonnenschein zur Überhitzung oder zu extremen Hellzonen innerhalb der Sitzungssäle kommen kann. Aufgrund der reduzierten Einschaltzeiten der künstlichen Beleuchtung werden nicht nur die Betriebskosten verringert, sondern es erhöht sich auch die Lampenlebensdauer. Als Nebeneffekt werden auch die Energiekosten für die Klimatisierung reduziert, weil die Innenlasten durch die optimierte Beleuchtung auf ein Minimum reduziert wurden.

In den umfangreichen Büroräumen des Deutschen Bundestages sorgt die von Sir Norman Forster in Zusammenarbeit mit Siteco-Traunreut speziell für Büroräume mit Zwischendecken entwickelte Sonderrastereinbauleuchte »Berlin« für eine bildschirmarbeitsplatzgerechte und energetische Beleuchtung. In den Büroräumen mit repräsentativen Funktionen wird das durchgängige und funktionale Leuchtenkonzept durch optisch gestaltete Designvariationen ergänzt. An dem vielseitigen und ökonomischen Leuchtenkonzept ist besonders der Einsatz von Lichtsensoren in Verbindung mit den elektronischen Vorschaltgeräten (EVG-Dynamic) kennzeichnend, durch die sich das Kunstlicht automatisch an das ins Büro einfallende Tageslicht anpasst. Das Beleuchtungsniveau bleibt so bei jeder Witterungsveränderung (direkte oder diffuse Lichtverhältnisse) konstant, wodurch als positiver Nebeneffekt eine Energieeinsparung von bis zu 75 % erreicht wird.

## 4.7 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Beleuchtungsanlage wird im Wesentlichen von vier Faktoren bestimmt:

- hoher Leuchtenbetriebswirkungsgrad
- hohe Lichtausbeute und Lebensdauer
- geringe Verlustleistung des Betriebssystems
- geringer Wartungsaufwand.

Neben der richtigen Auswahl der Leuchtmittel und der Spiegeloptik (Reflektoren) wird durch den Einsatz der Beleuchtungselektronik (EVCs) und Sensoren, Präsenzmelder sowie der funktionellen Bereichsschaltung (Allgemeinzonen, Arbeitszonen, etc.) eine optimale Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsanlage erreicht.

## 5.0 Glossar

### A

#### **Abwärme**

Umfasst alle ein System verlassenden, fühlbaren und latenten Wärmeströme, einschließlich der Verluste, mit Ausnahme der erzeugten Zielergie.

#### **Adiabate (unpassierbar)**

Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung.

#### **Adsoption, lat. Adsorbere (ansaugen)**

Aufnahme von Gasen oder Dämpfen an der Oberfläche von festen Körpern als Folge starker Oberflächenaktivität der Substanz bzw. großer Molekularkräfte.

#### **Arbeitsplatzbeleuchtung**

Beleuchtung für eine spezielle Sehauflage, die zusätzlich zur Allgemeinbeleuchtung und von dieser getrennt schaltbar eingesetzt wird.

#### **Arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung**

Allgemeinbeleuchtung zur Zonierung eines Raumes, bei der die Beleuchtungsstärke im Bereich des Arbeitsplatzes erhöht ist.

### B

#### **Behaglichkeit**

Die Behaglichkeit beinhaltet die angemessene Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte, Raumluftströmung sowie die Reinheit und Geruchsfreiheit der Raumluft.

#### **Beleuchtungsstärke $\Phi$ (lx)**

Die Beleuchtungsstärke dient im Vergleich zur Leuchtdichte als eine einfacher zu handhabende Planungsgröße. Sie ist als das Verhältnis des auf eine Fläche fallenden Lichtstromes zur Größe dieser Fläche definiert.

#### **Beleuchtungswirkungsgrad**

Der Beleuchtungswirkungsgrad ist als das Verhältnis des auf die Nutzfläche fallenden Lichtstromes zur Summe der Lichtströme aller in der Beleuchtungsanlage installierter Lampen definiert.

#### **Betriebswirkungsgrad (Leuchtenwirkungsgrad)**

Der Betriebswirkungsgrad ist das Verhältnis des aus der Leuchte austretenden Lichtstroms, der unter bestimmten praktischen Bedingungen zu messen ist, zur Summe der Lichtströme

der einzelnen Lampen, wenn diese unter festgelegten Bedingungen außerhalb der Leuchte betrieben werden.

### **Blower-Door-Test**

Meßtechnik zu Leckageermittlung. Der Begriff Blower-Door-Test bzw. Luftdichtheitsmessung steht in Verbindung mit der Thermografie zur Problematik der Luftdichtheit. In den meisten Fällen können die Volumenströme über die einzelnen Trennbauteile nicht direkt bestimmt werden. Sie werden für eine bestimmte Gebäudepräparation aus den Druckdifferenzen, die messtechnisch über einzelne Gebäudebereiche erfasst werden sowie dem vom Ventilator geförderten Volumenstrom für eine bestimmte Druckdifferenz zwischen Gebäude und Umgebung berechnet.

## **C**

### **Candela I (cd)**

Candela ist die physikalische Grundgröße in der Lichttechnik, die als Einheit der Lichtstärke, von alle weiteren lichttechnischen Größen abgeleitet werden.

### **CIE-System**

Das Farbdreieck der CIE (Commission Internationale de l’Éclairage; Internationale Beleuchtungskommission), kann mathematisch jede Farbe anhand von zwei Farbwertkoordinaten bestimmen. Jeder Lampenhersteller gibt für jede Lampe diese Koordinaten an.

### **Contracting**

Mit dem »Contracting« wird ein zivilrechtlicher Vertrag umschrieben, der zwischen dem Dienstleister (Contractor) und seinem Kunden (Contractingnehmer) geschlossen wird.

### **CRF-Faktor (Contrast rendering factor)**

Der Quotient aus dem Kontrast einer Sehauftgabe bei der realen (vorhandenen) Beleuchtung und dem Kontrast einer Sehauftgabe bei vollkommener diffuser (Referenz-)Beleuchtung stellt den CRF-Wert dar. Die Sehleistung vermindert sich bei einem Wert  $< 1$ , d. h. es handelt sich dann um eine Kontrastminderung, hervorgerufen durch Lichtreflexe.

## **D**

### **DEC-Klimatechnik**

Abkürzung für »Desiccative and Evaporative Cooling«, engl. für »Kühlen durch Trocknung und Verdunstung« (solarer Absorptions-Kühlprozess).

## E

### **Energieerhaltungssatz**

Physkalisches Gesetz, nach dem Energie weder hervorgebracht noch vernichtet, sondern nur von einer Erscheinungsform in eine andere umgewandelt werden kann.

## F

### **Farbtemperatur ( $T_F$ )**

Das Kennzeichen der Lichtfarbe einer Lichtquelle ist die Farbtemperatur, deren Höhe bei Temperaturstrahlern annähernd der tatsächlichen Temperatur der Lampenwedel entspricht.

### **Farbwiedergabe**

Der allgemeine Farbwiedergabeindex ( $R_a$ ) wird hierbei als gültige Bewertungsmaßzahl angegeben.

### **Fremdenergie(-aufwand)**

Zusatzenergie für die Hilfkomponente bzw. Nebenantriebe.

## G

### **Gasentladung**

Durchgang von elektrischem Strom durch Gase und Dämpfe infolge der Erzeugung und des Transportes geladener Teilchen unter dem Einfluß einer angelegten Spannung. Die damit verbundene Abgabe elektromagnetischer Strahlung wird in fast allen Anwendungsgebieten der Beleuchtungstechnik ausgenutzt.

### **Gasentladungslampe**

Entladungslampe, bei der die Entladung in einem Gas stattfindet (z. B. Helium, Kohlenstoffdioxid, Neon, Stickstoff, Xenon).

### **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 (Gt)**

Die Gradtagszahl (Gt) stellt den Zusammenhang dar zwischen der Außenlufttemperatur zur gewünschten Raumtemperatur. Wenn es z. B. draußen kalt und innen warm ist, dann erreicht die Gradtagszahl hohe Werte. Wenn es dagegen draußen fast so warm ist wie drin-

nen, dann ist die Gradtagzahl niedrig. Analog dazubildet die Gradtagszahl (Gt) 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.

## H

### **Halogen-Metalldampflampen**

Entladungslampe, in der das Licht aus der Strahlung einer Mischung eines Metalldampfes (z. B. Quecksilber) mit Dissoziationsprodukten von Halogeniden (z. B. Indiumund, Natrium, Thallium) stammt.

### **Hybridnutzung (lat. *hybrida* = aus zwei Quellen schöpfend)**

Doppelnutzung von einzelnen Solarkomponenten oder Solarsystemen, z. B. zur gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie in Hybridsystemen. Als Hybridnutzung wird auch die Speicherung von Wärme bei gleichzeitiger Nutzung von zwei Speichermodi, z. B. in Salzkeramik-Latentspeichern, verstanden.

## I

### **Infeld**

Bei Leuchtdichtheitsbetrachtungen werden die Begrifflichkeiten von Infeld und Umfeld verwendet. Das Infeld ist hierbei weitgehendst mit der Arbeitsfläche identisch und umfasst die Sehauflage und ihre nächste Umgebung. Das Infeld wird vom Umfeld als weiterer Umgebung umschlossen.

### **Innere Energie**

Energiegehalt (thermische Energie) eines abgeschlossenen thermodynamischen Systems.

### **Interner Wärmegewinn**

Nutzbare Wärmegewinne (Beleuchtung, Maschinen, Personen, Prozesswärme, etc.), die bei bestimmungsgemäßer Nutzung eines Gebäudes auftreten.

## J

### **Joule (J)**

Internationale Maßeinheit für Energie; ersetzt die früher geläufige Einheit Kilokalorie (kcal); Umrechnung: 1 kJ = 0,239 kcal

## K

### **Kompensation**

Wenn Entladungslampen an induktive Vorschaltgeräte (KVG oder VVG) betrieben werden, liegt ein Leistungsfaktor  $< 1$  vor, d. h. es entsteht durch die Phasenverschiebung der Spannung gegenüber dem Strom ein Blindstromanteil, der das Leitungsnetz belastet. Bei größeren Anlagen wird daher von den EVUs eine Kompensation dieses Blindstromanteils durch den Einsatz von Kompensationskondensatoren verlangt.

### **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.

## L

### **Latente Wärme**

Der Begriff »latent« leitet sich aus dem lateinischen Wort »latens« ab und bedeutet »verborgen« bzw. »im Verborgenen«. Während sensible Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung fühlbar ist, bleibt die latente Wärme des Phasenüberganges 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 Wärmequelle gelieferten Nutzwärmeleistung und der dafür aufgewendeten elektrischen Leistung.

### **Lichtausbeute $\eta$ (lm/W)**

Die Lichtausbeute gibt den von einer Lampe abgegebenen Lichtstrom bezogen auf die aufgenommene Leistung, einschließlich der notwendigen Vorschaltgeräte, an.

### **Lichtsteuerung**

Lichtsteuerungssysteme ermöglichen es, die Beleuchtung eines Raumes an unterschiedliche Nutzungs- und Umgebungsbedingungen anzupassen. Jeder Nutzungssituation entspricht hierbei eine Lichtszene, d. h. ein bestimmtes Muster von Schalt- und Dimmzuständen einzelner Lastkreise. Beispiel: Abstimmung mit Tageslichtsystemen und Zuschaltung mittels Lichtsensoren der künstlichen Beleuchtung bei Änderung der Witterungsverhältnisse (bewölkter Himmel, diffuses Tageslicht).

### **Luftrate**

Luftvolumen, bezogen auf z. B. die Anzahl der Personen pro Zeiteinheit in  $\text{m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$ .

## M

### **Massa**

Eigenschaften eines Körpers, einer Änderung seines Bewegungszustands eine Widerstand entgegenzusetzen und einen anderen Körper durch Gravitationswirkung anzuziehen bzw. von einem anderen Körper angezogen zu werden; allg. ein Stück Materie (lat. *materia* = Stoff), das seine Eigenschaften bei Bewegungen mit führt.

### **Massenstrom**

Verhältnis der fortbewegten Masse zu der benötigten Zeitspanne.

### **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

### **Normnutzungsgrad**

Im Gegensatz zum Wirkungsgrad wird beim Nutzungsgrad das Verhältnis von gewonnener zu aufgewandelter Energie über einen bestimmten Zeitraum, z. B. über ein Jahr betrachtet.

### **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 Nutzelektrizität.

### **Nutzfläche $A_N$ (m<sup>2</sup>)**

festgelegt nach EnEV:  $A_N = 0,32 V_e$

## 0

### **olf (lat. Olfactus = Geruchssinn)**

Da der bisher angewandte Kohlensäuremaßstab nach Pettenkofer nur auf Personen bezogen war, jedoch das Problem des »Sick Building Syndroms« (Syndrom des krankmachenden Gebäudes) ansteht, wurde seitens Fanger das olf-System eingeführt. Diese Bewertung schließt nicht nur die Luftverunreinigung von Personen sondern auch den Raum selber und die Möblierung ein.

## P

### Planungsfaktor

Der Planungsfaktor ist als Reziprok-Wert des Verminderungsfaktors (v) definiert, d. h.

$$p = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,8} = 1,25.$$

Der Verminderungsfaktor berücksichtigt die Lampenalterung, und die Verstaubung von Lampen, Leuchten und Raumflächen.

### 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

### Quadratisches Entfernungsgesetz

Das quadratische Entfernungsgesetz besagt, dass die Beleuchtungsstärke, die durch senkrecht auf eine Ebene fallendes Licht einer punktförmigen Lichtquelle erzeugt wird, umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung zwischen der Lichtquelle und der Ebene ist.

$$E = \frac{I}{d^2}$$

### Regenerative Energie

Energieträger und -formen, die sich ständig auf natürliche Weise erneuern.

### Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte ( $U_w$ ) ist das in Prozent angegebene Partialdruckverhältnis zwischen dem herrschenden Wasserdampfdruck (e) und dem Wasserdampf-Sättigungsdruck ( $e_w$ ) in Bezug auf Wasser bei gleichem Luftdruck (p) und gleicher Temperatur (t).

### Restwärmefaktor

Der Restwärmefaktor  $I_2$  gibt an, welcher Anteil der elektrischen Leistung der Leuchte in stationärem Betrieb zur Ermittlung der Kühllast berücksichtigt werden muss.

## S

### Sommerlicher Wärmeschutz

Planerische und bauliche Maßnahmen zur Verringerung solarer Wärmeeinträge durch Fenster und andere transparente Bauteilflächen.

**T****Tageslichtquotient**

Verhältnis der durch das Tageslicht erzeugten Beleuchtungsstärke ( $E_p$ ) auf der Nutzebene eines Raumes (Horizontalebene) zur Außenbeleuchtungsstärke ( $E_a$ ) bei freiem Himmel.

**Taupunkttemperatur**

Die Temperatur, auf der die Luft abgekühlt werden muss, damit der absolute Feuchtegehalt zum maximalen Wert wird, d. h. gesättigt ist. Bei Unterschreitung des Taupunktes beginnt der Wasserdampf zu kondensieren.

**U****U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient (W/m<sup>2</sup>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****Verminderungsfaktor**

Meist 0,8, der in die Beleuchtungsstärke-Berechnung, z. B. nach dem Wirkungsgrad-Verfahren einbezogen wird, um die Leistungsminderung der Beleuchtungsanlage infolge der Alterung von Lampen und der Verschmutzung von Leuchten zu berücksichtigen.

**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 Transmissioswärmebedarf und dem Lüftungswärmebedarf; 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.

## **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 vorwärmst wird. Hierbei wird die Ablufttemperatur auf die Fortlufttemperatur abgekühlt.

## **Wärmerückgewinnungsgrad**

Maß für die Qualität der Rückgewinnung der verschiedenen Energieinhalte an Wärme und Feuchte.

## **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.



## 6.0 Literaturverzeichnis

### 6.1 Online-Berichte

Baunetzwissen-Infoline Haustechnik; Autor: Dipl.-Ing. Eric Theiß, München

1. [http://www.baunetzwissen.de/index/Heizung\\_34478.html](http://www.baunetzwissen.de/index/Heizung_34478.html)
2. [http://www.baunetzwissen.de/index/Gebaeudetechnik\\_34472.html](http://www.baunetzwissen.de/index/Gebaeudetechnik_34472.html)

BauNetz Online-Dienst GmbH & Co. KG

DOCUGroup Company – Architekten Informationssystem (AIS), Berlin

Schlüterstr. 42, 10707 Berlin

[www.baunetz.de](http://www.baunetz.de)

### 6.2 Fachbücher

Eric Theiß: *Gebäudetechnik Band 1 »Beleuchtungstechnik«*, Oldenbourg Industrieverlag, München 2000

Eric Theiß: *»Regenerative Energietechnologien«*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008

Eric Theiß: *»Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik – Energieeffiziente Systemtechnologien der Kraft- und Wärmetechnik«*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2012

### 6.3 Fachartikel

Eric Theiß: *»Energetische RLT-Klima-Kälteanlagen nach DIN V 18599-3 und Life Cycles Costs. Mehrinvestitionen amortisieren sich in kurzer Zeit«*; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 10/2008, S. 38 bis 41

Eric Theiß: *Wärmeschutz der nächsten Generation »Vakuumdämmung«*; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 11/2008, S. 4 bis 8

Eric Theiß: *»Energieeffiziente Solare Kühlung mittels Adsorptionstechnologie«*; Strobel-Verlag, 59821 Arnsberg, IKZ-Energy, Heft 1/2010, S. 106 bis 111

Eric Theiß: *Objektbericht HaWi Energietechnik GmbH, Eggenfelden: »Solare Kühlung mittels Adsorptionstechnologie«*; Gentner Verlag, Stuttgart, TGA-Fachplaner, Heft 04/2009, S. 34 bis 36

### 6.4 EnEV 2009

Text der kompletten EnEV 2009 unter: [www.enev-online.de](http://www.enev-online.de)



## 7.0 Kontaktadressen (Weiterführende Weblinks)

### 7.1 Architekten

4a Architekten GmbH  
Hallstr. 25, 70376 Stuttgart  
[www.4a-architekten.de](http://www.4a-architekten.de)

Architekturbüro Thomas Kreuzer  
Dipl.-Ing. + Dipl.-Ing. (FH)  
Tuttlinger Str. 2, 78187 Geisingen  
[www.architektur-k.de](http://www.architektur-k.de)

Conplaning GmbH  
Ingenieurbüro für Gebäudetechnik, Energietechnik, Umwelttechnik  
Eberhardtstr. 60, 89073 Ulm  
[www.conplaning.de](http://www.conplaning.de)

Festo AG & Co. KG  
Ruiter Str. 82, 73734 Esslingen  
PR-Abteilung  
Tel. (07 11) 3 47 36 18 | [www.festo.com](http://www.festo.com)

Gatermann + Schossig  
Bauplanungsgesellschaft mbH & Co. KG  
Richartzstr. 10, 50667 Köln  
[www.gatermann-schossig.de](http://www.gatermann-schossig.de)

Gewers & Pudewill  
GPAI GmbH  
Schlesische Str. 27, 10997 Berlin  
[www.gewers-pudewill.de](http://www.gewers-pudewill.de)

HaWi Energietechnik AG  
Im Gewerbepark 10, 84307 Eggenfelden  
[www.hawi-energy.com](http://www.hawi-energy.com)

HPP Henrich-Petschnigg & Partner GmbH + Co. KG  
Kaistr. 5, 40221 Düsseldorf  
[www.hpp.com](http://www.hpp.com)

KohlmayerOberst Architekten  
Olgastr. 112, 70180 Stuttgart  
[www.kohlmayer-oberst-architekten.de](http://www.kohlmayer-oberst-architekten.de)

pbb Planung + Projektsteuerung GmbH  
Pascalstr. 6, 85057 Ingolstadt  
[www.pbb.de](http://www.pbb.de)

Robert Vogel GmbH & Co. Kommanditgesellschaft  
Alsterufer 26, 20354 Hamburg  
[www.robertvogel.de](http://www.robertvogel.de)

## 7.2 Institute

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)  
Abteilung 1 – Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien  
Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching  
Tel. (0 89) 3 29 44 20 | [www.zae-bayern.de](http://www.zae-bayern.de)

Beuth Verlag GmbH  
Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin  
[www.beuth.de](http://www.beuth.de)

BINE Informationsdienst  
FIZ-Karlsruhe, Büro Bonn  
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. (0 61 96) 90 80 | [www.bafa.de](http://www.bafa.de)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Referat Öffentlichkeitsarbeit  
Stresemannstr. 128–130, 10117 Berlin  
Tel. (0 30) 18 30 50 | [www.bmu.de](http://www.bmu.de)

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
Referat Öffentlichkeitsarbeit (Förderdatenbank)  
Scharnhorststr. 34–37, 10115 Berlin  
[www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein – DKV  
Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart  
www.dkv.org

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.  
Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin  
www.din.de

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)  
Palmengartenstr. 5–9, 60325 Frankfurt am Main  
www.kfw.de

RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.  
Siegburger Str. 39, 53757 Sankt Augustin  
Tel. (02241) 16050 | www.ral-guetezeichen.de

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
www.umweltbundesamt.de

### **7.3 Vereine/Verbände**

Bundesverband für Wohnungslüftung e. V. (VFW)  
Wasserstr. 26 a, 68519 Viernheim  
Tel. (0 62 04) 7 08 66 37 | www.wohnungslueftung-ev.de

Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (FLiB)  
Wissenschafts- und Technologiepark Berlin Adlershof  
Kekuléstr. 2–4, 12489 Berlin  
Tel. (0 30) 63 92 53 94 | www.flib.de

GRE – Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e. V.  
Gottschalkstr. 28 a, 34127 Kassel  
Tel. (0 18 05) 34 12 73 | www.gre-online.de

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI)  
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf  
www.vdi.de

## 7.4 Produkt- und Systemhersteller

Vinzenz Albring

Albring Technische Beratung [zum Mycom-Adsorber]

Im Schelmböhl 71, 64665 Alsbach-Hähnlein

Tel. (0657) 64187 | [www.albring-gmbh.de](http://www.albring-gmbh.de)

Alteme Licht AG

Gysulastr. 21a, 5000 Aarau (CH)

Tel. +41 (62832) 8000 | [www.alteme.ch](http://www.alteme.ch)

GEA Air Treatment GmbH

Südstr. 48, 44625 Herne

Tel. (02325) 46800 | [www.gea-airtreatment.com](http://www.gea-airtreatment.com)

Kampmann GmbH

Friedrich-Ebert-Str. 128–130, 49811 Lingen (Ems)

[www.kampmann.de](http://www.kampmann.de)

LTG Aktiengesellschaft

Grenzstr. 7, 70435 Stuttgart

[www.ltg-ag.de](http://www.ltg-ag.de)

SolarNext AG

Theodor-Sanne-Str. 6, 83233 Bernau am Chiemsee

[www.solarnext.de](http://www.solarnext.de)

TROX GmbH

Heinrich-Trox-Platz, 47504 Neukirchen-Vluyn

[www.trox.de](http://www.trox.de)

## 7.5 Sonstige Informationsquellen und Weblinks

Anbieterverzeichnis für Luftdichtigkeitsmessungen:

[www.blowerdoor.de/de/messteams/suche-messteam.html](http://www.blowerdoor.de/de/messteams/suche-messteam.html)

BauNetz Media GmbH

Schlüterstr. 42, 10707 Berlin

[www.baunetz.de](http://www.baunetz.de)

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

Chausseestr. 128a, 10115 Berlin

[www.dena.de](http://www.dena.de)

# 8.0 Stichwortverzeichnis

## A

Absorptionskältemaschine 145  
adiabate Verdunstungskühlung 125  
Adsorptionskälteprozess 151  
Amortisationszeit 57  
Anergie 29

## B

BACnet (Building Automation and Control Network) 49  
Behaglichkeitsskriterium 27  
Beleuchtungsniveauregelung 198  
Beleuchtungstechnik 181  
Betonkernaktivierung 37  
Binäres 179  
Blendschutz 203  
Blower-Door-Messung 22

## C

chemische Wärmepumpe 167  
Contracting 50  
Cut-off-Technologie 193

## D

Dämmstandard 37  
Dampfbefeuchtung 82  
DEC-Klimatisierung 155  
Digital Addressable Lighting Interface (DALI) 197

## E

Eisspeicheranlage 172  
Eisspeichersystem 176  
elektronisches Vorschaltgerät (EVG) 193  
energooptimiertes Bauen (EnOB) 28  
Energiesparlampe (ESL) 188  
Energiesparmotor 82, 91  
Energiespeicherung 31  
EnergyLabel 187  
Enthalpiesteuerung 99  
Enthalpiewärmeübertrager 82  
Ethernet 46, 47  
European Installation Bus (EIB) 47  
EUROVENT-Zertifizierung 85  
Energie 29

## F

Facility-Management (FM) 136  
Facility-Management-System 42  
Feldbussystem 46  
freie Lüftung 41

Frequenzumrichterbetrieb (FU-Betrieb) 81

Fresnelkollektor 145

## G

Gebäudeautomation (GA) 42, 49  
Gebäudeleittechnik 46  
Green-Building-Bau 28

## H

Halogenglühlampe 187  
Halogen-Metalldampflampe 190  
Heat-Pipe-Wärmerückgewinnung 128  
Heliostatenanlage 207  
Hochdruck-Entladungslampe 190  
Hybrideisspeicher 179  
hybride Raumlufttechnik 137

## I

Inspektion 89

## K

Kältespeicherung 179  
Kaltwasserhydraulik 88  
KNX Association 46  
kontrollierte Wohnungslüftung (KWL) 109

## L

Latentwärmespeicher 32  
Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs) 23  
Leuchtdiode (Light Emitting Diode) 190  
Leuchtstofflampe 189  
Lichtkamin 208  
Lichtlenkung 203  
Lichtmanagementsystem 196, 203  
Lichtsteuersystem 197  
Local Area Network (LAN) 48  
Lokal Operierendes Netzwerk (LON) 47  
LowEx-Gebäude 29  
Luftkanal-Erdwärmeübertragung (L-EWÜ) 125, 126  
Luftqualitätsregelung 98  
Lüftungswärmebedarf ( $Q_L$ ) 23

## N

Nachtlüftung 40  
Natriumdampf-Hochdrucklampe 190  
Niedrigenergiegebäude 26

## O

opake Wärmedämmung 31  
OxyCell-Technology 138

**P**

- passive Kühlung 39  
 Passivenergiehaus 37  
 Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) 32  
 Präsenzsteuerung 97  
 Prismensystem 207  
 Profibus 46  
 Pull-Push-Wärmerückgewinner 129

**R**

- Rankine-Prozess 166  
 raumlufttechnische Anlagenoptimierung (RLT) 90, 91  
 Rentabilität 57  
 Rotationswärmeübertrager 99  
 Rückwärmeszahl 124

**S**

- schaltbare Wärmedämmung (SWD) 34  
 SFP-Wert (Specific Fan Power) 84  
 Solararchitektur 28  
 solare Kälteerzeugung (Solar Cooling) 143  
 sorlastgestützte sorptive Klimatisierung (SSGK-Anlage) 155  
 Solarpaneel 205  
 sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) 155  
 Sorptionsrad 160  
 Sorptionsregenerator 116  
 Speicherplattenwärmerückgewinner 124  
 Spiegelschacht 208  
 Stack-Effekt 41  
 Strahlungskühlung 36

**T**

- Tageslichtbeleuchtung 203  
 Tageslichtlenkung 207  
 Tageslichtnutzung 203  
 Tageslichtsystem 203  
 thermische Behaglichkeit 97  
 Thermografie 22

**U**

- Umschaltregenerator 122

**V**

- Vakuumdämmssystem 33  
 Vakuumisolationspaneel (VIP) 33  
 Variable-Volumen-System (VVS-System) 93  
 Ventilatorenaustausch 80  
 VRF-System (Variable Refrigerant Flow) 136  
 VRF-Technologie 136  
 VRV-Invertersystem 135  
 Vuilleumier-Prozess 166

**W**

- Wärmerückgewinnung 82, 83  
 Wartung 89  
 Wäscherbefeuertung 82  
 Wechselspeicheranlage 122  
 Wirtschaftlichkeitsberechnung 55

# Rationelle Energieanwendungen in der Gebäudetechnik

## Energieeffiziente Systemtechnologien der Raumluft-, Klima-, Kälte- und Beleuchtungstechnik

### Anlagenkonzepte, Anwendungen und Praxistipps

Aufgrund der steigenden Energiepreise und knapper werdenden Ressourcen müssen bestehende, energieintensive Systeme der Raumluft-, Klima-, Kälte- und Beleuchtungstechnik überdacht und innovative Lösungsansätze entwickelt werden.

Der Autor beschreibt Funktionsprinzipien und Nutzungsvarianten von rationellen Umwandlungstechnologien aber beschäftigt sich auch mit Innovationen und Prototypen aus diesem Bereich. Auch die Optimierung der Energieeffizienz und die Steigerung des Nutzerkomforts mit Hilfe der Gebäudeautomation werden vom Autor erläutert. Mit Blick auf die aktuellen Regelwerke, Verordnungen und Richtlinien werden die charakteristischen Parameter beleuchtet und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen angestellt. Zur Veranschaulichung sind für jede Technologie mögliche Systemintegrationen aufgeführt, die anhand von Anlagenbeispielen und Objektbeschreibungen erläutert werden.

Ein Glossar und die wichtigsten Kontaktadressen runden das Fachbuch ab und machen es so zum idealen Ratgeber für Architekten, Bauherren, Investoren, Fachingenieure, Energieberater und Studierende.

#### Der Autor:

Dipl.-Ing. Eric Theiß 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-, Klinik-, 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.

