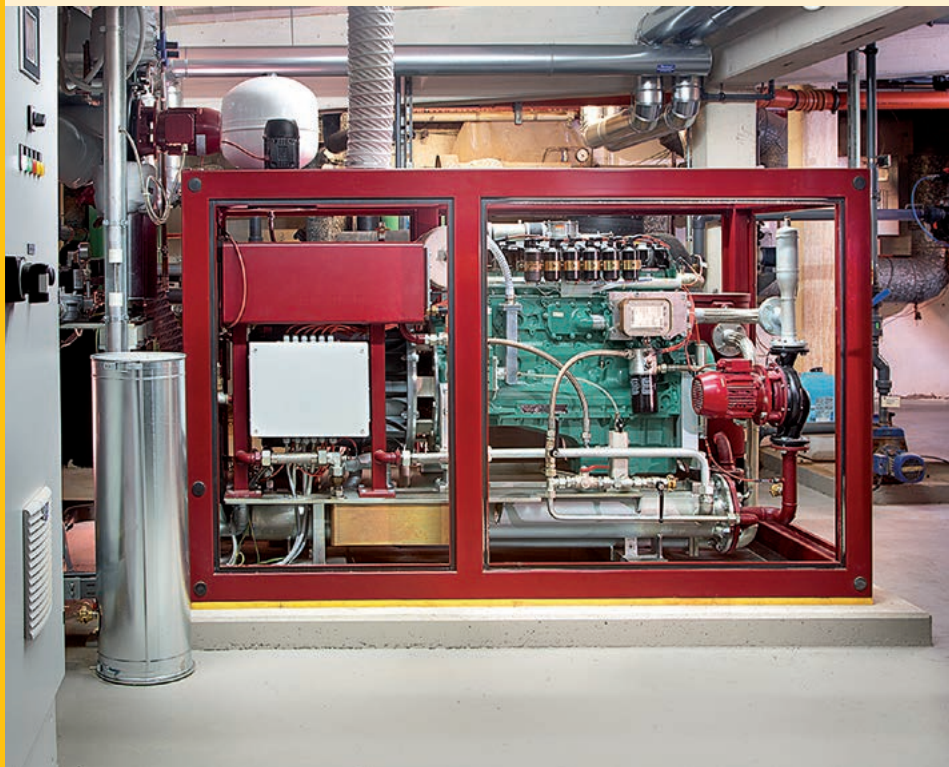


Wolfgang Suttor

Blockheizkraftwerke

Ein Leitfaden für den Anwender

8., überarbeitete Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

 **BINE**
Informationsdienst

BINE-Fachbuch

Wolfgang Suttor

Blockheizkraftwerke

BINE-Fachbuch

Blockheizkraftwerke

Ein Leitfaden für den Anwender

8., überarbeitete Auflage

Der Autor:

Wolfgang Suttor

Herausgeber



Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  Verlag



BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungsweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe GmbH und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Uwe Friedrich (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe GmbH, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 9 23 79-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9303-8 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-9304-5

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Angelika Schmid
Satz: Fotosatz Buck, Kumhausen | Druck: Gulde Druck GmbH & Co. KG, Tübingen

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelbild: Jürgen Escher, COMUNA-metall Vorrichtungs- und Maschinenbau GmbH

Umschlagrückseite: Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft mbH (links); Fraunhofer UMSICHT (Mitte); TU München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (rechts)

© FIZ Karlsruhe GmbH, 2014

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Vorwort | 9 |
| 1 Energiepolitische Zielsetzung und Rahmenbedingungen | 11 |
| 1.1 Energieeinsparung, Klimaschutz und Perspektiven | 12 |
| 1.2 Energiewirtschaft im Umbruch | 15 |
| 1.2.1 Vorräte, Verfügbarkeit und Verteilung von Energieträgern | 15 |
| 1.2.2 Erzeuger, Verbraucher, Prosumer. | 16 |
| 1.2.3 Strompreise, Stromkosten, Einspeisevergütungen | 16 |
| 1.2.4 Steuerungsmechanismen der Politik | 19 |
| 1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen. | 20 |
| 1.3.1 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) | 22 |
| 1.3.2 Ökosteuer (Strom- und Energiesteuer) | 22 |
| 1.3.3 Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft- Wärme-Kopplung (KWK-Gesetz [7]) | 23 |
| 1.3.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) | 25 |
| 1.3.5 Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz – (EEWärmeG) | 27 |
| 1.3.6 Energieeinsparverordnung (EnEV) | 27 |
| 1.3.7 Sonstige Gesetze und Regelwerke | 27 |
| 1.4 Förderprogramme. | 29 |
| 1.5 Forschungsförderung | 31 |
| 1.5.1 Das E-Energy Programm: Smart Grids made in Germany. | 31 |
| 1.5.2 Weitere Projekte der Bundesenergieforschung | 31 |
| 1.5.3 Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze (EnEff:Wärme) | 33 |
| 1.6 Hemmnisse. | 34 |
| 2 Von der KWK zum BHKW | 37 |
| 2.1 Die Grundidee der Kraft-Wärme-Kopplung | 37 |
| 2.2 KWK-Techniken | 40 |
| 2.2.1 Kleinanlagen von 50 kW _{el} bis 2 MW _{el} und Großanlagen über 2 MW _{el} | 40 |
| 2.2.2 Kleinstanlagen unter 50 kW _{el} | 45 |
| 2.3 Kältetechnologien | 50 |
| 2.4 Speichertechnologien | 51 |
| 2.4.1 Stromverbrauchsoptimierte Betriebsweise. | 51 |
| 2.4.2 Strompreis- und stromvergütungsoptimierte Betriebsweise | 51 |
| 2.4.3 Überregionale Power-to-Gas Speicherung | 51 |
| 3 Auslegung, Einsatzbereiche und Umweltauswirkungen | 53 |
| 3.1 Auslegung | 53 |
| 3.1.1 Mehrfamilienhäuser, Gewerbe und Industrie. | 53 |
| 3.1.2 Einfamilienhäuser | 56 |
| 3.1.3 Einsatz eines Pufferspeichers. | 57 |
| 3.2 Zukünftige Einsatzbedingungen für die KWK | 58 |
| 3.3 Umweltauswirkungen. | 59 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4 | BHKW-Technik | 61 |
| 4.1 | Definition | 61 |
| 4.2 | Bewertungskriterien | 62 |
| 4.3 | Flächenbedarf und Gewicht | 63 |
| 4.4 | Anlagenkomponenten | 65 |
| 4.4.1 | Motoren | 65 |
| 4.4.2 | Generatoren | 66 |
| 4.4.3 | Steuerungstechnik | 67 |
| 4.4.4 | Abgastechnik | 68 |
| 4.4.5 | Schallschutztechnik | 71 |
| 4.5 | BHKW-Integration | 72 |
| 4.5.1 | Hydraulische Einbindung | 72 |
| 4.5.2 | Steuer- und regelungstechnische Einbindung | 75 |
| 4.6 | Wartungs- und Überwachungskonzepte | 76 |
| 4.6.1 | Vollwartung | 76 |
| 4.6.2 | Eigene Wartung und Teilwartung | 78 |
| 4.6.3 | Betriebsüberwachung | 78 |
| 4.7 | Technologische Einbindung | 79 |
| 4.7.1 | Kälteerzeugung | 79 |
| 4.7.2 | Speichertechnologien | 82 |
| 5 | Wirtschaftlichkeit | 85 |
| 5.1 | Grundlagen | 85 |
| 5.1.1 | Berechnungsverfahren | 86 |
| 5.1.2 | Beurteilungskriterien | 87 |
| 5.2 | Kostenermittlung | 88 |
| 5.2.1 | Kapitalkosten | 88 |
| 5.2.2 | Brennstoffkosten | 91 |
| 5.2.3 | Zusatz- und Reservekosten | 92 |
| 5.2.4 | Sonstige Kosten | 93 |
| 5.3 | Erlöse, Einsparungen | 94 |
| 5.3.1 | Strom | 94 |
| 5.3.2 | Wärme | 95 |
| 5.4 | Beispiele | 95 |
| 5.4.1 | BHKW mit 1 und 5,5 kW _{el} | 95 |
| 5.4.2 | Holz-BHKW mit 30 kW _{el} | 99 |
| 5.4.3 | BHKW mit 75 kW _{el} in einer Biogasanlage | 99 |
| 5.4.4 | Lichtblick-BHKW mit 19 kW _{el} und 36 kW _{th} | 102 |
| 6 | Organisatorische Konzepte, Betriebs- und Vermarktungsmodelle | 103 |
| 6.1 | Eigenversorgung | 104 |
| 6.1.1 | Gewerbebetrieb, Eigentümer | 105 |
| 6.1.2 | Gemeinschaften | 106 |
| 6.2 | Fremdversorgung (Contracting) | 107 |
| 6.2.1 | Contracting im Gewerbe | 107 |
| 6.2.2 | Contracting in der Wohnungswirtschaft | 108 |
| 6.3 | Betriebskonzepte | 109 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 6.3.1 | Wärme- und Stromführung | 109 |
| 6.3.2 | Optimierung der Betriebsführung | 109 |
| 6.3.3 | Beispiele | 110 |
| 6.4 | Vermarktungsmodelle | 113 |
| 6.4.1 | Netzeinspeisung | 113 |
| 6.4.2 | Stromabgabe an einen Fremdversorger (Contractor) | 114 |
| 6.4.3 | Teilnahme an einem virtuellen Kraftwerk | 114 |
| 6.4.4 | Verkauf am Regelleistungsmarkt | 114 |
| 6.4.5 | Stromverkauf an Dritte | 115 |
| 6.4.6 | Stromverkauf im »Objekt« aus einer Kundenanlage | 116 |
| 6.4.7 | Deckung des Strom-Eigenbedarfs | 117 |
| 6.5 | Ausblick | 118 |
| 6.5.1 | Zukünftiger Strom- und Wärmemarkt | 118 |
| 6.5.2 | Rolle der Kommunen | 118 |
| 7 | Anmeldung, Genehmigung, Anträge | 121 |
| 7.1 | Vor Inbetriebnahme | 121 |
| 7.2 | Nach Inbetriebnahme | 121 |
| 7.3 | Versicherungen | 122 |
| 8 | Planungsschritte | 124 |
| 8.1 | BHKW-Größe | 125 |
| 8.2 | Pflichtenheft für den Objekt-Anwender | 125 |
| 8.3 | Ausschreibung und Lieferumfang | 126 |
| 8.4 | Beteiligung des Handwerks | 127 |
| 8.5 | Pflichtenheft für den Projektbeauftragten | 128 |
| 9 | Neue Forschungstrends: KWK-Projekte der Förderinitiative EnEff:Wärme | 129 |
| 9.1 | Anlagentechnik | 129 |
| 9.2 | Kombination von Technologien | 131 |
| 9.3 | Dienstleistungs-, Betriebs- und Marktkonzepte sowie Kommunikations- und Informationstechniken | 136 |
| 9.4 | Zusammenfassung – Forschungstrends | 138 |
| 9.5 | Ausblick | 139 |
| 10 | Serviceteil | 140 |
| 10.1 | Förderung | 140 |
| 10.2 | Baugenehmigung | 140 |
| 10.3 | Zulassung und Meldung nach dem KWK-Gesetz | 140 |
| 10.4 | Energiesteuerentlastung | 140 |
| 10.5 | Stromlieferung | 140 |
| 10.6 | Anmeldung beim örtlichen Stromversorger (Netzbetreiber) | 141 |
| 10.7 | Ausschreibungsbeispiel für ein Energieliefer-Contracting | 141 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 11 | Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis | 142 |
| 11.1 | Zitierte Literatur | 142 |
| 11.2 | Abbildungsverzeichnis | 144 |
| 12 | Forschungsvorhaben der Bundesregierung | 147 |
| 12.1 | Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben | 147 |
| 12.2 | Forschungsberichte | 150 |
| 13 | Weiterführende Literatur | 152 |
| 13.1 | Kraft-Wärme-Kopplung, Blockheizkraftwerke, Mini-Blockheizkraftwerke | 152 |
| 13.2 | Stirling-Motoren | 155 |
| 13.3 | Brennstoffzellen | 156 |
| 13.4 | Zeitschriften | 157 |
| 13.5 | Internet | 157 |
| 13.6 | BINE Informationsdienst | 158 |
| 13.7 | Forschungsportale des BMWi | 159 |
| 14 | Zum Autor | 160 |

Vorwort

Auch wenn sich die Versorgung mittels Kraft-Wärme-Kopplung in den letzten Jahrzehnten stark ausgebreitet hat, deckt sie aus der Sicht der gesamten Stromerzeugung bisher nur einen bescheidenen Anteil ab. Doch mit der im Sommer 2011 beschlossenen Energiewende hat sich die Bundesregierung ein ambitioniertes Ziel gesetzt: Bis 2050 soll die annähernde Vollversorgung mit Erneuerbaren Energien sichergestellt werden. Die Energiewende bedeutet deshalb auch eine Abkehr von den zentralen zu mehr dezentralen Versorgungsstrukturen. Dabei zählt die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu den effizientesten dezentralen Energiesystemen. Die rechtlichen und finanziellen Bedingungen werden nun so gestaltet, dass der KWK-Stromanteil von heute 13 auf 25 Prozent bis 2020 ausgebaut wird.

Die achte, überarbeitete Auflage dieses BINE-Fachbuchs trägt diesen neuen energiepolitischen Zielsetzungen und gesetzlichen Rahmenbedingungen Rechnung – und stellt ihre Auswirkungen für die KWK, für Blockheizkraftwerke und ihre Betreiber ausführlich vor. Das BINE-Fachbuch konzentriert sich auf dabei auf Fragen der praktischen Anwendung von BHKW. Schließlich soll dieser Leitfaden helfen, Hemmnisse bei der Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung zu überwinden und u. a. einen einfachen und kostengünstigen Zugang zum Stromnetz zu ermöglichen.

Den thematischen Schwerpunkt bilden somit weiterhin technische und Betriebskonzepte, die Wirtschaftlichkeitsermittlung von BHKW-Anlagen sowie Organisations-, Finanzierungs- und Genehmigungsfragen. Der Serviceteil bietet in übersichtlicher Form neben Literatur und Links auch Hinweise auf Antrags- und Vertragsmuster für notwendige Genehmigungsschritte, für Betrieb und Wartung.

FIZ Karlsruhe GmbH
BINE Informationsdienst

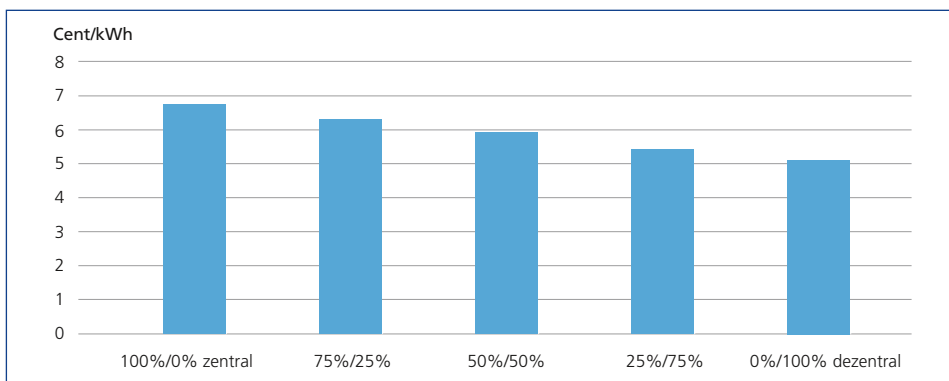
1 Energiepolitische Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Im Sommer 2011 wurde die Energiewende beschlossen. Damit hat sich die Bundesregierung ein großes Ziel gesetzt: Bis 2050 soll die annähernde Vollversorgung mit Erneuerbaren Energien sichergestellt werden. Die Entscheidung für den Umbruch in unserer Energieversorgung fiel auf Basis einer überwältigenden gesellschaftlichen Mehrheit, unter dem Eindruck der verheerenden Atomkatastrophe von Fukushima und im Bewusstsein des sich beschleunigenden Klimawandels. Die Energiewende bedeutet eine Abkehr von den zentralen zu mehr dezentralen Versorgungsstrukturen. Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zählt zu den effizientesten dezentralen Energiesystemen.

Im Koalitionsvertrag von 2013 wurde noch einmal auf die Bedeutung der Energiewende hingewiesen. Mit ihr wird der engagierte Klimaschutz zum Fortschrittsmotor und soll dabei den Wohlstand und die Wettbewerbsfähigkeit stärken. Hinsichtlich der KWK wurden die Vorteile bei den CO₂-Emissionen und bei der Effizienz gegenüber anderen Heizsystemen erkannt. Die rechtlichen und finanziellen Bedingungen für die KWK sollen so gestaltet werden, dass der KWK-Stromanteil von heute 13 auf 25 Prozent bis 2020 ausgebaut wird.

In Anbetracht der zweifelsfreien Vorteile beim Ressourcen- und Klimaschutz muss der Trend zu der effizienteren KWK unterstützt werden, zumal nach den Berechnungen der World Alliance for Decentralized Energy für die EU-Kommission auch ein umso größerer wirtschaftlicher Kostenvorteil entsteht, je dezentraler die Versorgung erfolgt. Ein weiterer Vorteil vieler kleiner KWK-Einheiten ist die erhöhte Versorgungssicherheit der Stromversorgung.

Der Entschließungsantrag zur »Strom- und Wärmeerzeugung in kleinem und kleinstem Maßstab« (2012/2930/RSP [1]) wurde am 12. September 2013 mit großer Mehrheit vom EU-Parlament angenommen. Die Resolution des EU-Parlaments sieht vor, dass die Strom und Wärmeerzeugung in »kleinem und kleinstem Maßstab« künftig von wesentlicher Bedeutung für die Energieversorgung in der EU sein muss. Der »Maßstab« bezieht sich hier nicht nur auf die Art und Größe der KWK-Anlagen, sondern auch auf kleinere Betreiberorganisationen wie kommunale Unternehmen, Gruppen oder Energiegenossenschaften.



■ **Abb. 1:** Stromkosten bei verschiedenen Anteilen einer zentralen/dezentralen Versorgung

Besonders wird in der Resolution darauf hingewiesen, dass die Beteiligung von Bürgern an der Energieversorgung eine größere Sensibilität und Akzeptanz in der Bevölkerung für energiepolitische Fragestellungen nach sich zieht und der Ausbau dieser bisher zu wenig geförderten Technologie elementarer Teil der europäischen Energieversorgung werden soll. Daher fordert das EU Parlament die Kommission auf, administrative Hürden bei der Genehmigung von entsprechenden Anlagen zu verringern und die Umsetzung bestehender Leitlinien zu fördern, wie etwa die Vorschriften zu KWK-Kleinstanlagen und der Energieeffizienzrichtlinie. Auch sollen die Kommission und die Mitgliedsstaaten sicherstellen, dass die Stromerzeugung in kleinstem Maßstab im Zeitraum von 2014 bis 2020 im Rahmen des EU-Fonds, einschließlich des Strukturfonds, förderfähig wird.

Der vorliegende Leitfaden für den Anwender soll daher helfen, die seit der letzten Auflage 2009 veränderten Rahmenbedingungen:

- Stark gestiegene Strompreise,
- starker Anstieg der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen,
- Novellierung des EEG und des KWK-Gesetzes,
- neue Betriebs- und Vermarktungskonzepte für KWK-Strom,
- Marktreife von kleinsten KWK-Einheiten für nahezu alle Anwendungen

darzustellen und zu bewerten. Ziel ist es, einen problemlosen und kostengünstigen Stromnetzzugang, aber auch eine KWK-Stromnutzung und -vermarktung zu ermöglichen. Dies sind wichtige Voraussetzungen, um in den nächsten Jahrzehnten eine stärker dezentrale Versorgung aufzubauen, so wie es auch die EU vorsieht.

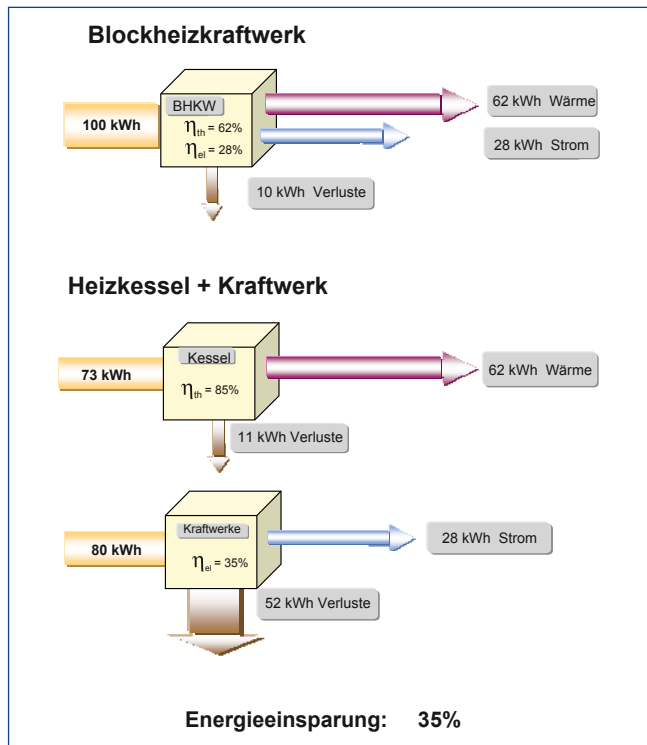
1.1 Energieeinsparung, Klimaschutz und Perspektiven

Die beiden grundsätzlichen und unbestrittenen Vorteile der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung sind die Energieeinsparung – auch Effizienz genannt – und die Umweltentlastung gegenüber der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung aus Kraftwerken und Heizkesseln.

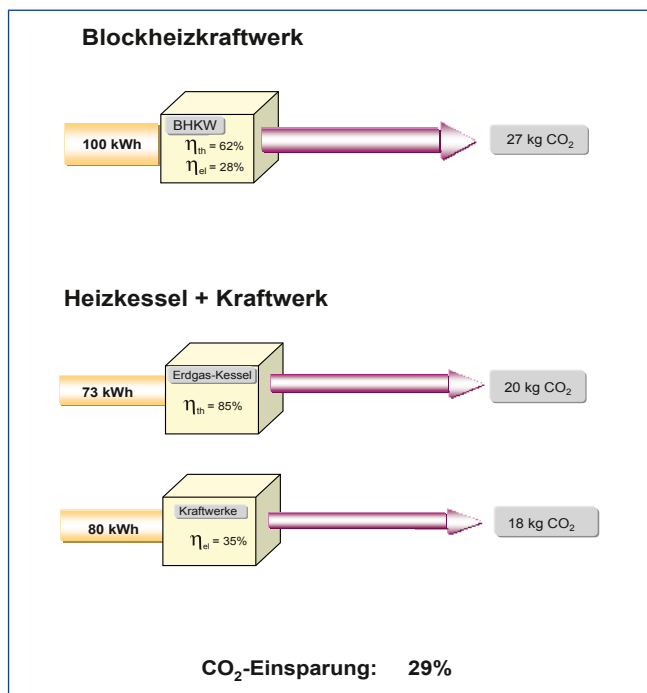
Die Energieeinsparung durch die KWK hängt selbstverständlich von der eingesetzten KWK-Technik (z. B. Motor-BHKW, Gasturbine) sowie von den Nutzungsgraden im Vergleich zur getrennten Bereitstellung von Strom und Wärme ab. Abb. 2 zeigt, dass selbst für ein Klein-BHKW mit einem vergleichsweise geringen elektrischen Wirkungsgrad von 28 % im Vergleich zur Bereitstellung der gleichen Strom- und Wärmemenge aus einem normalen Heizkessel und den Kraftwerken der BRD eine Energieeinsparung von 35 % erzielt wird. Größere BHKW erreichen stromseitige Wirkungsgrade von über 40 %. Sie erzielen deshalb Energieeinsparungen von über 40 % im Vergleich zu ungekoppelten Kraftwerken und Heizkesseln. Selbst wenn man modernste Kraftwerke und Brennwärtskessel mit höchsten Wirkungsgraden ansetzt, bleibt immer noch eine beachtliche Energieeinsparung.

Vergleicht man die für den Umweltschutz entscheidenden CO₂-Emissionen eines BHKW mit den Emissionen der Kraftwerke in der BRD und einem Heizkessel, so ergibt sich eine CO₂-Reduktion von 29 %.

■ **Abb. 2:** Energieeinsparung durch ein BHKW



■ **Abb. 3:** CO₂-Einsparung durch ein BHKW



Selbstverständlich hängt dabei die erzielbare Entlastung der Umwelt von der Art der jeweils verwendeten Brennstoffe ab, da auch zwischen den fossilen Energien auf Grund der jeweiligen Kohlenstoffgehalte unterschiedliche CO₂-Emissionen entstehen. In der Abb. 2 ist ein Erdgaskessel als alternative Wärmeerzeugung angenommen. Wählt man dagegen einen Heizölkessel, so steigt die CO₂-Einsparung von 29 auf 42 % an. Er steigt sogar noch weiter, wenn die BHKW-Stromerzeugung den Strom aus Kohlekraftwerken ersetzt.

Das technologische Entwicklungspotenzial gerade im Hinblick auf den Einsatz regenerativer Energieträger ist auch nach 100 Jahren KWK noch lange nicht ausgeschöpft ist (Abb. 4). Man denke nur an die rasche und viel versprechende Entwicklung der Brennstoffzelle und kleinster KWK-Anlagen zur Marktreife. Die KWK wird daher in den nächsten Jahrzehnten bei knapper werdenden fossilen Energieträgern auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung einen wesentlichen Beitrag leisten. Bereits für 2025 wird ein Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung von 40 bis 45 % prognostiziert, der im Jahr 2013 noch bei 25 % lag [3].



Pelletholzvergaser mit Stirlingmotor



Biogasanlage mit BHKW



Pflanzenöl-BHKW



Brennstoffzelle evtl. mit Biogas

■ **Abb. 4:** Die KWK hat ein hohes Entwicklungspotenzial

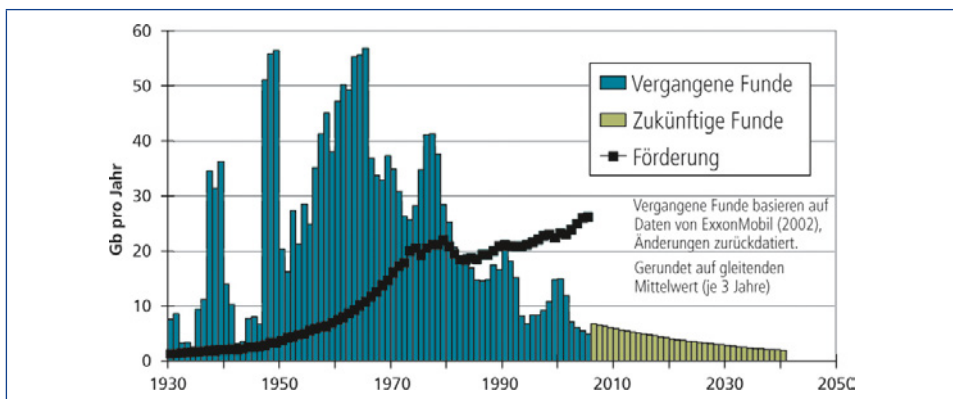
1.2 Energiewirtschaft im Umbruch

Die Vorräte an fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas schwinden. Der Zeitpunkt der höchsten Ölförderung ist in den meisten Ländern schon erreicht. Die Förderung übersteigt bereits die neu gefundenen Quellen (Abb. 5). Es muss immer mehr Energie eingesetzt werden, um eine bestimmte Menge Energie zu gewinnen. Dies geht so lange bis die Energiebilanz negativ und jegliche Förderung unwirtschaftlich wird. Die Konsequenz dieser Entwicklung ist zwangsläufig: wir müssen auf regenerative Energieträger wie Sonne, Wind und Biomasse umsteigen. Dieser Wandel wird als »Energiewende« bezeichnet. Mit ihr wird in der Regel nur die regenerative Stromerzeugung verstanden. Der viel größere Wärmemarkt, der letztendlich auch regenerativ werden muss, wird oft übersehen. Aber gerade hier wird das Potenzial der KWK nur im Ansatz erkannt. Eine Strategie zur flächendeckenden Einführung der KWK fehlt gänzlich.

Neben den zur Neige gehenden fossilen Energieträgern gibt es noch ein weiteres Argument für die Energiewende. Die Verbrennung der kohlenstoffbasierten Energieträger führte und führt langfristig zu einem Klimawandel. Dabei ist der Temperaturanstieg nur **eine** Folgeerscheinung. Die globale Erwärmung bedingt durch die CO₂-Emissionen ist aber in der Politik das entscheidende Argument für die Energiewende, auch wenn die Bürger viel mehr durch örtliche extreme Wetterlagen wie Sturm, Hagel und Hochwasser in Mitleidenschaft gezogen werden. Auch bei den CO₂-Emissionen hat die KWK den großen Vorteil, den Wärme- und Strommarkt klimaschonend zu gestalten (Abb. 3).

1.2.1 Vorräte, Verfügbarkeit und Verteilung von Energieträgern

Die Vorräte an Kohle, Öl und Gas sind nicht nur begrenzt, sondern sie sind auch auf der Welt ungleich verteilt. In Deutschland sind nur die Kohlevorräte nennenswert. Die großen Lagerstätten an Öl und Gas sind an wenigen Stellen der Erde konzentriert. Dort werden mit hohem Aufwand die Primärenergieträger gefördert und oft über die halbe Erde transportiert, um den Strom- und Wärmemarkt zu bedienen. Wegen der hohen Energie-Konzentration haben sich in der Stromerzeugung immer größere Kraftwerke durchgesetzt. Entsprechend den Stromverbrauchsschwerpunkten wurden die Kraftwerke der Grund- Mittel und Spitzenlast errichtet



■ **Abb. 5:** Die Ölförderung übersteigt die Ölfunde

und nach dem Verbrauch geregelt. Es war eine angebotsorientierte Stromwirtschaft, die nur eine Richtung der Versorgung, kannte: Von wenigen Stromerzeugern zu vielen Stromverbrauchern.

Im Gegensatz zu den hochkonzentrierten und jederzeit verfügbaren fossilen Energieträgern sind die regenerativen Energieträger wie Sonne, Wind und Biomasse viel diffuser und gleichmäßiger über die Erde verteilt. Dazu kommt noch, dass die Verfügbarkeit vom Wetter und zeitlichen Schwankungen abhängt. Zwangsläufig rücken daher Speichertechnologien in den Fokus. Auch wenn die regenerativen Energieträger nur in geringer Konzentration anfallen, sind sie für die überwiegende Mehrheit der Bürger verfügbar und nutzbar. Der »Brennstoff« Sonne und Wind ist für alle kostenlos. Zusammen mit reizvollen Einspeisevergütungen hat die Zahl der Stromerzeuger in den letzten 14 Jahren auf nahezu 2 Mio. zugenommen. Dies wurde auch in den kühnsten Prognosen von Niemandem vorhergesehen. Die Stromnetze wurden kaum ausgebaut. Ein Nord-Süd-Ausgleich ist nicht möglich. Die Netze werden wie früher angebotsorientiert betrieben, obwohl heute viele Stromerzeuger viele Stromverbraucher oft in derselben Person versorgen.

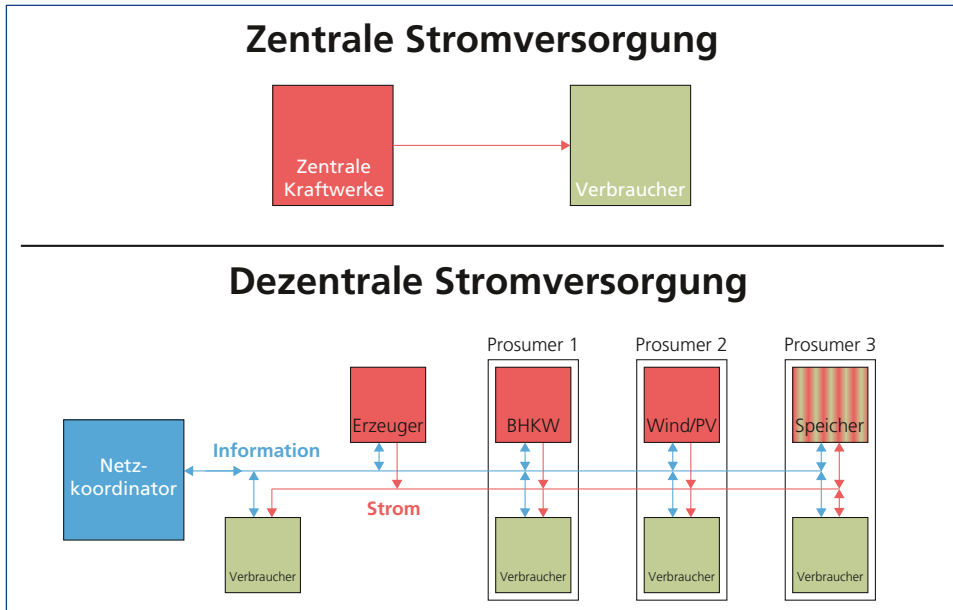
1.2.2 Erzeuger, Verbraucher, Prosumer

Viele Stromversorger sind dabei, sich vom Energieunternehmen zu einem Dienstleistungsunternehmen zu wandeln. Sie bieten ihren Kunden viele neue Serviceleistungen an. Aber auch die Kunden wandeln sich immer mehr von reinen Stromverbrauchern zu eigenverantwortlichen Stromerzeugern: Sie werden zu »Prosumern«, einem Kunstwort aus Produzent (Producer) und Konsument (Consumer). Das Stromnetz der Zukunft wird nicht nur die Aufgabe haben, Strom vom Erzeuger zum Verbraucher zu leiten. Es müssen auch vielfältige Informationen zwischen den Beteiligten über noch zu schaffende Kommunikationstechniken ausgetauscht werden (Abb. 6). In Zukunft wird ein »Smart Grid« es ermöglichen, Herkunft und Preis des Stroms zu erkennen und durch den Zeitpunkt des Verbrauchs sowie die Einspeisung aus eigenen Erzeugungseinheiten direkt zu beeinflussen. Die Neugestaltung der Stromversorgung – oft als zukünftiges Strommarktdesign bezeichnet –, die einem gewaltigen Umbruch gleichkommt, braucht das Engagement der Energiedienstleister und die Kompromissbereitschaft der großen Stromversorger. Vor allem jedoch benötigt sie die Zustimmung der Bürger und Kommunen.

1.2.3 Strompreise, Stromkosten, Einspeisevergütungen

Mit der Energiewende sind die Strompreise ins Bewusstsein der Bürger gedrungen, auch wenn nur wenige ihren Preis in Cent/kWh kennen. Der Strompreis hat dadurch wie der Benzinpreis eine politische Bedeutung bekommen und sollte deshalb »bezahlbar« bleiben – was immer das auch konkret bedeuten mag. Die Novellierung des EEG zum 01.08.2014 hat zwar Änderungen zwischen den einzelnen Kostenbestandteilen zur Folge. An der absoluten Höhe der Strompreise wird sich jedoch wenig ändern. Die Bruttostrompreise, also inkl. aller Steuern und Abgaben, sind eher von der Abnahmemenge abhängig [3]:

- >10 Mio. kWh 15–19 Cent/kWh
- 0,1 bis 1 Mio. kWh 18–23 Cent/kWh
- < 0,1 Mio. kWh 23–27 Cent/kWh.



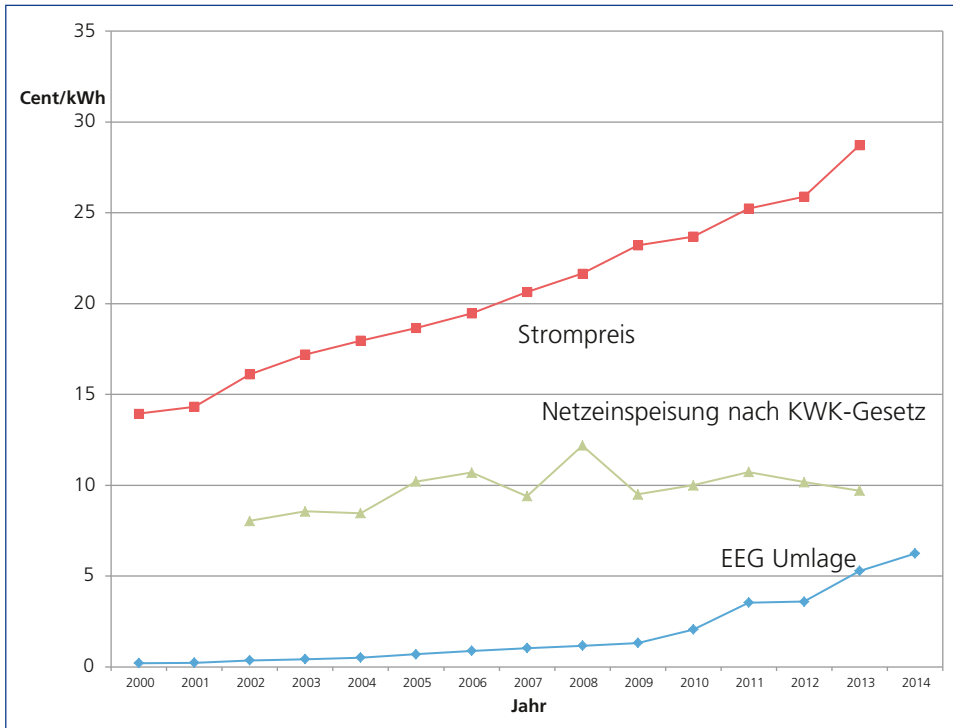
■ **Abb. 6:** Energiewende: Von der zentralen zur dezentralen Stromversorgung

Die Haushaltsstrompreise in der Grundversorgung sind von 2000 bis 2013 von 13,9 auf 28,7 Cent/kWh gestiegen (Abb. 7), was einer Steigerung von 5,7 % je Jahr entspricht.

Es werden viele Gründe für die steigenden Strompreise aufgeführt. Am häufigsten wird aber der Energiewende die Schuld gegeben, auch wenn die EEG-Umlage nur einen Anteil von 36 % an der Strompreiszunahme von 2000 bis 2013 hat (Abb. 7). Das EEG ist durch viele Ausnahmeregelungen für die Industrie und Regelungen, die mit der Förderung der erneuerbaren Energien nichts zu tun haben belastet worden. Nur noch 2,5 Cent je kWh der EEG-Umlage von 6,24 Cent/kWh entfallen tatsächlich auf die Förderung der erneuerbaren Energien. Die Strompreise sind für die Perspektive der KWK jedoch entscheidend. Denn der KWK-Betreiber wird sich im Falle einer Direktvermarktung des Stroms an diesen Preisen orientieren. Je höher der Strompreis desto höher werden auch seine Einnahmen sein. Auch bei der Eigennutzung des KWK-Stroms ist der Strompreis die Basis für seine Einsparungen.

Die Einspeisevergütungen für den KWK-Strom, die heute nur etwa ein Drittel der Strompreise ausmachen, sind dagegen in den letzten 10 Jahren nahezu unverändert geblieben (Abb. 7). Es ist daher immer wirtschaftlicher, den KWK-Strom zu vermarkten oder ihn selbst zu nutzen. Den Strom ins Netz einzuspeisen ist zwar technisch einfacher, aber nur die zweitbeste Lösung. Durch die steigenden Strompreise geht die Schere noch weiter auf.

Die Einspeisevergütungen sind bei der Kosten- und Erlösermittlung der KWK gut kalkulierbar. Wenn jedoch in Zukunft der KWK-Betrieb von Preissignalen abhängig wird, kommt neben der Unsicherheit der Brennstoff- und Strompreisentwicklung noch die Netzauslastung hinzu. Die bei der KWK ohnehin schwierige Kostenermittlung wird gänzlich unsicher und schreckt Investoren eher ab. Die Vorteile der KWK im Zuge der Energiewende – schnell verfügbar, effizient, klimaschonend – sind zweifellos vorhanden, aber nicht in Euro berechenbar.



■ **Abb. 7:** Strompreisentwicklung nach Angabe des BDEW

Während die Strompreise bei den Stromanbietern leicht zu ermitteln sind, gestaltet sich die Berechnung der Stromkosten sehr viel schwieriger, weil sie stark von der Benutzungsdauer und der Brennstoffart abhängig sind. Prognosen für die kommenden 20 Jahre sind mit enormen Unsicherheiten behaftet. In [4] liegen abhängig von den angenommenen Volllaststunden, Brennstoff- und CO₂-Zertifikatspreisen die Stromgestehungskosten von im Jahr 2013 errichteten Braunkohle-Kraftwerken bei 0,038–0,053 Euro/kWh, von Steinkohle-Kraftwerken bei 0,063–0,080 Euro/kWh und von GuD-Kraftwerken bei 0,075–0,098 Euro/kWh. Die regenerativen Stromerzeugungssysteme unterliegen einer Kostendegression und werden daher erst in Zukunft die Stromkosten der fossilen Kraftwerke unterschreiten.

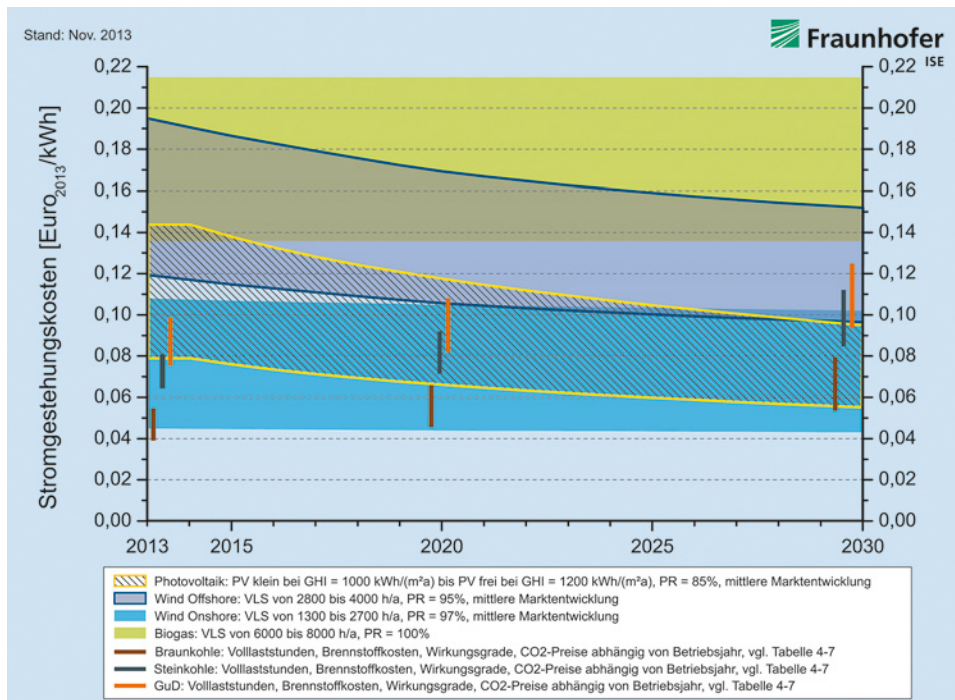
Im Gegensatz zur Solar- und Windenergienutzung benötigt die KWK einen fossilen oder Bio-Brennstoff oder nutzt die Abwärme aus Industrieprozessen, die erzeugt oder eingekauft werden müssen. Abwärme oder Abfälle können sogar einen negativen Wert haben. Dies belastet die Kostensituation. Andererseits kommen der KWK die Erlöse auf der Wärmeseite zu Gute. Dadurch reduzieren sich die Stromgestehungskosten. Der Kostenblock »Kapitalkosten« kann durch lange Laufzeiten reduziert werden. Bei großen BHKW-Anlagen mit 1 MW_{el} und langen Laufzeiten liegen die Stromgestehungskosten bei 9 Cent/kWh_{el}. Die spezifisch teuren kleinen BHKW für die Raumwärme kommen kaum unter 15 Cent/kWh_{el}. Sie sind daher sowohl gegenüber den konventionellen wie den regenerativen Systemen konkurrenzfähig. Für die Zukunft hat die KWK noch ein beachtliches Kostensenkungspotenzial, weil die Lernkurve der kleinen BHKW hinsichtlich der Investitionen noch ganz am Anfang steht.

1.2.4 Steuerungsmechanismen der Politik

Am 30. Mai 2011 versicherte Kanzlerin Angela Merkel, sie werde die an diesem Tag vorgelegten Empfehlungen der von ihr selbst eingesetzten Ethik-Kommission »als Richtschnur unseres Handelns nehmen«. Die Ethik-Kommission hob hervor, »dass die Energiewende nur mit einer gemeinsamen Anstrengung auf allen Ebenen der Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft gelingen wird« [6].

Die gesellschaftliche Akzeptanz für die Energiewende war 2011 mit gut zwei Dritteln der Bevölkerung gegeben. 2014 ist nur noch die Hälfte der Bevölkerung für die Energiewende. Trotz der politischen Beteuerungen sind weite Kreise der Wirtschaft eher skeptisch oder lehnen die Energiewende grundsätzlich ab. Dabei werden immer wieder die steigenden Strompreise, drohende Stromausfälle, fehlende Stromtrassen, neue Öl- und Gasfunde und neue Förder-techniken (Gasfracking, Ölschiefer) ins Feld geführt. Eine gemeinsame Anstrengung für die Energiewende ist bei diesem Interessenskonflikt derzeit nicht zu erkennen. Die Argumente gegen die Energiewende werden diese aber nur verzögern. Letztendlich werden die nicht mehr weit reichenden konventionellen Energieträger die Nutzung regenerativer Energieträger erzwingen.

Der Staat hat im Rahmen der Daseinsvorsorge nach dem Sozialstaatsprinzip zu handeln. Er muss also in die Wirtschaft eingreifen, um zu verhindern, dass die Preise der nur noch begrenzt vorhandenen fossilen Energieträger nicht ins Unermessliche steigen. Dies muss jetzt sozialverträglich geschehen, so lange noch fossile Energieträger vorhanden sind. Gegenwärtig steuert die Politik die KWK im Rahmen der Energiewende durch gesetzliche Rahmen-



■ **Abb. 8:** Stromgestehungskosten fossiler und regenerativer Stromerzeugungssystemen nach [5]

bedingungen (KWK-Gesetz, EEG), Förderprogramme (KWK-Impulsprogramm), Projekte der Forschungsförderung (Kap. 1.5 und 9) und viele Projekte an Hochschulen.

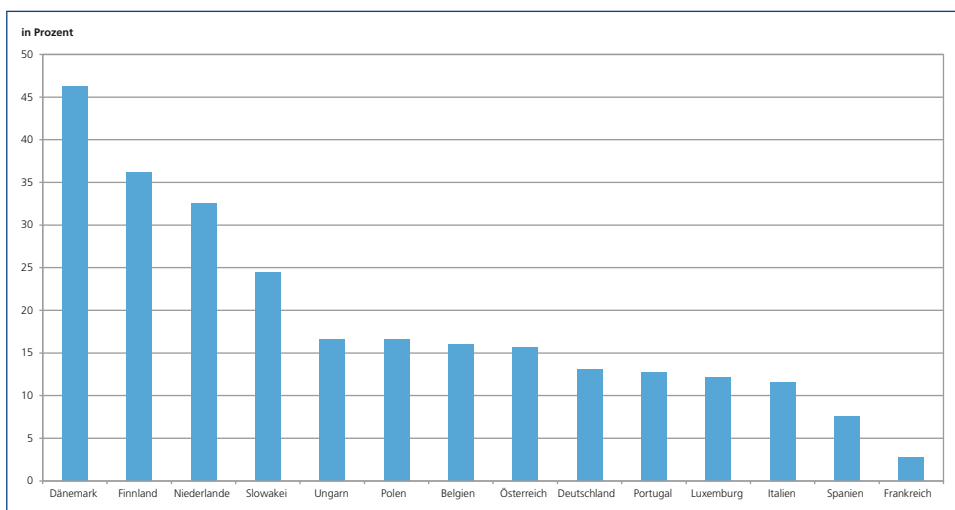
1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Der Klimaschutz als politische Zielsetzung ist wirkungslos, wenn nicht konkrete Rahmenbedingungen geschaffen werden, um auch die KWK zu fördern. Dies wurde bis 1998 weitgehend unterlassen, so dass die industrielle KWK seit 1970 kontinuierlich abnahm. In der gleichen Zeit verzeichneten aber die motorbetriebenen KWK-Anlagen (Blockheizkraftwerke – BHKW) vorwiegend im gewerblichen und kommunalen Bereich einen rasanten Anstieg, weil dort die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen besser waren. Es konnte allerdings trotz steigender Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen nicht verhindert werden, dass insgesamt der in KWK erzeugte Strom an der gesamten Stromerzeugung nur einen bescheidenen Anteil von 13 % hat (Abb. 9).

Länder mit ähnlicher Bevölkerungs- und Wirtschaftsstruktur in Europa konnten deutlich höhere Anteile vorweisen: So liegt in den Niederlanden, Finnland und Dänemark der KWK-Anteil an der Stromerzeugung bei 35–50 %. Der Anteil der KWK an der deutschen Stromerzeugung ist somit eher bescheiden und bleibt weit hinter den technischen und ökonomischen Möglichkeiten zurück.

Erst seit 1998 wurde versucht, durch gesetzliche Bestimmungen die KWK stärker zu begünstigen und dieser Technik mit ihren Vorzügen zum Durchbruch zu verhelfen. Dies betraf folgende Gesetze und Regelwerke (die seit der letzten Auflage 2009 bedeutsamen Gesetzesänderungen sind hervorgehoben):

- Energiewirtschaftsgesetz (EnWG),
- Ökosteuer (Strom- und Energiesteuer),
- Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-Gesetz),



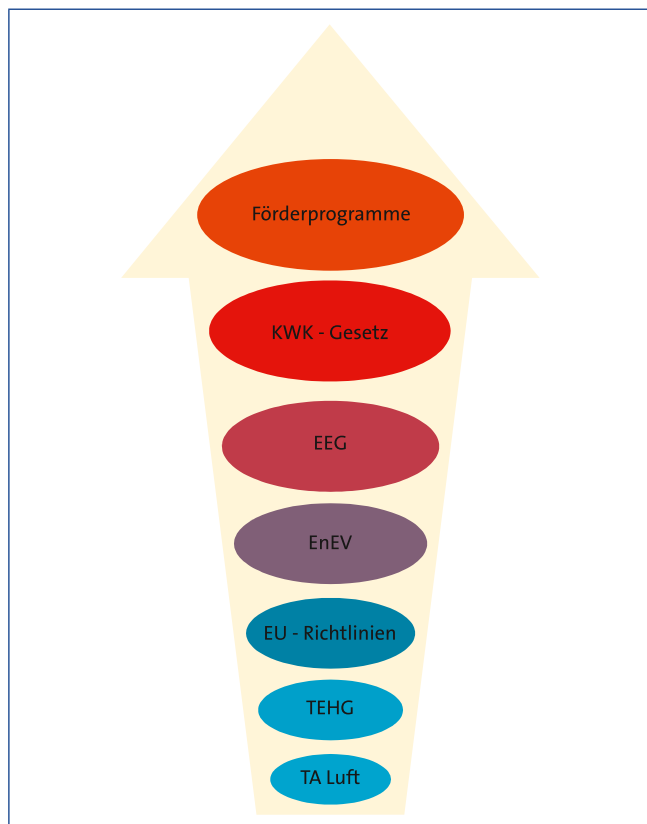
■ **Abb. 9:** Anteil des KWK-Stroms an der gesamten Stromerzeugung

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG),
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG),
- Energieeinsparverordnung (EnEV),
- Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetz (TEHG),
- TA Luft,
- EU-Richtlinien,
- Förderprogramme.

Bei so vielen Bestimmungen, Einschränkungen, Ausnahmen und zeitlichen Eingrenzungen ist es für den Anwender der KWK extrem schwierig, den Überblick zu wahren und den konkreten wirtschaftlichen Vorteil zu sehen, der ihn von der bewährten und gewohnten Strom- und Wärmeversorgung abbringen soll. Zumal sich einzelne Bestimmungen im Nachhinein nicht als Förderung, sondern als Hemmnis für die KWK herausstellten. Fazit: Bis 2014 lässt der KWK-Ausbau trotz gewisser Fortschritte zu wünschen übrig, obwohl 2012 ein spezielles Förderprogramm mit Investitionshilfen für BHKW aufgelegt wurde. Auch der Entwurf für die Novellierung des EEG wird die KWK eher einschränken als fördern [2].

In der Abb. 10 wird versucht, die Bedeutung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für die KWK zu bewerten. Die TA Luft hat nur einen sehr geringen und Förderprogramme einen sehr großen Einfluss auf eine weitere Verbreitung der KWK.

■ **Abb. 10:** Steigende Bedeutung im gesetzlichen Umfeld der KWK



1.3.1 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)

Durch das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) von 1998 wurde in Deutschland eine Öffnung der Strommärkte (Liberalisierung) für den Wettbewerb eingeleitet. Der Gesetzgeber wollte die Gebietsmonopole der Verbundunternehmen aufbrechen und dem Stromabnehmer die freie Wahl zwischen mehreren Stromanbietern sowie eine leichte Netzeinspeisung z. B. aus KWK-Anlagen bis 30 kW_{el} ermöglichen. Die freie Wahl des Stromanbieters und die Netzeinspeisung sind heute standardisiert. Die Netzeinspeisung aus KWK-Anlagen ist aber wegen der gleichbleibenden Einspeisevergütungen und der steigenden Strompreise in den letzten Jahren immer unrentabler geworden (Kap. 1.2.3).

Im Jahr 2005 wurde das EnWG reformiert. Entscheidende Neuerung und Ziel ist es nun, die überhöhten Netzgebühren von einer Regulierungsbehörde kontrollieren und überprüfen zu lassen, um dadurch die Konkurrenzfähigkeit von KWK-Strom bei der Direktvermarktung zu erhöhen. Nach wie vor sind die Netzentgelte trotz Kontrolle bei der Direktvermarktung sehr hoch. Es kommen noch die behördlichen Hemmnisse und die Blockadepolitik der Netzbetreiber hinzu, so dass ein KWK-Stromhandel von Bürger zu Bürger nicht möglich ist.

Den hohen Netzgebühren für den Fall der Stromdurchleitung stehen extrem niedrige vermiedene Netznutzungsentgelte von 0,15 bis 0,55 Cent/kWh gegenüber. Sie werden an den KWK-Betreiber bezahlt, weil er bei einer Niederspannungseinspeisung die Netze der höheren Spannungsebenen nicht beansprucht.

1.3.2 Ökosteur (Strom- und Energiesteuer)

Das im April 1999 in Kraft getretene »Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform« (sog. »Ökosteuergesetz«) und das »Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform« vom Dezember 1999 sehen für BHKW bei Einhaltung bestimmter Bedingungen Vergünstigungen bei der Energiesteuer vormals Mineralölsteuer und der Stromsteuer vor, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit dieser BHKW geringfügig verbessert.

Das Energiesteuergesetz führt für BHKW mit einem Gesamt-Jahresnutzungsgrad (Strom- plus Nutzwärmeerzeugung im Verhältnis zum Brennstoffeinsatz) von mindestens 60 Prozent zu einer Befreiung von der (seit April 1999 erhobenen) zusätzlichen Mineralölsteuer auf den eingesetzten Brennstoff. BHKW mit einem Jahres- oder Monatsnutzungsgrad von mindestens 70 Prozent sind zusätzlich für das gesamte Jahr bzw. für die Monate, in denen dieser Nutzungsgrad erreicht wird, von der »alten« Mineralölsteuer befreit. Die mit der Gas- bzw. Ölrechnung gezahlte »alte« Mineralölsteuer bzw. die gleichhohe »neue« Energiesteuer werden für den gesamten Brennstoffeinsatz zur Erzeugung von Strom und Wärme auf Antrag vom zuständigen Hauptzollamt erstattet. Für Erdgas liegt die erstattungsfähige Belastung seit 2003 aus der Energiesteuer insgesamt bei 0,55 Cent je kWh.

Nach dem Stromsteuergesetz sind Betreiber von BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von jeweils bis zu 2 000 kW_{el} von der Stromsteuer auf den BHKW-Strom befreit, den sie selbst verbrauchen. Darüber hinaus ist der Strom aus BHKW bis 2 000 kW_{el} von der Stromsteuer befreit, der »in räumlichem Zusammenhang« zwischen Einspeiser und Abnehmer steht. Der räumliche Zusammenhang ist auch dann gegeben, wenn z. B. aus einem BHKW in einer Schule noch eine Hausmeisterwohnung, eine Turnhalle sowie über das öffentliche Stromnetz das Rathaus, die kommunale Straßenbeleuchtung und eine ca. 4 km entfernte Kläranlage mit Strom

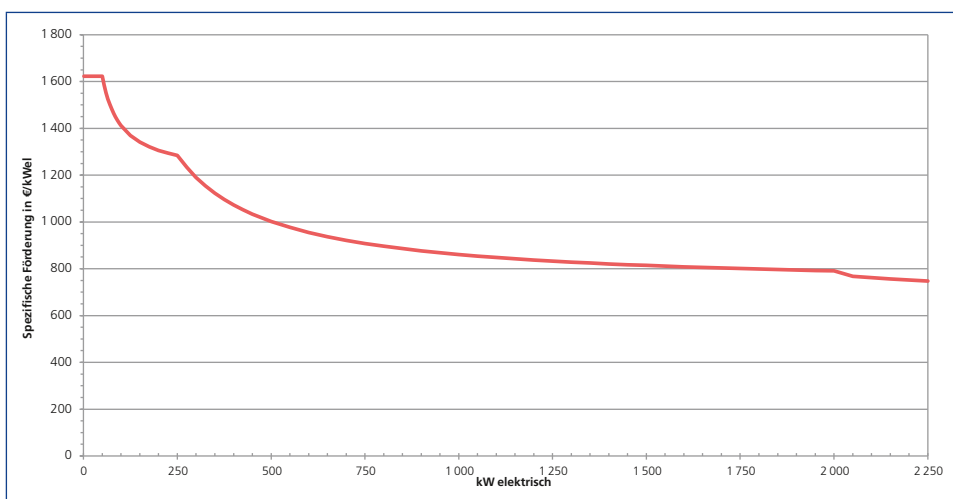
versorgt werden. Die Einspeisung in das öffentliche Stromnetz bedeutet nicht zwangsläufig, dass eine Stromsteuer anfällt. Die Befreiung von der Stromsteuer gilt auch für Strom aus solchen BHKW, die von Dritten (z. B. per Contracting) für den Nutzer betrieben werden.

Der Regelsatz der Stromsteuer liegt seit 2003 bei 2 Cent/kWh. Die im Vergleich zum Strombezug erzielbare Steuerersparnis fällt allerdings geringer aus, wenn der BHKW-Betreiber aufgrund der Ausnahmeregelungen des Stromsteuergesetzes den geringeren Stromsteuersatz von 60 % zu entrichten hat: So zahlen Unternehmen des produzierenden Gewerbes einen verminderten Satz von 1,2 Cent/kWh für die den Sockelbetrag von 500 Euro Steuerschuld übersteigende Strommenge. Die Steuerentlastung hat keinen Investitionsschub für die KWK ausgelöst.

1.3.3 Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG-Gesetz [7])

Die Ziele des Gesetzes, das seit 01.04.2002 in Kraft ist und 2012 das dritte Mal novelliert wurde, sind die Förderung der Modernisierung und des Neubaus von KWK-Anlagen, die Unterstützung der Markteinführung der Brennstoffzelle, sowie die Förderung des Neu- und Ausbaus von Wärme- und Kältenetzen und Wärme- und Kältespeichern. So sollte bis zum Jahr 2020 durch die Nutzung der KWK ein Ausbauziel von 25 % erreicht werden. Dies bedeutet, dass der Anteil der KWK-Stromerzeugung an der gesamten Stromerzeugung von 13 % im Jahre 2011 auf 25 % im Jahr 2020 ansteigen soll.

Die Betreiber begünstigter Anlagen erhalten Zuschlagszahlungen für jede in KWK erzeugte Kilowattstunde Elektrizität. Der Zuschlag für BHKW wird durch eine Deckelung nach 30000 Vollbenutzungsstunden (Vbh) begrenzt. Legt man die dafür erhaltenen Beträge auf die installierte elektrische Leistung um, so ergibt sich die Abb. 11. Das Ergebnis in Euro/kW_{el} kann mit den Investitionen ebenfalls in Euro/kW_{el} verglichen werden. Für BHKW ab ca. 500 kW entsprechen die gesamten Zuschlagszahlungen in etwa den Investitionen.



■ **Abb. 11:** Kumulierte Zuschlagssummen nach dem KWKG-G bei 30000 Vbh

| Elektrische Leistung | Cent/kWh | Max. Betriebsjahre | Max. Vollbenutzungsstunden |
|----------------------|----------|--------------------|----------------------------|
| bis 2 kW | 5,4 | 10 | oder 30000 |
| 2 bis 50 kW | 5,4 | | 30000 |
| 50 bis 250 kW | 4,0 | | |
| 250 kW bis 2 MW | 2,4 | | |
| > 2 MW | 2,1 | | |

■ **Abb. 12:** Gesetzlich geregelter Zuschlag für KWK-Strom (§ 7) für das Jahr 2013; ab 2014 Absenkung um 1 %/a

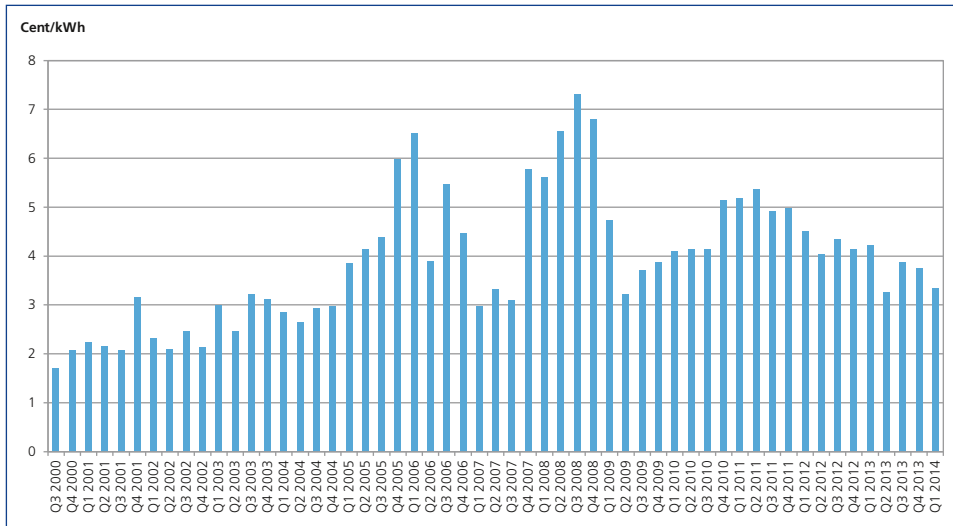
Die Zuschläge werden für BHKW bis 2 kW_{el} entweder 5,41 Cent/kWh über 10 Jahre oder einmalig pauschaliert für 30000 Vollbenutzungsstunden bezahlt.

Unter das Gesetz fallen alle KWK-Anlagen auf Basis fossiler Brennstoffe. Von der gesetzlichen Regelung werden sämtliche KWK-Technologien erfasst: alle Arten der Dampfturbinen- und Gasturbinen-Anlagen, Verbrennungsmotor-Anlagen, Stirling-Motor-, Dampf-Motor- und ORC (Organic-Rankine-Cycle)-Anlagen sowie Brennstoffzellen.

Durch das KWK-Gesetz werden die Betreiber von Netzen der allgemeinen Versorgung verpflichtet, KWK-Anlagen an ihr Netz anzuschließen und den in diesen Anlagen erzeugten KWK-Strom vorrangig abzunehmen (§ 4). Der KWK-Strom ist damit dem EEG-Strom (Kapitel 1.3.4) gleichgestellt.

»Für den aufgenommenen KWK-Strom sind der Preis, den der Betreiber der KWK-Anlage und der Netzbetreiber vereinbaren, und ein Zuschlag zu entrichten« (§ 4, Abs. 3). Die Höhe des Zuschlags wird im KWK-Gesetz (§ 7) differenziert nach der Leistungsgröße der Erzeugungsanlagen geregelt (Abb. 12), nicht jedoch der Preis selbst für den eingespeisten Strom und die vermiedene Netznutzung. Falls keine Vereinbarung zwischen dem vorgelagerten Netzbetreiber und dem Einspeiser von KWK-Strom hinsichtlich des Preises zustande kommen sollte, gilt der »übliche Preis« als vereinbart, zuzüglich dem nach den anerkannten Regeln der Technik berechneten Teil der Netznutzungsentgelte, der durch die dezentrale Einspeisung durch diese KWK-Anlage vermieden wird«. Dieser vom Gesetzgeber nicht festgelegte Preisbestandteil wurde von den Netzbetreibern und den Versorgern dahin gehend ausgenutzt, dass dem KWK-Betreiber nur 0,15 bis 0,55 Cent/kWh für die vermiedene Netznutzung angeboten werden. Der »übliche Preis« ist dagegen per Gesetz festgelegt: Als üblicher Preis gilt der durchschnittliche Preis für Baseload-Strom an der Strombörse EEX in Leipzig im jeweils vorangegangenen Quartal. Dieser Preis betrug z. B. im 1. Quartal 2014 3,35 Cent/kWh (Abb. 13).

Weist der Betreiber der KWK-Anlage dem Netzbetreiber einen Dritten nach, der bereit ist, den eingespeisten KWK-Strom zu kaufen, so ist der Netzbetreiber verpflichtet, den KWK-Strom vom Betreiber der KWK-Anlage zu dem vom Dritten angebotenen Strompreis abzunehmen. Der Dritte ist verpflichtet, den KWK-Strom zum Preis seines Angebotes an den Betreiber der KWK-Anlage vom Netzbetreiber abzunehmen. Diese Möglichkeit des KWK-Stromvertriebs wird von den KWK-Betreibern trotz der wesentlich höheren Erlöse als an der Strombörse kaum genutzt, weil der Anlagenbetreiber ein kostenträchtiges Bilanzkreissystem entwickeln muss. Inzwischen haben sich Unternehmen diesem Geschäftsmodell angenommen. Sie bieten als Stromanbieter KWK-Strom an, der der BHKW-Erzeugung entspricht [8].



■ **Abb. 13:** Quartalspreise für Baseload-Strom an der EEX

Die Zuschläge für den KWK-Strom müssen sowohl für den eingespeisten als auch den selbst genutzten oder verkauften Strom vom Netzbetreiber bezahlt werden.

Zuschläge für Neu- und Ausbau von **Wärme- und Kältenetzen (§ 7a)**:

- für neu verlegte Leitungen mit einem mittleren Nenndurchmesser bis zu 100 mm: 100 Euro je laufender Meter der neu verlegten Wärme- oder Kälteleitung, höchstens aber 40 % der ansatzfähigen Investitionskosten,
- für neu verlegte Leitungen mit einem mittleren Nenndurchmesser von mehr als 100 mm: 30 % der ansatzfähigen Investitionskosten des Neu- oder Ausbaus.

Zuschläge für Neu- und Ausbau von **Wärme- und Kältespeicher (§ 7b)**:

- 250 Euro pro Kubikmeter Wasseräquivalent des Speichervolumens, bei Speichern mit einem Volumen von mehr als 50 Kubikmeter Wasseräquivalent höchstens aber 30 % der Investitionskosten.

Ein Anreiz durch das KWK-Gesetz besteht auf der Verdrängung des (in kleineren Objekten vergleichsweise teuren) Strombezugs. Die Möglichkeit des Verkaufs des dann noch vorhandenen Überschussstroms wird aber aus Kostengründen kaum genutzt. Vielmehr führen die unter dem Erdgas liegenden niedrigen Preise an der Strombörse dazu, dass die »Edelenergie« Strom mittels Heizschwertern in Heizungspufferspeichern zu Wärme vernichtet wird. Eine zusätzliche Marktpremie wie im EEG kennt das KWK-Gesetz nicht.

1.3.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das zuletzt zum 01.01.2012 geänderte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird zum 01. August 2014 grundlegend überarbeitet (»EEG 2014«). Es regelt den vorrangigen Anschluss von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien und aus Grubengas. Das EEG

verfolgt das Ziel, den Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2025 auf 40–45 %, auf 55–60 % bis 2035, und auf 80 % bis 2050 zu erhöhen.

Die Mehrkosten durch das EEG werden nicht vom Staat, sondern von der Gesamtheit der Stromverbraucher getragen. Der Anteil des EEG-Stroms lag 2013 bei rd. 25 %, der durchschnittliche Wert bei 17 Cent/kWh [2].

Die Biomassenutzung ist seit dem 01.01.2014 stark eingeschränkt worden. Es werden nur noch Anlagen bis zu einer Größe von 750 kW gefördert. Weiterhin wird der Strom nur vergütet, wenn er zu mindestens 60 % in KWK erzeugt wird und der Mais höchstens einen Anteil von 60 % hat. Durch diese Einschränkungen ist der Bau neuer Biogasanlagen nahezu zum Erliegen gekommen. Ferner wird ein Bonus von 3 Cent/kWh für die Verstromung von Gas, das auf Erdgasniveau aufbereitet wurde, gezahlt. Die Vergütungssätze für eine Verstromung von Biogas, Holz und Bioabfällen in KWK-Anlagen sind in der Abb. 14 zusammengefasst.

Das EEG bietet auch für Biogasanlagen an Stelle der festen Vergütungssätze die Möglichkeit den Strom direkt zu vermarkten. Dann bekommt der Anlagenbetreiber eine Marktprämie und eine zusätzliche Managementprämie. Die Marktprämie soll einen Anreiz für EEG-Anlagenbetreiber liefern, ihre Anlagen marktorientiert so zu betreiben, dass bei einer hohen Nachfrage auch die Einspeisung groß ist. Zu diesen Zeiten ist auch der Preis an der Strombörse hoch. Es wird bezweifelt, dass das Marktprämienmodell zu einem verstärkten Ausbau von Biogasanlagen führt, auch wenn es kurz nach der Einführung im Januar 2012 von Biogas-Anlagenbetreibern mit insgesamt über 2000 MW erfolgreich genutzt wurde.

Für Biogasanlagen ist im EEG neben der Marktprämie eine zusätzliche sogenannte »Flexibilitätsprämie« vorgesehen, die zu Investitionen in größere Gasspeicher und Generatoren und damit zur Erhöhung der bedarfsorientierten Stromproduktion aus Biomasse führen soll. Mit der Flexibilitätsprämie wird die Bereitstellung zusätzlicher regelbarer installierter Leistung für eine bedarfsorientierte Stromerzeugung gefördert, wobei die insgesamt genehmigte Ausgangsleistung gleich bleibt. Voraussetzung für die Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie

| Anlagengröße | bis 75 kW | bis 150 kW | bis 500 kW | bis 750 kW |
|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Biogasverstromung | | | | |
| Grundvergütung 2012 | | 14,3 | 12,3 | 11,0 |
| Gülle-Bonus (mind. 80 %-Anteil) | 25 | | | |
| Zusatzvergütung bei Mais | | 6 | 6 | 5 |
| Gasaufbereitungsbonus | | 3 | 3 | 3 |
| Holzverstromung | | | | |
| Grundvergütung 2012 | | 14,3 | 12,3 | 11,0 |
| Zusatzvergütung bei Kurzumtriebs-Pflanzen u. Waldrestholz | | 6 | 6 | 5 |
| Zusatzvergütung bei Landschaftspflegematerial | | 8 | 8 | 8 |
| Vergärung von Bioabfällen | | 16,0 | 16,0 | 14,0 |

■ **Abb. 14:** Vergütungssätze nach dem EEG für die Verstromung von Biogas, Holz und Bioabfällen in KWK-Anlagen in Cent/kWh; ab 2013 beträgt die jährliche Absenkung 2 %

sind die Teilnahme an der Direktvermarktung sowie eine Anmeldung bei der Bundesnetzagentur.

Die Anforderungen für die Direktvermarktung sind gemäß EEG hoch. So muss der vermarktete Strom in viertelstündlicher Auflösung gemessen und bilanziert werden. In der EEG-Novelle 2014 ist vorgesehen, dass der Strom aus Biogasanlagen ab 01.08.2014 grundsätzlich verpflichtend direkt vermarktet werden muss [2]. Die Ausbaurate ist zudem langfristig auf 100 MW/Jahr begrenzt.

1.3.5 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – (EEWärmeG)

Eigentümer von Gebäuden, die neu gebaut werden, müssen ihren Wärmebedarf ab 01.01.2009 anteilig mit erneuerbaren Energien decken. Diese Nutzungspflicht trifft alle Eigentümer, egal ob Private, Staat oder Wirtschaft. Das gilt auch, wenn die Immobilie vermietet wird. Genutzt werden können alle Formen von erneuerbaren Energien. Wer keine erneuerbaren Energien einsetzen will, kann ersatzweise andere klimaschonende Maßnahmen ergreifen: Eigentümer können ihr Haus stärker dämmen, Wärme aus Fernwärmenetzen beziehen oder Wärme aus KWK-Anlagen nutzen, wenn diese einen Anteil von 50 % am Wärmebedarf deckt.

Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) soll dazu beizutragen, den Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme (Raum-, Kühl- und Prozesswärme sowie Warmwasser) bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen. Seine Auswirkungen auf die KWK dürften gering sein, weil die KWK hier nur eine Ersatzmaßnahme darstellt und damit in Konkurrenz zu anderen Technologien der Wärmebereitstellung steht. Auch die Ausdehnung des Begriffs »Wärme« auf Wärme und Kälte im Jahr 2012 dürfte daran nichts ändern, auch wenn BHKW für eine Kälteerzeugung mittels Ad- und Absorptionskältemaschinen hervorragend geeignet sind.

1.3.6 Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die seit 01.02.2002 geltende »Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden« (EnEV) wurde in mehreren Schritten reformiert. Die Fassung 2013, die am 01.04.2014 in Kraft trat läuft auf eine weitere Verschärfung der Anforderungen bzw. eine Reduzierung des Wärmebedarfs hinaus. KWK-Systeme spielen in der EnEV eine besondere Rolle, weil ihnen der Vorteil des KWK-Prinzips bei der Berechnung des Primärenergiebedarfes angerechnet wird. Die Anforderung an den Wärmeschutz, bestimmte U-Werte für das gesamte Gebäude einzuhalten, ändern sich dadurch nicht.

Die EnEV mit der Vergünstigungsklausel für KWK-Systeme hat bisher nicht dazu geführt, dass Bauherren sich vermehrt für BHKW entschieden haben. Dazu ist der wirtschaftliche Vorteil, der sich aus der EnEV ergibt für die KWK auch viel zu gering.

1.3.7 Sonstige Gesetze und Regelwerke

Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetz (TEHG)

Das TEHG geht auf eine EU-Richtlinie zurück und begann am 01.01.2005. Ziel ist es, den Ausstoß der Industrie an Kohlendioxid so zu senken. Die KWK stellt dabei hinsichtlich Kosten und Minderungsvolumen eine wichtige Option der CO₂-Vermeidung dar. Damit kommt den

KWK-Anlagen im EU-Emissionshandelssystem eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt sowohl für die KWK in der öffentlichen Fernwärmeversorgung als auch für die industrielle KWK. KWK-Anlagen die dem TEHG unterliegen werden im KWK-Gesetz bei den Vergütungssätzen speziell aufgeführt. Danach beträgt für die Anlagen über 2 MW seit 01.01.2013 der Zuschlag 2,1 Cent/kWh. Die zusätzlichen Emissionsberechtigungen für KWK-Betreiber sind so gering, dass niemand aus diesem Grund in die KWK investiert oder die bestehenden Anlagen besser auslastet.

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) ist seit 01.10.2002 in Kraft. Damit wird den Behörden ein modernes Instrument zur Luftreinhaltung an die Hand gegeben, welches zugleich zu mehr Rechtssicherheit und damit Planungssicherheit bei der Genehmigung von Anlagen führt. Sie konkretisiert die Anforderungen, die bei der Genehmigung von industriellen und gewerblichen Anlagen von den zuständigen Vollzugsbehörden zu beachten sind.

Eine besondere Hürde oder gar eine Behinderung der KWK-Markteinführung durch die Grenzwerte besteht nicht und wird auch nicht erwartet. Die Grenzwerte folgen mehr dem Stand der Technik als dass sie neue Technologien anregen. Bei der Diskussion um Grenzwerte muss immer berücksichtigt werden, dass BHKW deutlich niedrigere Emissionen haben als die ungekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung (Abb. 3).

Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) ist wie die TA Luft eine Verwaltungsvorschrift nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [9]. Die Grenzwerte sind ein »Muss« für die Anlagenhersteller und gelten auch für nichtgenehmigungsbedürftige Anlagen wie z.B. kleine BHKW, wobei die »Vorbelastung« berücksichtigt werden muss.

Die meisten BHKW-Kompaktmodule mit einer Schallschutzkapsel und einem zusätzlichen Abgasrohrschalldämpfer halten die Grenzwerte für den Außenbereich ein. Den Geräuschübertragungen und Körperschallübertragungen innerhalb von Gebäuden ist ein besonderer Stellenwert beizumessen. Da es sich bei BHKW mit Verbrennungsmaschinen um Hubkolbenmotoren handelt, sollten Beeinträchtigungen durch Lärm und Körperschall innerhalb des Gebäudes (u. a. in den Räumen direkt über dem BHKW-Aufstellungsraum) ausgeschlossen werden. Dass es sich bei der TA Lärm um eine die BHKW-Entwicklung hemmende Vorschrift handelt, ist nicht zu erkennen. Auch die Kosten für den Schallschutz halten sich in Grenzen.

EU-Gebäuderichtlinie und EU-Richtlinie »KWK im Energiebinnenmarkt«

Die EU sieht die KWK zwar als Mittel zur Energieeinsparung, bemerkt aber auch, dass das KWK-Potenzial in der Gemeinschaft nicht voll genutzt wird. Die EU versucht daher, durch verschiedene Richtlinien die Rahmenbedingungen für die KWK zu verbessern und den Wettbewerb auf dem Strombinnenmarkt zu stärken.

Seit 01.01.2003 ist die EU-Richtlinie 2002/91/EG zur Energieeffizienz von Gebäuden in Kraft. Sie ist in Form der EnEV und der damit verbundenen DIN-Vorschriften in nationales Recht umgesetzt worden. Neben den von den Mitgliedsstaaten zu konkretisierenden Mindestanforderungen an Gebäude ist bei neuen Gebäuden mit einer Gesamtnutzfläche von mehr als 1000 m² zu gewährleisten, dass die technische, wirtschaftliche und ökologische Einsetzbarkeit alternativer Systeme, wie u. a. die KWK vor Baubeginn zu berücksichtigen ist. Ebenso muss der positive Einfluss der »Elektrizitätsgewinnung durch die KWK« berücksichtigt werden.

Hier bietet sich vor allem für Planungsbüros die Chance das KWK-Potenzial im Wohnungsbe-
reich auszuschöpfen.

In einer zweiten Richtlinie kommt die Zielsetzung bereits deutlich im Titel zum Ausdruck: **Richtlinie über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten KWK im Energiebinnenmarkt**. Diese Richtlinie hat die Bundesregierung in Form des KWK-Gesetzes in nationales Recht umgesetzt [7]. Als »hocheffizient« gilt eine KWK-Anlage über 1 MW_{el} laut der EU-Richtlinie, wenn sie mindestens eine Primärenergieeinsparung von 10 % gegenüber den Werten einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung ergibt. Anlagen unter 1 MW_{el} gelten ebenfalls als hocheffizient, wenn sie überhaupt eine Primärenergieeinsparung bringen. Geht man von durchschnittlichen Verhältnissen in Deutschland aus, so liegen die Einsparungen durch den Einsatz von BHKW zwischen 25 und 40 % (Abb. 2), sie sind also alle »hocheffizient« und erfüllen damit leicht die eher schwache Anforderung einer »hocheffizienten« KWK-Anlage.

1.4 Förderprogramme

Außer der Förderung nach dem KWK-Gesetz (Kap. 1.3.3) für BHKW, Wärme- und Kältenetze sowie Wärme- und Kältespeicher gibt es seit dem 01.04.2012 auch Investitionszuschüsse für BHKW bis 20 kW_{el}. Mit diesem Programm will die Bundesregierung zusätzliche Impulse für den breiten Einsatz besonders von kleinen KWK-Anlagen geben. Die Fördersätze je installierter kW_{el} sind für die jeweiligen Leistungsbereiche wie folgt festgelegt:

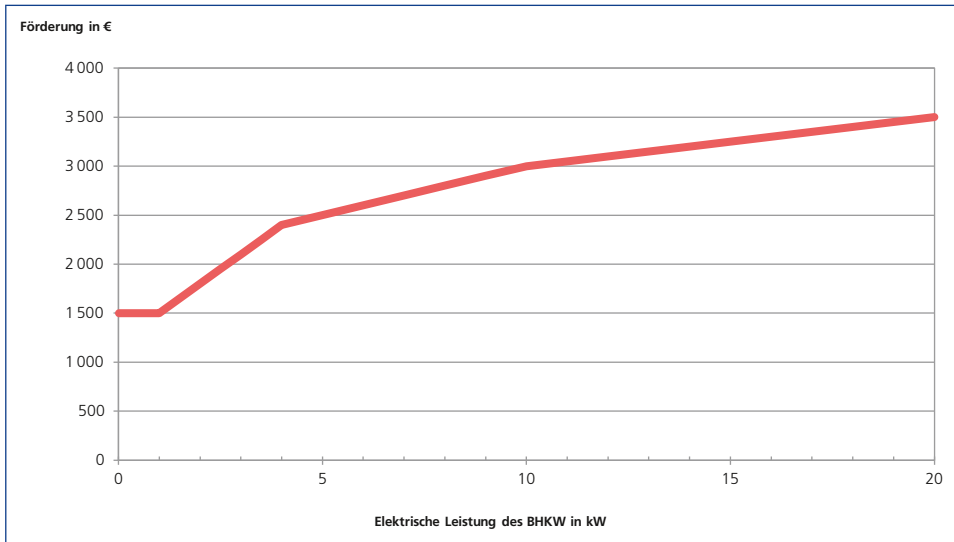
| Leistung Min. (kW) | Leistung Max. (kW) | Förderbetrag in Euro je kW _{el} kumuliert über die Leistungsstufen |
|--------------------|--------------------|---|
| > 0 | <= 1 | 1 500 |
| > 1 | <= 4 | 300 |
| > 4 | <= 10 | 100 |
| > 10 | <= 20 | 50 |

■ **Abb. 15:** Förderung von BHKW bis 20 kW_{el}

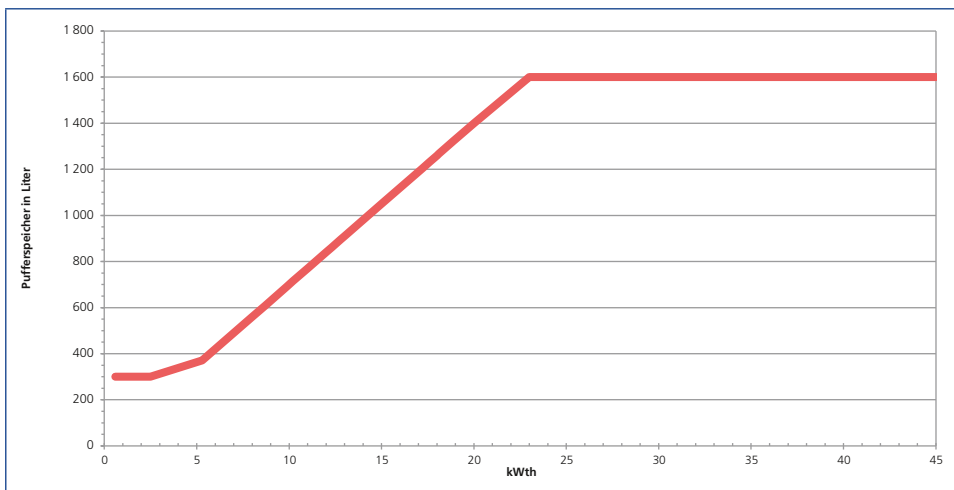
Die Fördersätze sinken ab dem 01.01.2014 jährlich um 5 %. Als Beispiel wird ein BHKW mit 19 kW_{el} gewählt. Für dieses BHKW berechnet sich eine Förderung von 3 450 Euro (1 · 1 500 + 3 · 300 + 6 · 100 + 9 · 50). Abb. 16 kann die Förderung in Abhängigkeit von der Größe des BHKW entnommen werden.

Primäre Fördervoraussetzung ist, dass die KWK-Anlage in der Liste der förderfähigen Anlagen des BAFA (bafa.de) enthalten ist. Damit sind die Anforderungen an den Gesamtnutzungsgrad und die Primärenergieeinsparung erfüllt. Weitere Anforderungen sind u.a. das Vorhandensein eines Wartungsvertrages, eines Wärmespeichers, einer Steuerung und Regelung für eine wärme- und stromgeführte Betriebsweise inklusive eines intelligenten Wärmespeicher-managements sowie eines Messsystems zur Bestimmung des aktuellen Strombedarfs (Smart Meter) für Anlagen ab 3 kW_{el}.

Die Größe des Wärmespeichers (Pufferspeicher) richtet sich nach der thermischen Leistung des BHKW (Abb. 17). Die Größe des Pufferspeichers ist als Mindestgröße zu verstehen, der für einen stromoptimierten Betrieb eher zu klein ausgelegt ist (Kap. 3.1.3).



■ **Abb. 16:** Förderung von BHKW bis 20 kW_{el} in Abhängigkeit von der Größe



■ **Abb. 17:** Größe des erforderlichen Pufferspeichers im Rahmen der Förderung von BHKW bis 20 kW_{el}

Es wird angezweifelt, ob das Förderprogramm für BHKW der KWK im Wohnbereich zu einem Durchbruch verhelfen wird. Als Hemmnis dürfte sich der Wartungsvertrag erweisen. Damit wird die preiswertere Service-Eigenleistung oder die Inanspruchnahme von Fachhandwerkern unterbunden.

Außer dem genannten Förderprogramm des Bundes gibt es noch Förderprogramme, die unter anderem auch KWK-Anlagen durch Zuschüsse oder günstige Kredite fördern. Dazu zählen das KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm und auch Förderprogramme auf Landes- oder Kommunalebene (z. B. Thüringen, Hannover). Auch spezielle KWK-Techniken werden in

Landesprogrammen wie z. B. die Entwicklung und Demonstration der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik – schon seit 15 Jahren in NRW – gefördert. Nicht alle Förderprogramme laufen so lange oder sind so gut ausgestattet. Bei einer flächendeckenden starken Inanspruchnahme werden die Förderprogramme sehr rasch gekürzt oder einfach nicht verlängert. Eine aktuelle Übersicht zu BHKW-Förderprogrammen bietet der BINE Informationsdienst im Internet unter www.energiefoerderung.info.

1.5 Forschungsförderung

Die politische Vorgabe des Energiekonzepts der Bundesregierung erfordert die Energieeinsparung auf allen Ebenen der Energiebilanz – von der Energiegewinnung über die Energieumwandlung und den -transport bis zur Energienutzung durch die Endverbraucher. Entsprechend breit ist auch die Förderung von Forschung und Entwicklung durch den Bund – vorwiegend das BMWi – aufgestellt. Dies betrifft vor allem die Energieeffizienztechnologien, darunter auch die KWK, und ihre Integration in zukünftige Netze, Anlagen- und Versorgungssysteme.

1.5.1 Das E-Energy Programm: Smart Grids made in Germany

Eine wichtige Rolle spielen gesonderte Förderinitiativen wie das inzwischen abgeschlossene E-Energy Programm. Es zeigt in sechs Modellregionen, wie das große Optimierungspotenzial der Informations- und Kommunikationstechnologien für mehr Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit in der Stromversorgung genutzt werden kann. In Bezug auf die KWK geht es dabei nicht nur um eine intelligente Steuerung von BHKW, sondern auch um eine sinnvolle Netzintegration und die Möglichkeiten, den Verbraucher durch variable Preise für ein Lastmanagement zu gewinnen. Denn als Folge wird seine Stromrechnung durch ein geändertes Nutzerverhalten sinken. In Zusammenhang mit der KWK sind nachfolgend einige wichtige Projekte der Forschungsförderung des Bundes genannt.

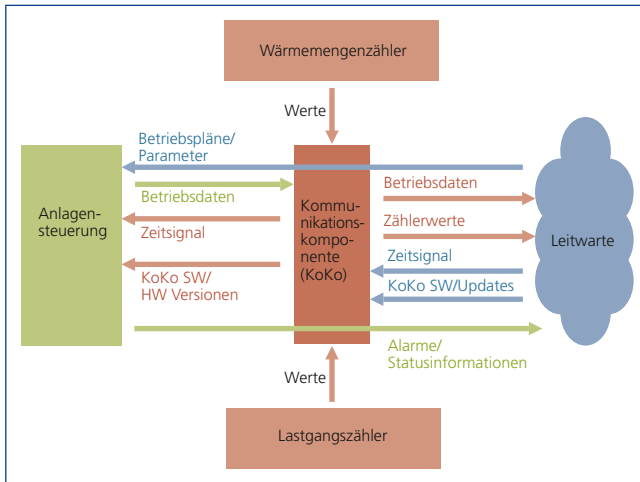
E-Energy Modellstadt Mannheim

Im Projekt »Modellstadt Mannheim« wird in einem begrenzten Versorgungsgebiet untersucht, wie der dezentral erzeugte Strom aus Sonne, Wind und KWK intelligent verteilt und nahe am Ort der Erzeugung verbraucht wird. In einem weiteren Schritt wird analysiert, wie der Verbraucher auf Preissignale (per SMS oder E-Mail) reagiert und durch sein Verhalten zum Lastmanagement beiträgt. Auch der gezielte Einsatz kleiner Stromerzeuger oder Speicher durch variable Einspeisevergütungen wird die Stromversorgung in Zukunft flexibler, sicherer, effizienter und langfristig bestimmt auch kostengünstiger machen [10].

1.5.2 Weitere Projekte der Bundesenergieforschung

BHKW intelligent steuern

Die Leitwarte des Energiedienstleisters Lichtblick steuert per Funkkontakt 800 BHKW mit 20 kW_{el}, die über ganz Deutschland verteilt sind. Die einzelnen BHKW kommen nur wenige Stunden des Tages zum Einsatz. Durch die geschickte Dimensionierung der thermischen Leistung auf 36 kW und den Einsatz eines Pufferspeichers und evtl. eines Spitzenlastkessels kann der Wärmebedarf immer vorrangig gedeckt werden. Die BHKW werden eingeschaltet, wenn



■ **Abb. 18:** Datenfluss im virtuellen Kraftwerk von Lichtblick

die Strompreise an der Börse hoch sind. Die Strompreise an der Börse könnten mit einem neu entwickelten Prognoseverfahren über mehrere Tage ziemlich gut vorhergesagt werden, wobei zu jeder Zeit eine Anpassung an aktuelle Änderungen der Preisstruktur möglich ist. Die Steuerung der BHKW beruht auf einem Softwaresystem, das mit den einzelnen Anlagen kommuniziert und alle zur optimierten Einsatzplanung nötigen Informationen sendet und empfängt. Der entsprechende Datenfluss ist in der Abb. 18 dargestellt [11].

Smart Meter

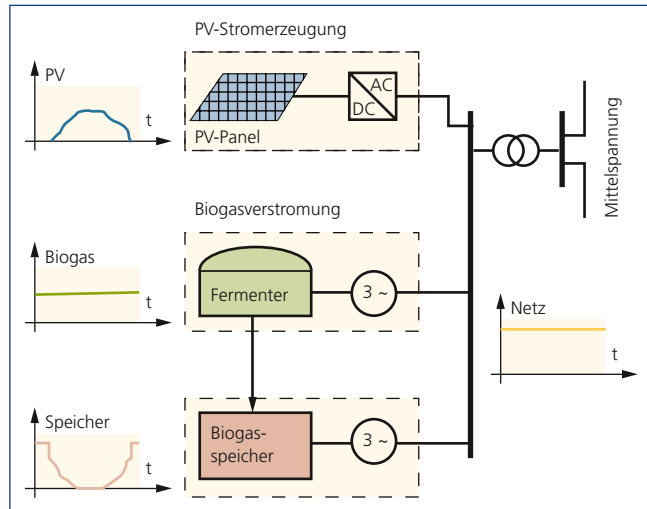
Neue standardisierte elektronische Stromzähler (Smart Meter) übernehmen die Funktion eines Steuerungs- und Informationsknotenpunkts. Mit ihnen lassen sich die aktuellen Verbrauchsdaten dazu nutzen, je nach Stromangebot und Netzbelastung Stromverbraucher und Stromerzeugungsanlagen zu steuern. Sie sind Voraussetzung für die Nutzung flexibler last- und angebotsabhängiger Tarife, die seit 2010 vom EnWG gefordert werden [12].

In einem Feldtest wurden 40 Haushalte dazu bewegt, ihren Verbrauch in die Zeiten hoher Erzeugung zu verlagern. Den Anreiz dazu boten preisvariable Tarife, die den Strom immer dann preiswert anbieten, wenn das Stromangebot aus Wind- und Sonnenenergie im Verhältnis zum Stromverbrauch hoch ist. Die Feldtest-Haushalte bekamen zwei zusätzliche Geräte, um den neuen 9-stufigen Tarif testen zu können: einen intelligenten Stromzähler (Smart Meter), der den aktuellen Stromverbrauch viertelstundengenau erfassen kann, und eine Steuer- und Informationsgerät, das am Fraunhofer IWES entwickelte BEMI. Es gibt preisabhängig die vom Kunden vorgesehenen Haushaltsgeräte frei. So kann z.B. die Geschirrspülmaschine so programmiert werden, dass sie dann startet, wenn der Strom günstig verfügbar ist. Zusätzlich erhielten die Feldtest-Haushalte über das Internet Zugang zu einem neu entwickelten Marktplatz. Dort ließ sich für jeden Haushalt jederzeit nachvollziehen, wie sich Strompreis, Stromeinspeisung und Stromverbrauch zueinander verhalten. Der eigene Stromverbrauch konnte analysiert und die preisstufengenaue Stromrechnung eingesehen werden [13].

Neue Verteilnetze

Ziel des Forschungsprojekts »Netze für die Stromversorgung der Zukunft« waren die Entwicklung, die wirtschaftlich-technische Analyse und die Demonstration innovativer Netz-

■ **Abb. 19:** Bedarfsgerechte Einspeisung von Biogasstrom



konzepte als Basis für Smart Grids. Dies soll mehr dezentrale Erzeugung am bestehenden Netz ermöglichen. Hinzu kommen neue Komponenten, z. B. auf Leistungselektronik basierende Spannungsregler sowie ein intelligenter Leitungsbau. Der Fokus lag dabei auf dem Verteilnetz bis hin zum Kundenanschluss. Um eine gleichmäßigere Belastung des Netzes zu erreichen, wurde in einem Feldversuch ein Gas-Zwischenspeicher an einer Biogasanlage eingesetzt. Die Kopplung des Biogasspeichers an die Stromeinspeisung aus regenerativen Quellen gleicht Schwankungen im Stromnetz aus. Mit einem Wirkungsgrad von 98 % wird so regenerativer Strom speicherbar. Das Biogas-BHKW speist nur dann ein, wenn zu wenig Strom aus Photovoltaik oder Wind zur Verfügung steht (Abb. 19) [14].

1.5.3 Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze (EnEff:Wärme)

Die Bereitstellung, Verteilung und Nutzung von Nah- und Fernwärme erfordert Leitungsnetze, die im Vergleich zu anderen Versorgungsnetzen wesentlich vielschichtiger, technisch aufwendiger und im Betrieb komplexer zu handhaben sind. Die klassische Fernwärmeversorgung konzentriert sich vorwiegend auf den Ausbau in Siedlungsgebieten mit hoher Dichte an Mehrfamilienhäusern. Dabei kommen überwiegend KWK-Techniken zum Einsatz (Heizkraftwerke, BHKW, Müll- oder Biomasseheizkraftwerke). Dagegen finden Nahwärmesysteme nicht nur im Neubau Anwendung, sondern auch im Bestand unter Einbeziehung größerer kommunaler und gewerblicher Objekte. Neben den Verlegekosten dieser Netze ist der Anschlussgrad der entscheidende Faktor für die Konkurrenzfähigkeit der Nah- und Fernwärme. Neben innovativen Konzepten werden Planung, Organisation und Optimierung in Energiewirtschaft, Nah- und Fernwärme immer wichtiger. Und: Eine Steigerung der Energieeffizienz ist nur zu erreichen, wenn Optionen der industriellen Abwärme-Nutzung und Kooperativen Kraft-Wärme-Kopplung in einer ganzheitlichen Systembetrachtung berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund geht es in der BMW-Forschungsinitiative EnEff:Wärme um neue Netzkonzepte und die Entwicklung innovativer Technologien und Planungsinstrumente. Sie sollen die Wärmeversorgung energetisch, wirtschaftlich und ökologisch deutlich verbessern. Dazu wurden seit 2007 zahlreiche Projekte gestartet. Aktuelle Themen und beispielhafte

Projekte mit KWK-Bezug werden in Kapitel 9 »Neue Forschungstrends: KWK-Projekte der Förderinitiative EnEff:Wärme« aufgeführt.

1.6 Hemmnisse

Die in Kapitel 1.3 und 1.4 genannten gesetzlichen Bestimmungen, die allesamt auch eine Förderung der KWK und speziell der BHKW beinhalten, sind in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten und Einzelbestimmungen nur schwer nachvollziehbar. Damit liegt u. a. das riesige Potenzial kleiner Anwender brach, weil es auch unter »Fachleuten« nur wenige gibt, die bei Investitionssummen von oftmals unter 20 000 Euro entsprechende Aufklärungsarbeit leisten können und wollen. Dies ist umso problematischer, als es für einen verstärkten Einsatz von BHKW außerdem noch zahlreiche Hemmnisse gibt, die selbst bei prinzipiell erreichbarer Wirtschaftlichkeit die Durchsetzung am Markt **behindern** bzw. gänzlich **verhindern**.

Zu nennen sind hier in erster Linie die heute noch recht aufwendigen Verfahren zum Einholen von Genehmigungen und Erlaubnissen, die sich insbesondere bei Klein-BHKW negativ auswirken. Oft ist auch bei kleinen Anlagen eine Baugenehmigung erforderlich, da sie nur in manchen Bundesländern in der Bauordnung von der formellen Antragstellung freigestellt sind. Zudem muss jeder Betreiber eines BHKW derzeit vor Inbetriebnahme eine Erlaubnis des zuständigen Hauptzollamts zur Verwendung von steuerbegünstigtem Brennstoff einholen, während die Gewährung der gleichen Steuervergünstigung für den oft im gleichen Raum stehenden Heizkessel eine Selbstverständlichkeit ist, für die es keines formellen Verfahrens bedarf.

Durch den Antrag auf Energiesteuererstattung sowie die Befreiung von der Stromsteuer ist das Verfahren bei den Hauptzollämtern immer noch viel zu kompliziert und wirkt mit der Vielzahl von Formularen, Auflagen und Kontrollen abschreckend auf potenzielle Betreiber. Andererseits handelt es sich aber um Beträge, die die Wirtschaftlichkeit gerade eines kleinen BHKW erheblich beeinflussen. Ein Klein-BHKW mit 5 kW_{el}, das 6 000 Stunden im Jahr läuft, spart durch die Strom- und die Energiesteuererstattung 1 300 Euro.

Auch das KWK-Gesetz fordert einen zusätzlichen Antrag beim BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, bafa.de), wenn für Anlagen unter 50 kW_{el} der Bonus von 5,4 Cent/kWh gezahlt werden soll. Bei Anlagen über 2 MW ist noch ein Sachverständigen-gutachten notwendig, wenn die Anlage kein Serienprodukt ist.

Der genannte hohe Verwaltungsaufwand und die Bürokratie sind für die potenziellen Investoren – Wohnungswirtschaft, Kommunen und Industrie – und Gewerbebetriebe das größte Hemmnis. Es wird in der Abb. 20 jeweils als erstes genannt. Die weiteren Hemmnisse werden in abnehmender Bedeutung aufgeführt.

Darüber hinaus partizipieren BHKW notgedrungen an den Elektrizitätsmärkten. Diese wurden zwar für den Wettbewerb geöffnet, doch vor allem das Netzmonopol mit einem komplizierten Regulierungssystem verschafft dem jeweiligen Betreiber (und Stromversorger) eine sehr starke Stellung gegenüber dem Betreiber eines BHKW. Gerade bei kleineren BHKW sind die potenziellen Anwender im Verhältnis zu den Unternehmen der Versorgungswirtschaft ökonomisch schwächer und auf diesem Gebiet meist unerfahren. Deshalb können sie sich aufwendige Verhandlungen oder gar juristische Auseinandersetzungen um Rechtsauslegungen über die Reststromversorgung, Netznutzungsentgelte, technische Anschlussbedingungen und

Direktvermarktung kaum leisten – zumal im Zusammenhang mit einer BHKW-Investition, die zur Aufrechterhaltung ihrer Versorgung mit Wärme und Strom nicht zwingend erforderlich ist, sondern die »nur« der Energieeinsparung und damit dem Klimaschutz dient und die ansonsten – vielleicht – einen mäßigen wirtschaftlichen Ertrag bringt.

Durch das bestehende Energierecht wird theoretisch die Möglichkeit eingeräumt, den Stromlieferanten, aber auch den Abnehmer von BHKW-Strom frei zu wählen. In der Praxis werden aber meist diskriminierende Konditionen für die Bereitstellung von Reserve- und Zusatzstrom beim jeweiligen Gebietsversorger und hohe Netznutzungsentgelte für die Stromlieferung an einen auch nahe gelegenen Abnehmer festgestellt. Die Direktvermarktung ist zwar im Gesetz vorgesehen, aber noch lange nicht standardisiert (Kap. 6.4.1).

Derzeit ökonomisch interessant – und auch durch die Bundesnetzagentur technisch und energierechtlich abgesichert – ist die Belieferung der Nutzer in größeren Wohnanlagen mit KWK-Strom. Allerdings kommt es in Eigentums-Wohnanlagen und in Mietwohnungsgebäuden selten zu einer Einigung, weil es noch keine einfachen Vertragslösungen gibt. Die Transaktionskosten sind zu hoch und eine tragfähige Regelung scheitert an den unterschiedlichen Zielvorstellungen von Investor und Nutzer. In Kap. 6.3 werden verschiedene Betriebs- und Vermarktungskonzepte dargestellt, die eher einen fairen Kompromiss für beide Seiten erwarten lassen.

| Hemmnisse in der Wohnungswirtschaft | |
|--|--|
| 1 | Hoher Verwaltungsaufwand und Bürokratie (z.B. Kalkulierbarkeit von Steuern, Abgaben, Netzentgelte, Reststrombedarf, Direktvermarktung) |
| 2 | Zu hohe Investitionskosten |
| 3 | Mietrecht |
| 4 | mangelnde Bekanntheit bei Kunden führt zu hohem Akquisitionsaufwand |
| 5 | Förderstruktur (Energiesteuer, KWKG, Impulsprogramm, KfW) zu komplex |
| 6 | problematische Eigenstromnutzungsmöglichkeit |
| 7 | EEG-Umlage für Contractoren |
| 8 | Entscheidungswege bei WEG sehr zeitintensiv |
| 9 | Unsicherheit durch Gesetzesänderungen |
| 10 | Mangel an qualifizierten Handwerkern |
| Hemmnisse in den Kommunen | |
| 1 | Hoher Verwaltungsaufwand und Bürokratie (z.B. Kalkulierbarkeit von Steuern, Abgaben, Netzentgelte, Reststrombedarf, Direktvermarktung) |
| 2 | EEG-Umlage für Contractoren |
| 3 | Unsicherheit durch Gesetzesänderungen |
| 4 | Förderstruktur (Energiesteuer, KWKG, Impulsprogramm, KfW) zu komplex |
| 5 | Zu hohe Investitionskosten |
| 6 | politische und ökologische Bewertung unsicher |
| 7 | mangelnde Bekanntheit bei Kunden führt zu hohem Akquisitionsaufwand |
| 8 | Anschluss- und Benutzungszwang an Fernwärme |
| 9 | Förderung zu gering (insbesondere zu geringe EEX-Einspeisung, zu geringe Investitionszuschüsse) |
| 10 | Mangel an qualifizierten Handwerkern |
| Hemmnisse in der Industrie/Gewerbe | |
| 1 | Hoher Verwaltungsaufwand und Bürokratie (z.B. Kalkulierbarkeit von Steuern, Abgaben, Netzentgelte, Reststrombedarf, Direktvermarktung) |
| 2 | Unsicherheit durch Gesetzesänderungen |
| 3 | EEG-Umlage für Contractoren |
| 4 | Förderstruktur (Energiesteuer, KWKG, Impulsprogramm, KfW) zu komplex |
| 5 | mangelnde Bekanntheit bei Kunden führt zu hohem Akquisitionsaufwand |
| 6 | Zu hohe Investitionskosten |
| 7 | politische und ökologische Bewertung unsicher |
| 8 | Große Unternehmen ohne Fördermöglichkeit |
| 9 | Mangel an qualifizierten Handwerkern |
| 10 | problematische Eigenstromnutzungsmöglichkeit |

■ **Abb. 20:** Bewertung der 10 wichtigsten Hemmnisse bei der Umsetzung der KWK im Bereich der Wohnungswirtschaft, der Kommune und der Industrie/Gewerbe bei einer Umfrage von Fachleuten im Rahmen der Mini-KWK-Konferenz am 21.11.2013

2 Von der KWK zum BHKW

2.1 Die Grundidee der Kraft-Wärme-Kopplung

70 % der Stromerzeugung in Deutschland kommen auch heute noch aus großen Wärmekraftwerken, die den Dampfkraftprozess nutzen. Aus der Brennstoff- oder der Kernenergie wird Dampf erzeugt, der eine Dampfturbine mit einem Generator zur Stromerzeugung antreibt.

Seit dem Beginn der Stromerzeugung wurde schon immer versucht, aus dem Brennstoff möglichst viel Strom zu gewinnen. Dem sind jedoch durch den Carnot-Wirkungsgrad ($\eta_C = 1 - T_U / T_O$, untere und obere Temperatur des Kreisprozesses) physikalische Grenzen gesetzt. Es können in der Praxis nur etwa 40 % Strom aus 100 % Brennstoffenergie gewonnen werden. Bei Kernkraftwerken sind es sogar nur 33 %. Der Rest von 60 bzw. 67 % ist Abwärme, die nutzlos die Flüsse und die Atmosphäre erwärmt. Es liegt daher nahe, diese Abwärme, die etwa dem gesamten Energiebedarf der deutschen Haushalte entspricht, irgendwie zu nutzen. Dem stehen aber vier entscheidende Hemmnisse gegenüber:

- Die Abwärme fällt bei einer für die Raumheizung nicht nutzbaren Temperatur von ca. 10 bis 35 °C an,
- die Abwärme fällt konzentriert in mehreren 100 MW oder sogar Tausenden MW am Kraftwerksstandort an, wo nicht genügend oder gar kein Wärmebedarf in dieser Größenordnung vorhanden ist,
- ein Transport von Wärme in Form von Heißwasser (Fernwärme) stößt rasch an wirtschaftliche Grenzen. Transportwege über 10 km sind sehr selten,
- der Dampfkraftprozess verspricht eine deutlich geringere Stromausbeute als z. B. die Auskoppelung der Wärme aus einem Motor-Generator-Prozess.

Um die Abwärme eines Dampfkraftprozesses zu nutzen, muss der Dampf bei höheren Temperaturen entnommen oder kondensiert werden, wobei der elektrische Wirkungsgrad schlechter wird. Die Abwärme wird zur Nutzwärme und kann zu Heizzwecken verwendet werden.



■ **Abb. 21:** Wärmekraftwerk mit hohen Verlusten



■ **Abb. 22:** Dampf-Heizkraftwerk mit geringen Verlusten

Zu der Nutzung der Brennstoffenergie in Form der Kraft (elektrischer Strom) tritt damit die Nutzung von Wärme hinzu. Man spricht in solchen Fällen von Kraft-Wärme-Kopplung bzw. von KWK (Abb. 22). Der erzeugte KWK-Strom muss an anderer Stelle nicht in Kraftwerken erzeugt werden, und die KWK-Wärme nicht in Heizkesseln. Dies führt zu den bekannten Vorteilen der Energieeinsparung und der Umweltentlastung.

So einfach und sinnvoll die Idee der KWK zunächst erscheint, so schwierig ist ihre Realisierung in Verbindung mit dem Dampfkraftprozess. Der Dampfkraftprozess wird sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen in Großanlagen durchgeführt. Daher fällt auch die Abwärme in riesiger Menge konzentriert am Kraftwerkstandort an.

Während elektrische Energie durch Hochspannungsleitungen auch über Hunderte von Kilometern einfach und mit hohem Wirkungsgrad zum Verbraucher transportiert werden kann, gelingt das bei der Abwärme über Fernwärmeleitungen nur im Umkreis von maximal 10 km. Ein Transport der Wärme über längere Strecken kommt aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage. So beschränkt sich die Abwärmenutzung auf einige wenige Fernwärmegebiete und wenige industrielle Abwärmenutzer in unmittelbarer Nachbarschaft der Kraftwerke. Es gab immer wieder Fälle, bei denen die Wärme am Standort der KWK-Anlage kostenlos angeboten wurde. Der Bau von Leitungen für den Transport und die Verteilung der Wärme wäre aber teurer gewesen als individuelle Einzelheizungen.

Die Entscheidung für individuelle Einzelheizungen oder einer nahwärmegespeisten KWK wird heute durch den immer geringeren Wärmebedarf neuer Gebäude erschwert. Ein- und Zweifamilienhäuser nehmen wegen des guten Wärmeschutzes und der Zuheizung durch Kachelöfen nur noch 10 bis 15 MWh/a ab (entsprechend 1 000 bis 1 500 l Heizöl). In den meisten Fällen sind die Kommunen und Städte sowie die lokalen Stadtwerke sehr zurückhaltend was die Nahwärmeversorgung eines Neubaugebietes betrifft. Bei den wenigen Ausnahmen, bei denen Nahwärmelösungen mit KWK zum Zug kommen, liegen besonders günstige Umstände vor oder die Kommune ist besonders ökologisch engagiert (Bioenergiedörfer [15]):

- es werden nur die Umbaukosten von einem Kraftwerk zu einem Heizkraftwerk angesetzt,
- besonders kostengünstige Verlegeverfahren für die Nahwärmeleitungen mit viel Eigenleistung für eine Gemeinschaftslösung,
- die lokalen Stadtwerke geben die hohen Renditeerwartungen auf,
- wegen der Umweltfreundlichkeit werden von den Wärmeabnehmern auch Wärmepreise über 10 Cent/kWh_{th} akzeptiert,
- es handelt sich um eine gemeinschaftliche Lösung z. B. durch eine Bürger-Energiegenossenschaft, bei der alle Kosten umgelegt werden und der Nutzen aus der Stromerzeugung nur den Wärmeabnehmern bzw. der Gemeinschaft zu Gute kommt.

Um die mit dem Dampfkraftprozess verbundenen Nachteile für die KWK zu vermeiden, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Wärmebedarf und Wärmeauskoppelung müssen örtlich und in der Leistung eng beieinander liegen,
- Leistungsangebot über mehrere Größenordnungen,
- Leistungsanpassung während des Betriebs,
- höhere Stromausbeute als beim Dampfkraftprozess,
- umweltfreundlichere und leichter verfügbare und handhabbare Brennstoffe als Kohle oder Müll.

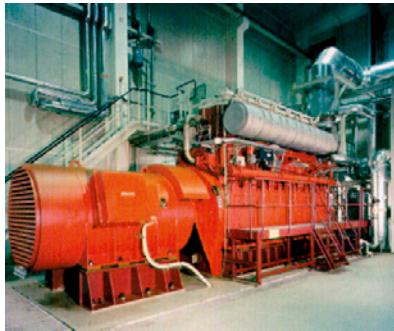
Die Entwicklung von Motor-Generator-Einheiten für die KWK zielte in den 1960er Jahren darauf, die genannten Bedingungen weitgehend zu erfüllen. Dies war die Geburtsstunde für die Blockheizkraftwerke (BHKW), die man heute als kompakte Energieerzeugungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad und immer kleineren Leistungen versteht (Abb. 23).



Heizkraftwerk mit 17MW_{el}



BHKW mit 1 kW_{el}



BHKW Modul mit 2.300 kW_{el}



BHKW mit 5 kW_{el}



BHKW Modul mit 50 kW_{el}

■ **Abb. 23:** Trend zu immer kleineren BHKW-Leistungen

2.2 KWK-Techniken

Die in der Abb. 24 aufgeführten KWK-Systeme decken das gesamte Leistungsspektrum von wenigen 100 Watt bis zu mehreren 100 MW ab. Es gibt kaum einen Wärmebedarf innerhalb dieser sechs Größenordnungen, zu dem es nicht eine geeignete KWK-Anlage gibt. Für die Deckung des Heizwärmebedarfs in Gebäuden sowie im Gewerbe sind die Blockheizkraftwerke (BHKW) aus den oben genannten Gründen am besten geeignet. So weit gefächert das Leistungsspektrum, so unterschiedlich sind der technologische Stand und die Erfahrungen mit den einzelnen KWK-Systemen. Während bei den Dampfkraft-Anlagen gut 100 Jahre Erfahrung vorliegen, befinden sich die Stirlingmotoren gerade in der Markteinführungsphase und die Brennstoffzelle verlässt gerade erst das Stadium von Pilotanlagen. Die KWK hat daher in allen Bereichen noch ein enormes technisches Entwicklungspotenzial vor sich. Bei einem Bestand von ca. 40 000 BHKW und von jährlich knapp 700 000 verkauften Wärmeerzeugern kann von einer Marktdurchdringung noch nicht gesprochen werden.

| | | KWK-Techniken > 50 kW _{el} | | | | KWK-Techniken < 50 kW _{el} | | |
|-----------------------|----|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| | | Dampf-HKW | Gasturbinen-HKW | GuD-HKW | BHKW (Otto-/Dieselmotoren) | BHKW (Otto-/Dieselmotoren) | Stirling-Motor | Brennstoffzelle |
| elektr. Leistung | kW | 5 000–250 000 | 50–250 000 | 20 000–240 000 | 50–20 000 | 1–50 | 0,3–40 | <1–3 |
| Gesamtwirkungsgrad | % | bis 90 | bis 85 | bis 90 | bis 90 | bis 90 | bis 85 | bis 90 |
| elektr. Wirkungsgrad | % | 15–25 | 20–35 | 30–45 | 33–44 | 24–33 | 10–25 | 30–40 |
| Stromkennzahl | – | 0,1–0,4 | 0,3–0,6 | 0,4–1,0 | 0,4–1,1 | 0,4–0,7 | 0,1–0,4 | 0,3–0,7 |
| Teillastverhalten | | gut | weniger gut | weniger gut | gut | gut | weniger gut | sehr gut |
| Stand der Technologie | | bewährt | bewährt | bewährt | bewährt | bewährt | Kleinserien | Kleinstserien |
| üblicher Brennstoff | | Kohle, Müll | Gas, Diesel | Gas (Kohle) | Gas, Diesel | Gas, Diesel | Gas, Holz | Gas |

■ **Abb. 24:** Wichtige Merkmale von KWK-Techniken

2.2.1 Kleinanlagen von 50 kW_{el} bis 2 MW_{el} und Großanlagen über 2 MW_{el}

Heizkraftwerke

Heizkraftwerke (HKW) arbeiten mit dem klassischen Dampfkraftprozess, wobei die Kondensationsturbinen oft durch die preiswerteren Gegendruckturbinen ersetzt werden. Dieser Prozess ist für alle Brennstoff-Arten geeignet und seit Jahrzehnten erprobt und optimiert. Sogar die Verwendung von Müll oder Biomasse in Form von Holz kann heute als Standard angesehen werden.

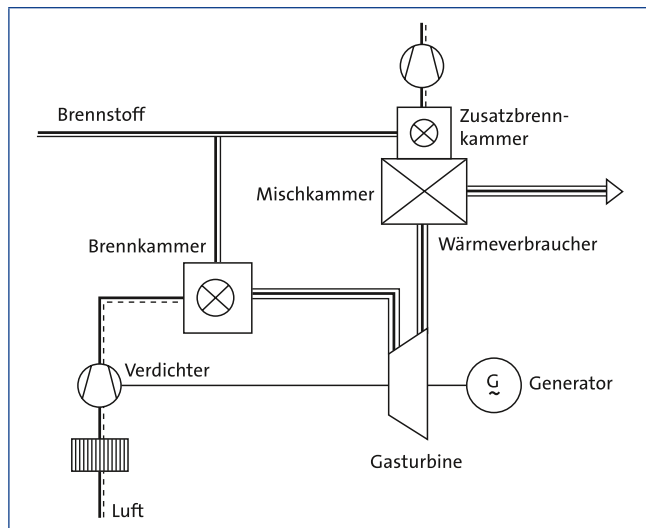
Um bei den gegenwärtig üblichen Rahmenbedingungen in die Nähe der Wirtschaftlichkeit zu kommen, beginnen solche Heizkraftanlagen bei elektrischen Leistungen von etwa 5 bis 10 MW und reichen bis in den Bereich von 100 bis 200 MW hinein. Bei größeren Leistungen nimmt der Anteil an Wärmenutzung mangels örtlicher Wärmeverbraucher meist ab und der Nutzungsgrad sinkt dann auf den der reinen Dampfkraftwerke ab. Die Einsatzgebiete sind meist Industriekraftwerke oder größere Fernwärmezentralen in Städten, oft mit einem industriellen Hauptabnehmer für Wärme. Reine Dampf-HKW werden heute nicht mehr gebaut. Entweder entscheidet man sich für Gasturbinen mit einer Abwärmenutzung, große BHKW oder Gas-Dampf-Anlagen (GuD).

Gasturbinen mit Abhitzenutzung

Gasturbinen sind Verbrennungskraftmaschinen, bei der die Energie direkt in drehende Bewegung umgesetzt wird. Nach der Arbeitsleistung in der Turbine erzeugen die expandierten heißen Rauchgase Nutzwärme. Sie verlassen die Turbine mit einem sehr hohen Luftüberschuss und einer Temperatur zwischen 450–600 °C. Der wesentliche Vorteil der Gasturbine für die Kraft-Wärme-Kopplung ist die Wärmeabfuhr über das Abgas auf hohem Temperaturniveau und die schnelle Regelbarkeit der elektrischen Leistung.

Die Gasturbinen-Abgase können direkt zur Trocknung oder Wärmevergütung von Produkten (Ziegeleien oder sonstige Ofenprozesse) verwendet werden, oder indirekt, indem man sie einem Abhitzekeessel zuführt, der Heißwasser oder Dampf erzeugt.

■ **Abb. 25:** Schema einer Gasturbine mit Abwärmenutzung



Die Gasturbinen holten durch die Erhöhung der Eintrittstemperatur von 600 auf 1 100 °C in den letzten 30 Jahren gegenüber Dampfkraftmaschinen auf, weil das Temperaturgefälle zur Stromerzeugung höher ist. Die spezifische Stromausbeute ist höher als bei Dampf-HKW, aber noch niedriger als bei Verbrennungsmotoren. Der Gesamtnutzungsgrad der Gasturbinen ist kleiner als bei Dampf-HKW und Motor-BHKW (Abb. 24). Da sie den Umweg über den Wärmeträger Wasser vermeiden, sind sie kompakter gebaut und einfacher im Aufbau als Dampf-HKW. Deshalb werden die Gasturbinen ihr Vordringen am Markt verstärken, auch wenn sich ihr elektrischer Wirkungsgrad bei Großanlagen kaum noch erhöhen lässt.



■ **Abb. 26:** Gasturbine mit
2 · 6,8 MW_{el} und einer
Sattdampfleistung von
2 · 15 t/h

Bei den hohen Rauchgastemperaturen sind sehr einfache Abhitze-Kesselkonstruktionen möglich, wobei die Heizflächen zum Verdampfen des Wassers oder zur Erwärmung des Heizwassers in einfacher Weise in den Rauchgasstrom eingehängt sind. Durch einen Zusatzbrenner im Abhitzekessel kann ein höherer Wärmebedarf gedeckt werden, ohne dass die Stromerzeugung beeinflusst wird. Wegen der geringen Baugröße und dem problemlosen Einsatz von Erdgas eroberten die Gasturbinen folgende Anwendungsbereiche:

- Verbrauchernahe dezentrale Heizkraftwerke für die Kommunen,
- Kraft-Wärme-Kopplung in der mittelständischen Industrie,
- Vorschaltgasturbinen vor vorhandene Dampf-HKW zur Anpassung an den geänderten Strom-Wärme-Bedarf, d. h. eine höhere Stromausbeute,
- Abfahren von elektrischen Lastspitzen als Ergänzung zu elektrischen Speichersystemen.

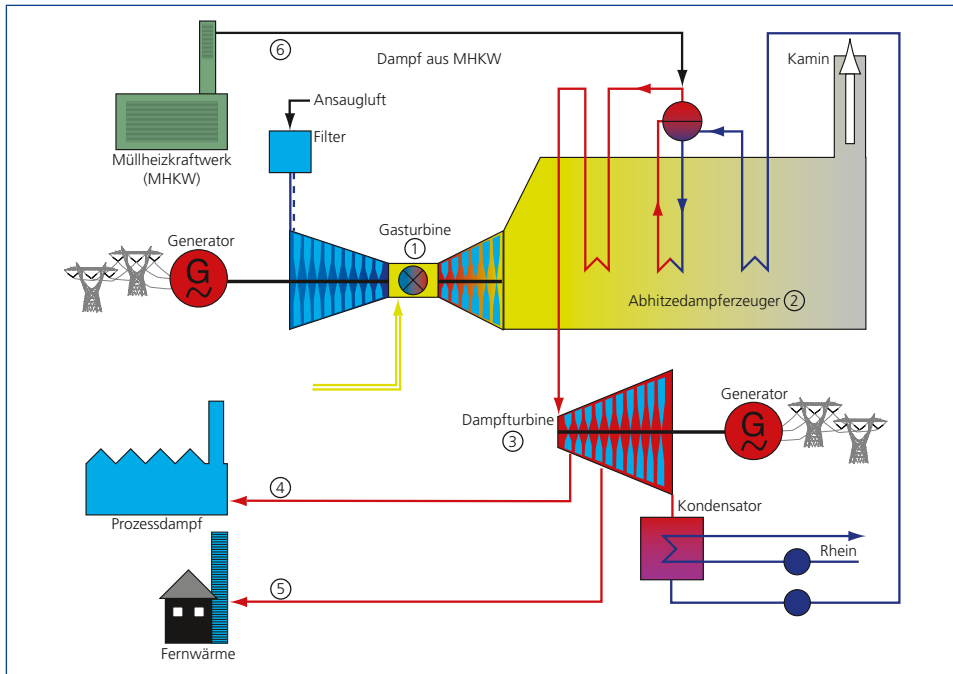
Gasturbinen gibt es in Leistungsgrößen von 0,5 bis 150 MW_{el}. Anlagen über 5 MW_{el} erreichen einen elektrischen Wirkungsgrad von 30 bis 35 %. Nur bei Leistungen unter 100 kW sinkt der Wirkungsgrad auf 20 %.

Seit einigen Jahren werden auch kompakte Gasturbinen bis herunter zu 30 kW_{el} angeboten. Sie stehen in direkter Konkurrenz zu den Motor-BHKW. Bei Temperaturen über 120°C kommen die Gasturbinen und darunter die Motor-BHKW zum Einsatz. Der elektrische und der Gesamtwirkungsgrad sowie die Stromausbeute sind bei den Motor-BHKW jedoch höher.

GuD-Anlagen

Gasturbinen-Dampfturbinen-Heizkraftwerke oder Kombianlagen sind die gebräuchliche Bezeichnung für Wärmekraftwerke, bei denen ein offener Kreisprozess mit Gas als Energieträger und ein Kreisprozess mit Dampf als Energieträger kombiniert sind (Abb. 27). Deshalb werden sie Gas-Dampf-Anlagen (abgekürzt GuD) genannt. GuD-Anlagen decken den höchsten Leistungsbereich ab 20 MW ab.

Der höhere Wirkungsgrad der Kombikraftwerke mit teilweise über 50 % im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken wird bei einem Einsatz in der Kraft- Wärme-Kopplung durch thermodynamische und ökologische Bewertungen noch ausgeprägter. Dazu kommt der politische Aspekt, dass im Abhitzekessel durch eine Zusatzfeuerung sowie in jedem Dampfkessel auch heimische Kohle oder Müll verfeuert werden kann.



■ **Abb. 27:** KWK in einer Kombianlage

Die Anforderungen der KWK werden durch hohe Stromausbeuten, niedrige Anlagen-Investitionen, kompakte Bauweise bei kürzester Bauzeit und höchster Flexibilität bezüglich Betrieb und Standort am vorteilhaftesten mit Kombianlagen erfüllt. Da es nur wenige noch nicht für die KWK erschlossene wirtschaftliche Wärmepotenziale im 100-MW-Bereich gibt, kam die GuD-Technik bislang in Deutschland als KWK-Anlage nur vereinzelt zum Einsatz.

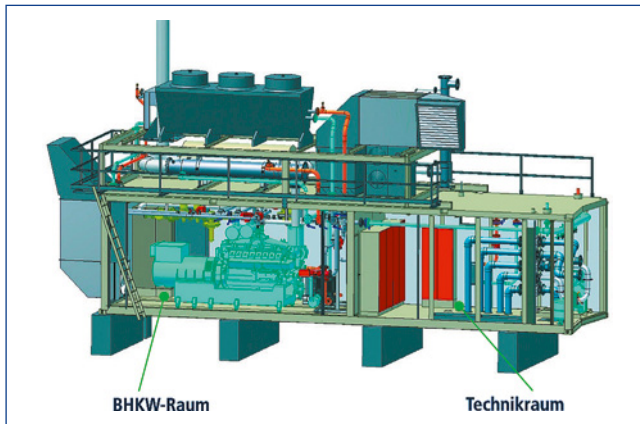
In Zukunft werden die preisgünstigeren regenerativen Stromerzeugungssysteme für die GuD-Anlagen mit oder ohne KWK wenn überhaupt nur noch eine Nische übriglassen.

Motoren-BHKW über 50 kW_e

Die Vorteile der BHKW mit Verbrennungsmotoren vor allem gegenüber der Gasturbine und dem Dampfkraftprozess wurden bereits in Kap. 2.1 genannt. Durch eine geschickte Auskopplung der Abwärme von Motor-Kühlwasser, Schmieröl und Abgas kann der Wärmeträger Wasser leicht auf 90 bis 120 °C aufgeheizt werden. Damit eignen sich solche Anlagen vom Temperaturniveau her bestens zur Beheizung größerer Gebäudekomplexe und sogar für Prozesswärme bis 120 °C im Gewerbe und in der Industrie.

Der Heizwärmebedarf unterliegt bekanntlich starken Tages-, Wochen- und Jahresschwankungen. Auch hier erweist sich die Motorentechnik gegenüber den Gasturbinen als günstig, weil die Teillastwirkungsgrade bei Motoren deutlich schwächer abfallen als bei Gasturbinen.

BHKW haben den Vorteil, dass nahezu alle gasförmigen und flüssigen Brennstoffe zum Einsatz kommen können. BHKW arbeiten im Allgemeinen nicht als ausschließlicher Wärmeerzeuger, sondern bilden eine Ergänzung zu Heizungsanlagen, um auf entsprechend hohe Laufzeiten zu kommen.



■ **Abb. 28:** BHKW mit Verbrennungsmotor (300 kW_{el})

In den letzten 20 Jahren konnten gerade in der BHKW-Technik enorme Fortschritte erzielt werden. Sie zeigen sich in dem gestiegenen Wirkungsgrad, der Absenkung der Emissionen, der hohen Verfügbarkeit, der langen Lebensdauer der Anlagen und nicht zuletzt der Vollautomatisierung des Betriebs.

Dabei sind andererseits die spezifischen Investitionen je kW_{el} im Gegensatz zu den Strompreisen kaum gestiegen. Dadurch erfüllen die großen Motor-BHKW (Abb. 28) oft die in der Industrie und im Gewerbe hohen Anforderungen an die Rentabilität bzw. die Amortisationszeiten von unter 5 Jahren.

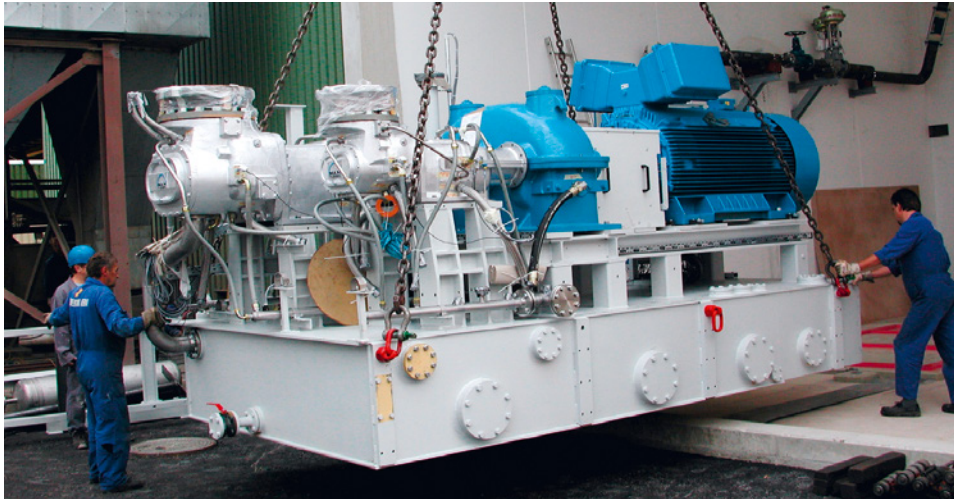
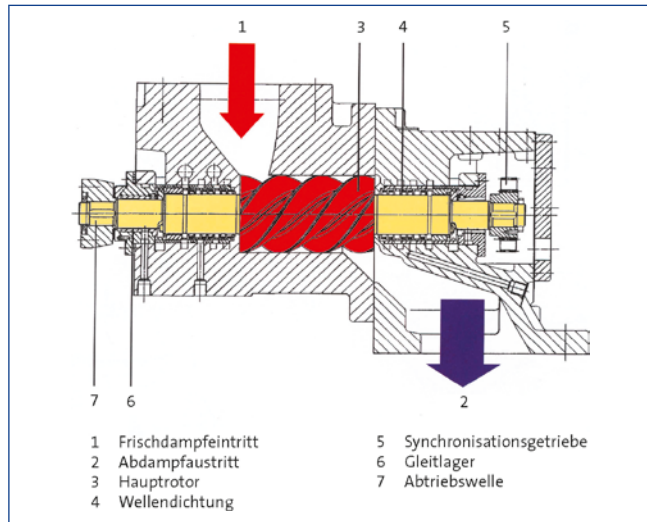
Da die BHKW in kompakten Einheiten anschlussfertig geliefert werden, bedeutet die Anbindung an die bestehende Wärmeversorgung kaum Probleme. Größere Anlagen mit einigen MW werden anschlussfertig im Container auch für die Außenaufstellung geliefert.

Dampfschraubenmotor

Während heute BHKW mit Verbrennungsmotoren Stand der Technik sind, zeichnet sich bei dampfbetriebenen Motoren eine neue Entwicklung ab. An Stelle der klassischen Dampfturbine kommt ein Dampf-Schraubenmotor zum Einsatz. Der durch Verbrennung von Restholz oder anderer Biomasse erzeugte Dampf (Satttdampf, überhitzter Dampf, Nassdampf) treibt sehr effizient über einen kostengünstigen Dampf-Schraubenmotor (Abb. 29) einen Generator zur Elektrizitätserzeugung an. Die Wärmeenergie des Dampfes wird als Prozesswärme, zur Objektbeheizung oder zur Einspeisung in ein Fernwärmenetz verwendet. Diese Motortechnik eignet sich für Anlagengrößen von 150 bis 1 000 kW_{el} (Abb. 30).

Der Dampfschraubenmotoren wird in einen klassischen Wasser-Dampf-Kreisprozess eingebunden. Wird das Arbeitsmedium Wasser durch ein organisches Medium ersetzt, so handelt es sich um einen ORC-Prozess (Organic-Rankine-Cycle). Wegen der niedrigeren Verdampfungstemperatur der organischen Arbeitsmittel können auch Abwärmeströme unter 100 °C genutzt werden, wie sie in vielen Prozessen der Industrie kostenlos anfallen. Die Wärmekraftmaschine selbst kann ein Dampf-Motor oder eine Turbine sein, die aber für das Arbeitsmedium speziell konstruiert sein muss. Bei noch weiter steigenden Strompreisen ergibt sich durch diese kostengünstige Abwärmennutzung oder durch den Einsatz von Biomasse oder Bioabfällen ein großes Potenzial für die KWK-Stromerzeugung.

■ **Abb. 29:** Dampf-Schraubenmotor im Schnitt



■ **Abb. 30:** Anlage mit Dampf-Schraubenmotor für 730 kW_{el}

2.2.2 Kleinstanlagen unter 50 kW_{el}

Für eine langfristige Strategie zukünftiger Strom- und Wärmeerzeugung gewinnt die Größe der BHKW zunehmend an Bedeutung. Besonders der Leistungsbereich unter 5 kW_{el} erschließt das enorme Wärmepotenzial der Ein- und Zweifamilienhäuser im Bestand und im Neubau. Damit wird man der langfristigen Zielsetzung einen großen Schritt näher kommen: Keine Wärmeerzeugung ohne KWK.

Der weitere Vorteil ist die unmittelbare Nähe zu den Stromverbrauchern in den vom BHKW wärmeversorgten Gebäuden. Die übergeordneten Stromnetze werden dadurch entlastet. Dass die Stromverbraucher auch die höchsten Strompreise bezahlen, ist ein weiterer Grund für Kleinst-KWK-Anlagen.

In der Energieversorgung wird die Nachhaltigkeit durch geschlossene Kreisläufe, einer massiven Verminderung der CO₂-Emissionen und dem Einsatz regenerativer Energieträger geprägt sein. Gerade dabei wird die KWK durch den Einsatz von biogenen Gasen oder festen und flüssigen Brennstoffen aus Biomasse und Bioabfällen eine entscheidende Rolle spielen. Eine nachhaltige Energieversorgung sichert unseren Nachfahren eine ebenso gute Lebensqualität, wie wir sie heute für uns noch als selbstverständlich erachten. Dies ist auch Grundlage und Zielsetzung neuer technologischer Entwicklungen sowie der Optimierung bereits bewährter Techniken von Kleinst-KWK-Anlagen.

Die Kleinst-KWK unter 50 kW_{el} teilt man ein in:

- Nano-KWK 0 bis 2,5 kW_{el}
- Mikro-KWK 2,5 bis 20 kW_{el}
- Mini-KWK 20 bis 50 kW_{el}.

Nach der Technologie unterscheidet man Dampf- und Verbrennungsmotoren, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen.

Dampfmotoren

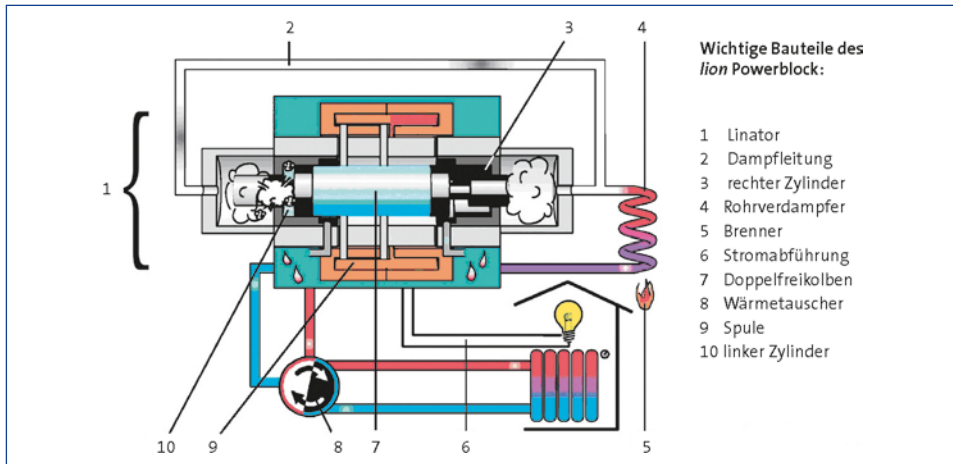
Wie Abb. 31 zeigt, ist das Herzstück ein prozessdampfbetriebener Doppelfreikolben, der über einen Lineargenerator Strom erzeugt. Der Gasbrenner erhitzt Wasser in einem Rohrverdampfer zu Prozessdampf von ca. 350 °C und 5–30 bar Druck, der dann im Kolben expandiert und Arbeit leistet. Die Leistung kann zwischen 0,3 kW und 2,0 kW_{el} sowie 3,0 und 16,0 kW_{th} moduliert werden. Auch wenn ein BHKW mit Dampfmotor – wie bei einem großen HKW – mit einem geringeren elektrischen Wirkungsgrad und einer niedrigeren Stromkennzahl arbeitet, kann bei der bevorstehenden Markteinführung der Preis diese Nachteile ausgleichen. Abb. 32 zeigt das 195 kg schwere Gerät mit den Abmessungen 126 · 62 · 83 cm ohne Gehäuse.

Verbrennungsmotoren

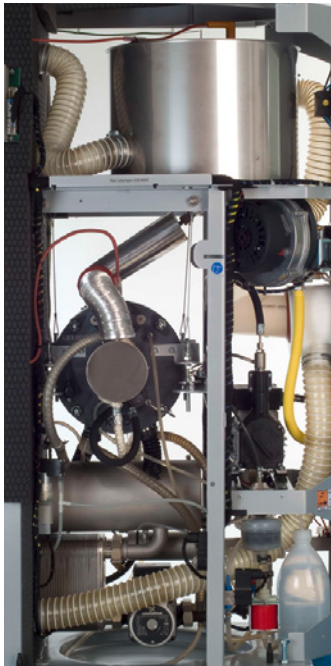
Das Leistungsspektrum marktüblicher Kleinst-Motoren bis 50 kW_{el} beginnt bei 0,3 kW_{el}. Damit könnte nahezu jeder Wärmeerzeuger bis ca. 100 kW_{th} in Gebäuden, Gewerbe und Industrie durch ein BHKW ersetzt werden. Mit zunehmender Größe wird nicht nur der elektrische Wirkungsgrad besser, sondern es sinken auch die spezifischen Investitionen je kW_{el} (Kap. 5.2). Den kleinen Motor-BHKWs wird eine Schlüsselstellung bei der Energiewende zugesprochen, weil sie das Bindeglied zwischen fossiler und regenerativer Wärme- und Stromerzeugung sein werden.

Gasturbine

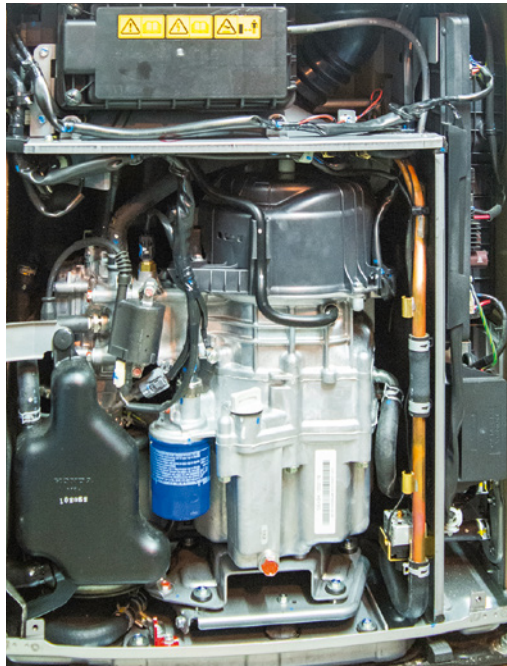
Die Entwicklung von Gasturbinen mit einer Leistung unter 50 kW_{el} geht weiter, um KWK-Anwendungen in einem für Motor-BHKW nicht zugänglichen Temperaturbereich abzudecken. Durch den Einsatz von speziellen Hochleistungskeramiken für den Turbinenläufer können durch die Verminderung der Spaltverluste und die Erhöhung der Eintrittstemperatur auf 1200 °C Wirkungsgradsteigerungen auf etwa 30 % erzielt werden. Auch wenn der Markt für Temperaturen von über 120 °C im Leistungsbereich unter 50 kW_{el} begrenzt ist, könnte sich eine Marktnische entwickeln, wenn es um die Verwertung regenerativ erzeugter Brenngase geht, für die speziell Motor-BHKW entwickelt werden müssten. Konkretes Forschungsobjekt ist eine Gasturbine mit 30 kW_{el} und 68 kW_{th} [16].



■ **Abb. 31:** Vereinfachtes Funktionsschema eines BHKW mit Dampfkolbenmotor



■ **Abb. 32:** BHKW mit Dampfkolbenmotor ohne Gehäuse



■ **Abb. 33:** BHKW mit Verbrennungsmotor
(1 kW_{el}, 2,5 kW_{th})

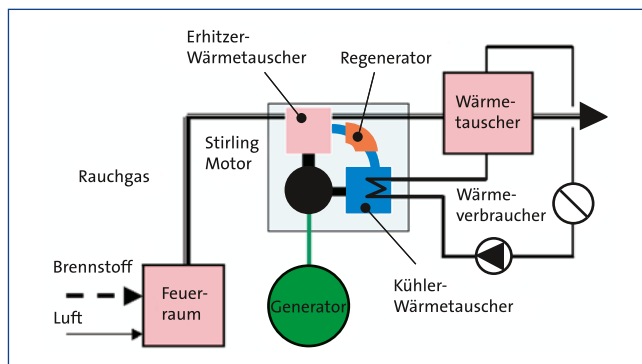
Ein weiteres Einsatzgebiet könnte sich im Rahmen der Speichertechnologie Power-to-Gas für die Gasturbine erschließen, wenn der durch die Elektrolyse erzeugte Wasserstoff gespeichert und dann bei Bedarf direkt in einer Gasturbine wieder in Strom und Wärme umgewandelt wird. Das Verbundprojekt »Wasserstoffkleingasturbine als neuartiges Energiekonzept« zeigt bereits ein Konzept für eine neue Form von Kleingasturbinen, das den geringen Wirkungsgrad von Kleingasturbinen beseitigt [17].

Stirlingmotoren

Der Stirling-Motor ist wie die Dampfturbine oder der Dampfmotor eine Wärmekraftmaschine mit externer Verbrennung, in der eine konstante Gasmenge (z. B. Luft, Wasserstoff, Helium) zyklisch komprimiert und expandiert wird. Die eigentliche Wärmequelle liegt bei diesem Heißgasmotor in einer außerhalb des Zylinders angeordneten Brennkammer (Abb. 34). Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, durch Auswahl geeigneter Verbrennungstechniken eine schadstoffärmere oder sogar eine CO₂-neutrale Verbrennung zu erreichen. Somit können dem Stirling-Motor bisher ungenutzte Verbrennungspotenziale (von Biomasse und Abfällen) erschlossen werden.

Stirling-Motoren haben nur bescheidene elektrische Wirkungsgrade von höchstens 30 %. Oft liegen diese jedoch wegen der geringen Temperaturunterschiede (Carnot-Wirkungsgrad) eher bei 10 %, was ein entscheidender Nachteil gegenüber den Otto- oder Diesel-Motoren-BHKW ist. Sie sind leiser bzw. vibrationsärmer und haben ein gleichmäßigeres Drehmoment als Verbrennungsmotoren. Mit den hohen Temperaturdifferenzen und -drücken (100 bis 190 bar) auf engstem Raum sind jedoch Material- und Dichtungsprobleme verbunden.

Weltweit versuchen Firmen, den seit langem bekannten Stirling-Motor (Abb. 35) als BHKW-Anlage auf dem deutschen Markt einzuführen. Der Leistungsbereich der entwickelten Motoren reicht von 1 kW_{el} bis 40 kW_{el}, wobei die elektrischen Wirkungsgrade zwischen 10 und 30 % liegen. Diese Stirling-BHKW werden derzeit außer mit Erdgas auch mit verschiedenen »Brennstoffen« getestet wie z. B. Grubengas, Biogas, und Holz. Erste Kleinserien sind bereits am Markt zu Preisen verfügbar, die den geringeren Wirkungsgrad ausgleichen.

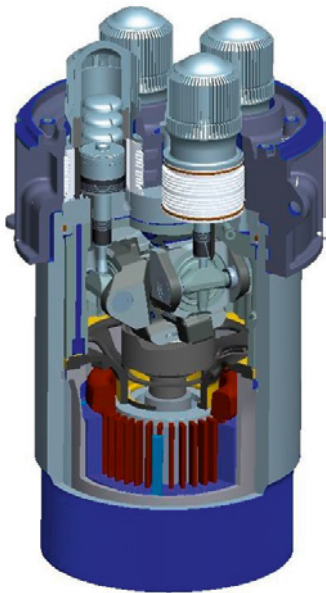


■ **Abb. 34:** Prinzip des Stirling-Motors als KWK-Anlage

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Zellen, die (ähnlich einer Batterie) die chemisch gebundene Energie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie umwandeln. Sie unterliegen zwar nicht dem Carnot-Wirkungsgrad; aber elektrische Wirkungsgrade bei stationären Einzelanlagen von 40 bis 50 % dürften die Obergrenze sein. Der Vorzug besteht eher darin, dass bei Teillast der Wirkungsgrad kaum abfällt – ja theoretisch sogar zunehmen müsste – und in den im Vergleich zu allen anderen KWK-Systemen deutlich geringeren Emissionen.

Eine Brennstoffzelle besteht prinzipiell aus zwei porösen, gasdurchlässigen Elektroden und einem dazwischen liegenden ionenleitenden Elektrolyten. In der technischen Realisierung



■ **Abb. 35:** Querschnitt eines Stirling-Motors



■ **Abb. 36:** Testbetrieb eines Stirling-Motors

werden viele einzelne identisch aufgebaute Brennstoffzellen seriell zu einem so genannten Brennstoffzellenstapel (Stack) verschaltet.

Brennstoffzellen werden nach ihren Elektrolyten unterschieden. Vier Grundtypen kommen für einen Einsatz in der Energiewirtschaft in Frage:

- die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC),
- die Polymer-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC),
- die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC),
- die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC).

Die meisten Systeme befinden sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Große Entwicklungspotenziale – z. B. auch hinsichtlich der finanziellen Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen BHKW-Anlagen – werden der PEMFC und der SOFC eingeräumt. Wenige Systeme stehen am Beginn der Markteinführung. Voraussetzung wird ein Preis sein, der unter dem von Motor-BHKW liegen muss. Solange es eine Konkurrenz zwischen den KWK-Systemen gibt, wird es beim Preis im Hinblick auf größere Stückzahlen noch einige Veränderungen nach unten geben.

Kommerziell verfügbar und wirtschaftlich war die Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) der Firma MTU später Tognum mit einer elektrischen Leistung von 250 kW_{el}. Von diesen wurden bis zum Produktionsstop weltweit nur rd. 30 Anlagen in Betrieb genommen.

Im größten Praxistest von Brennstoffzellen in Einfamilienhäusern »Callux« wurde eine Anlagenverfügbarkeit von 97 % für 350 Geräte erreicht. Damit wird die Markteinführung und Serienfertigung vorbereitet. Bis Mitte 2016 sollen bis zu 500 Geräte im Praxistest erprobt werden.



■ **Abb. 37:** PEMFC Brennstoffzellen-Heizgerät mit $1,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ und 3 kW_{th}



■ **Abb. 38:** SOFC Brennstoffzellen-Heizgerät Galileo mit 1 kW_{el} und $2,5 \text{ kW}_{\text{th}}$

2.3 Kältetechnologien

Unzählige Energiekonzepte und umgesetzte Projekte haben gezeigt, dass die Kombination aus einer KWK-Anlage und einer Absorptionskälteanlage nicht nur Primärenergie einspart (Kap. 5.3.3), sondern auch in den meisten Fällen eine überaus wirtschaftliche Investition ist. Während für große Gebäude, Krankenhäuser und Gewerbebetriebe die Kombination KWK/Absorptionskälte Stand der Technik ist, betritt man bei Adsorptions-Anlagen unter 10 kW Kälteleistung Neuland. Abb. 39 zeigt eine Adsorptionskälteanlage, die einen Kältebedarf von 8 bis 12 kW abdeckt. Die erforderliche Vor- und Rücklauftemperatur von $72/67^\circ\text{C}$ kann von einem BHKW mit $15 \text{ kW}_{\text{th}}$ bereitgestellt werden. Damit erschließt sich den Mini-BHKW ein zusätzliches Wärmepotenzial.



■ **Abb. 39:** Adsorptionskälteanlage mit einer Kälteleistung von 8 bis 12 kW und einer Heiztemperatur von $72/67^\circ\text{C}$

2.4 Speichertechnologien

2.4.1 Stromverbrauchsoptimierte Betriebsweise

Durch die starken Strompreissteigerungen der letzten Jahre hat auch der Wert des Stroms aus KWK-Anlagen zugenommen. Da andererseits die Einspeisevergütungen für KWK-Strom nahezu konstant geblieben sind, ist der Anlagenbetreiber bestrebt, möglichst viel Strom selbst zu verbrauchen bzw. im Objekt direkt zu vermarkten. Ein Wärmespeicher (Pufferspeicher) bietet die Möglichkeit, die Strom- und Wärmeerzeugung zu entkoppeln und das BHKW entsprechend dem Stromverbrauch zu betreiben. Die überschüssige Wärme kommt in den Pufferspeicher. Diese »stromoptimierte« Betriebsweise gilt für die heute üblichen festen Strompreise. Unter die »festen« Strompreise fallen auch die klassischen Hoch- und Niedertarife (HT/NT), die im Zuge der Energiewende nicht mehr zeit- und kostengerecht sind.

2.4.2 Strompreis- und stromvergütungsoptimierte Betriebsweise

Je mehr die Energiewende umgesetzt wird, desto eher werden zeitvariable Strompreise und analog variable Einspeisevergütungen kommen. Erste Pilotprojekte sind gestartet worden (Kap. 1.5). Auch bei diesen zusätzlichen variablen Randbedingungen kann die Zielsetzung eines möglichst wirtschaftlichen BHKW-Betriebs erfüllt werden. Mit Hilfe des Wärmespeichers und der Preis- und Vergütungssignale kann der Betrieb optimiert werden. Für diese Betriebsweise müssen noch entsprechende Kommunikationssysteme und BHKW-Regel- und Steuerungssysteme entwickelt werden (Kap. 1.5, 12).

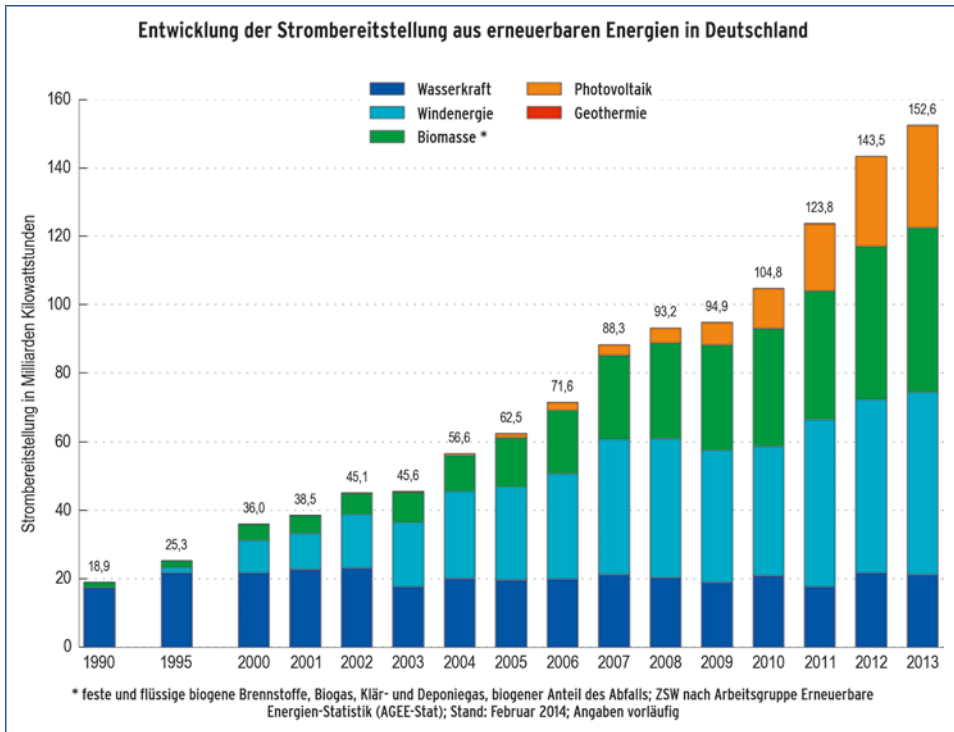
2.4.3 Überregionale Power-to-Gas Speicherung

Der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung hat in den letzten 10 Jahren in einem Maße zugenommen wie es auch die kühnsten Prognosen nicht gewagt haben vorauszusagen.

Durch den unsteten und regional unterschiedlichen Ausbau von PV- und Windstromanlagen kommt es immer häufiger zu einem Nord-Süd-Gefälle. Mangels Leitungen auf der Höchstspannungsebene, sucht man nach schneller verfügbaren überregionalen Speichersystemen für »überschüssigen« Strom. Gegenwärtig wird das Power-to-Gas-System favorisiert (Kap. 4.7.2), bei dem über Zwischenschritte Erdgas produziert wird. Dieses Erdgas nennt man auch Bioerdgas, weil es aus regenerativer Primärenergie (Sonne, Wind, Biomasse, Bioabfall) erzeugt wird.

Die KWK kann in gerader Weise in das Power-to-Gas-System integriert werden. Durch den Einsatz von Bioerdgas in Zeiten erhöhter Stromnachfrage können BHKW einen wichtigen Beitrag zum Lastmanagement und Lastausgleich liefern. Weiterhin kann der BHKW-Anlagenbetreiber als Stromanbieter einen finanziellen Anreiz bieten Stromverbräuche zeitlich zu verlagern. Damit wird sparsam mit dem überschüssigen Strom umgegangen, der in das mit Verlusten behaftete Speichersystem gelangt. Ein dezentraler möglichst bei einem Prosumer (Kap. 1.2) stattfindender Lastausgleich ist immer einem überregionalen Speichersystem vorzuziehen.

Weitere Speichersysteme wie Speicher für die industrielle Abwärmenutzung, neue Batteriespeicher, Pumpspeicherkonzepte und Speicher für eine solare Wasserstoffherzeugung werden von der Bundesregierung im Rahmen der Forschungsinitiative »Energiespeicher« gefördert [18].



■ **Abb. 40:** Entwicklung der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

3 Auslegung, Einsatzbereiche und Umwelt- auswirkungen

3.1 Auslegung

3.1.1 Mehrfamilienhäuser, Gewerbe und Industrie

Die Auslegung d.h. die Größenermittlung einer KWK-Anlage beginnt bei der objektabhängigen Bedarfsstruktur von thermischer und elektrischer Energie. Es gibt also grundsätzlich zwei Möglichkeiten, nach denen die Größe eines BHKW bestimmt werden kann:

- nach der Höhe und Struktur des Wärmebedarfs,
- nach der Höhe und Struktur des Strombedarfs.

Es wird hier nur der sog. Niedertemperaturwärmebereich (bis ca. 90 °C) betrachtet, der für den Heizungsbereich die wichtigste Rolle spielt.

Die höchst mögliche Ausnutzung der eingesetzten Brennstoffe im BHKW wird erzielt, wenn die thermische Leistung des BHKW nach der Höhe und Struktur des Wärmebedarfs eines Objekts ausgelegt wird. Das BHKW läuft nur, wenn Wärme nachgefragt wird. Der gleichzeitig erzeugte Strom wird im Objekt genutzt, vermarktet oder ins öffentliche Netz eingespeist. Nur in diesen Fällen kann das BHKW die technisch möglichen Gesamtwirkungsgrade erreichen.

Die Auslegung nach der elektrischen Leistung wird nur noch vereinzelt gemacht. Sie ist in den Fällen sinnvoll, in denen ein hoher, teuer zu bezahlender elektrischer Leistungsbedarf vorhanden ist und außerdem die gleichzeitig erzeugte Wärme genutzt werden kann. Kann die Wärme nicht abgenommen werden, dann hat das BHKW die Funktion eines reinen Stromaggregats, bei dem die Wärme über einen Kühler an die Umwelt abgegeben wird. Der Gesamtwirkungsgrad fällt dann auf den elektrischen Wirkungsgrad des BHKW zurück. In diesen Fällen verzichtet man aus wirtschaftlichen Überlegungen bewusst auf die prinzipiellen Vorteile der KWK. Als reine Stromerzeuger bieten BHKW jedoch gegenüber den im Preis stark gefallenen regenerativen Stromerzeugern mit Speicher kaum noch Vorteile.

Die Zielgröße bei der üblichen Auslegung nach dem Wärmebedarf ist der maximale Wärmebedarf. Er kann aus den Wärmeverbräuchen (Wärmezähler) der Tage mit sehr tiefen Außentemperaturen ermittelt werden. Für verschiedene typische Objekte kann aus der Abb. 41 die thermische Leistung des BHKW als Richtgröße übernommen werden.

| Typische Objekte | Thermische BHKW-Leistung relativ zum maximalen Wärmebedarf |
|--|---|
| Altersheime, Krankenhäuser, Kurkliniken, Hallenbäder | 30–40 % |
| Hotels | 20–30 % |
| Schulen mit Sporthallen, Gaststätten | 10–15 % |
| Verwaltungsgebäude (mit Kälte) | 10 % (bis 40 %) |
| Mehrfamilienhäuser | 15–30 % |

■ **Abb. 41:** Richtgrößen für BHKW als Anteil des maximalen Wärmebedarfs

Liegt der maximale Wärmebedarf nicht vor, kann der maximale Brennstoffverbrauch herangezogen werden. Dieser muss jedoch mit dem Nutzungsgrad der Wärmebereitstellung multipliziert werden, um auf den maximalen Wärmebedarf zu kommen. Der Nutzungsgrad ist u. a. von den Größen Kesselwirkungsgrad, Bereitschaftsverluste und der Vorlauftemperatur abhängig. Ein ausführliches Berechnungsverfahren ist in der VDI 3808 dargestellt. Erfahrungsgemäß liegen die Kesselnutzungsgrade im Bereich von 75 % (für ältere Kessel) bis 90 % bzw. 100 % (für neue Niedertemperatur- bzw. Brennwertkessel).

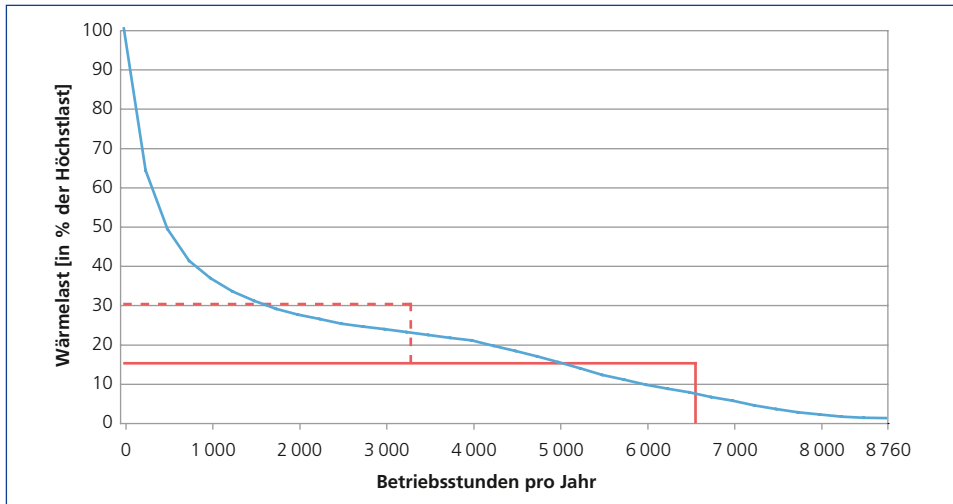
Die Auslegung nach dem Norm-Wärmebedarf (für Norm-Außentemperatur nach DIN-EN 12831, früher DIN 4701) – wie sie für Heizkessel benutzt werden – sind denkbar ungeeignet, weil die neue DIN-EN 12831 von vielen Reserve- und Sicherheitsaufschlägen ausgeht, die bei einem BHKW für die Grundlast nicht zutreffen. Auch die normierten minütlichen Lastgänge für Strom und Wärme, wie sie in der VDI-Norm 4655 gegeben sind, liefern nur grobe Anhaltswerte für den Einzelfall und haben die Tendenz, zu optimistische Werte zu liefern. Weiterhin bilden sie nur den Wärmestandard eines durchschnittlichen Gebäudes ab. Handelt es sich um ein Effizienzhaus oder gar um eine Passivhaussiedlung, so sind die Abweichungen massiv.

Außer der Größe eines geplanten BHKW ist auch dessen Laufzeit und damit die gelieferte Wärme- und Strommenge von Interesse. Erst dann kann eine Wirtschaftlichkeitsprognose aufgestellt werden. Die genaueste Analyse des Wärmeverbrauchs ist die stündliche Erfassung. Wenn man die stündlichen Wärmemengen der 8760 Stunden eines Jahres der Größe nach sortiert, dann erhält man die so genannte geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs. Der höchste Wert entspricht der maximalen Wärmelast an den kältesten Tagen im Jahr. Die kleinen Werte spiegeln den Wärmeverbrauch im Sommer wider. Da nur in seltenen Fällen Stundenwerte vorliegen, behilft man sich mit objekttypischen normierten Lastganglinien, die man mit den tatsächlichen Nutzwärmeverbräuchen multipliziert.

Aus der in Abb. 42 dargestellten beispielhaften Kurve kann z. B. abgelesen werden, dass an 1500 Stunden im Jahr der Wärmeverbrauch im Objekt höher als 30 % der Wärmehöchstlast ist. Die Fläche unter der Kurve entspricht dem Jahreswärmeverbrauch. In diese Kurve lässt sich sehr anschaulich die Wärmeproduktion des BHKW eintragen. Mit einer Leistung von beispielhaft angenommenen 15 % der thermischen Höchstlast erreicht das BHKW eine Laufzeit von ca. 6500 Stunden. Damit wird ein Anteil von etwa 56 % des Gesamtwärmeverbrauchs gedeckt. Das niedrige Ende der Kurve bestimmt also letztendlich die Laufzeit des BHKW. Mit anderen Worten: Im Winter läuft das BHKW in jedem Fall, aber in der Übergangszeit und im Sommer ist das BHKW von jeder nachgefragten Kilowattstunde Wärme abhängig. Der Teil der BHKW-Linie, der sich über der Jahresdauerlinie befindet, kann durch Leistungsregelung oder durch Laden eines Pufferspeichers bzw. Zwischenspeicherung im Heizungssystem abgefahren werden.

Ein zweites Modul mit der gleichen Leistung würde noch etwa 3300 Stunden laufen und den in Abb. 42 gestrichelt dargestellten Anteil des Wärmebedarfs von 28 % decken. Der restliche Wärmebedarf, der oberhalb der BHKW-Linie liegt, wird durch den Kessel erbracht. Bei einer Erneuerung der Kesselanlage könnte man die Kesselleistung um die thermische BHKW-Leistung verringern.

Ohne Teillast würde ein großes Modul mit 30 % der Leistung nur etwa 3300 Stunden laufen. Bei Verteilung auf zwei gleich große Module liegt die durchschnittliche Laufzeit bei etwa



■ **Abb. 42:** Beispielhafte Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs

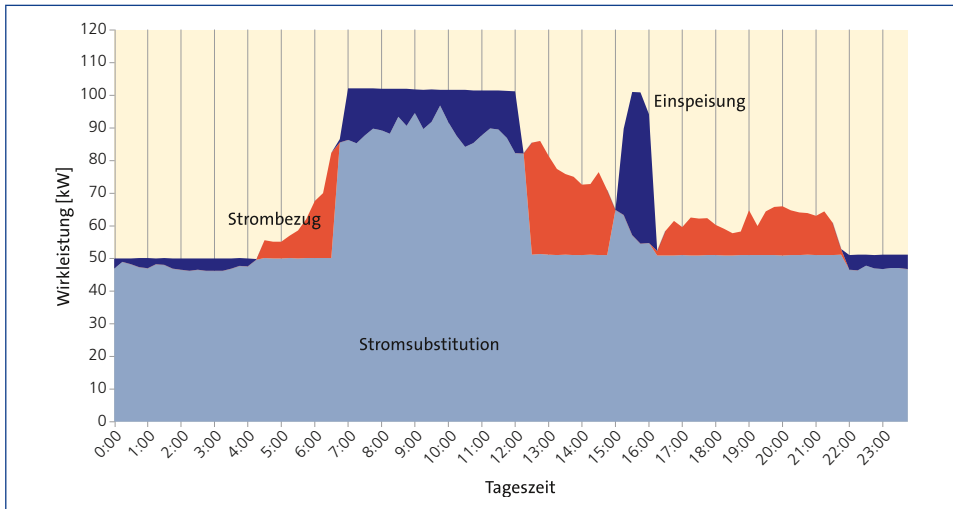
4900 Stunden. Die Verteilung auf mehrere Module hat den zusätzlichen Vorteil, dass bei Ausfall eines Moduls noch andere Module als Reserve zur Verfügung stehen.

Nachdem die Laufzeit des BHKW mit dem Jahresdauerlinien-Verfahren bestimmt worden ist, muss die Struktur des Strombedarfs mit der Stromerzeugung des BHKW verglichen werden. Erst dann kann die Energiebilanz für Wärme und Strom aufgestellt werden.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kap. 5) müssen die Jahresanteile des substituierten und des eingespeisten BHKW-Stroms sowie der verbleibende Strombezug bestimmt werden. Es ist also wichtig zu wissen, zu welchen Zeiten wie viel Strom bezogen wird. Da die monetäre Bewertung des Stroms entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des BHKW ist, kann es sich lohnen, eine ¼ h-Leistungsmessung über einige Wochen möglichst bei tiefen Außentemperaturen durchzuführen. Damit kann man z. B. seinen Stromversorger beauftragen. Wenn man den Stromlastgang mit der BHKW-Stromerzeugung überlagert, erhält man die Anteile des Stroms, der substituiert, eingespeist oder noch bezogen werden muss. Eine Messung des Stromverbrauchs liefert für die Wirtschaftlichkeitsprognose bessere Werte als die Lastgänge aus der VDI 4655.

Eine solche Messung mit gleichzeitiger Darstellung der Stromerzeugung durch ein 2-Modul-BHKW ist in Abb. 43 dargestellt. Etwa 91 % des im BHKW erzeugten Stroms können im Objekt genutzt werden, ersetzen also Stromeigenbedarf. Die restlichen 9 % werden eingespeist. Zusätzliche 11 % müssen vom Stromversorger bezogen werden. Man erkennt deutlich den Einfluss des Wärmebedarfs auf die BHKW-Laufzeit: zwischen etwa 12 Uhr und 16 Uhr ist nicht genügend Wärmebedarf vorhanden; es läuft nur ein Modul und Strom muss bezogen werden. Danach steigt der Wärmebedarf noch einmal und das 2. Modul läuft noch mal für etwa eine Stunde. Da der Strombedarf gering ist, wird ein großer Teil des jetzt erzeugten Stroms eingespeist.

Der Wert des eingespeisten und des bezogenen Stroms kann sehr unterschiedlich sein und wird in Zukunft evtl. sogar von der Tageszeit bzw. der Netzlast abhängig sein, was bei der Wirtschaftlichkeit des BHKW eine wichtige Rolle spielen wird. Inzwischen liegen einige EDV-



■ **Abb. 43:** Tageslast des Stroms mit BHKW-Einspeisung

Programme vor, mit denen sich ein BHKW komfortabel auslegen und dessen Betrieb optimieren lässt. Allerdings können diese vermeintlich exakten Ergebnisse in der Praxis nur grobe Anhaltswerte liefern. Je genauer die Lastgänge vorliegen desto genauer werden die Auslegung und die Prognosen für die Strom- und Wärmeerzeugung sein.

3.1.2 Einfamilienhäuser

Für die BHKW-Auslegung eines Einfamilienhauses kann kein so hoher Aufwand betrieben werden wie für ein Gewerbeobjekt. Dies ist auch nicht erforderlich, weil sich die Hersteller mit ihrem Angebot an BHKW mit ca. 1 kW_{el} dem niedrigen Wärmebedarf von Neubauten und sanierten Gebäuden angepasst haben. In das BHKW ist noch ein Zusatzbrenner integriert, der in jedem Fall den maximalen Wärmebedarf abdeckt.

Während Bestandsgebäude aus den 70er Jahren noch einen Jahresheizwärmebedarf von ca. 150 bis 200 kWh/m²a haben, benötigen Neubauten nach der Energieeinsparverordnung 2014 nur noch maximal 50 kWh/m²a. Der in den letzten Jahrzehnten gleich gebliebene Trinkwarmwasserbedarf beläuft sich auf 12,5 kWh/m²a. Zusammen mit dem Nutzungsgrad eines Standardkessels führt dies zu einem Brennstoff-Jahresverbrauch von 12 000 kWh, was einem Heizölverbrauch von 1 200 l entspricht.

Könnte man dagegen ein BHKW für die Deckung des gesamten Wärmebedarfs von 10 000 kWh/a einsetzen, so ergäbe sich ein Brennstoffverbrauch von ca. 17 000 kWh/a, allerdings gegenüber dem Heizkessel mit einer zusätzlichen Stromerzeugung von 4 000 kWh. In der Praxis kann das BHKW nur ca. 80 % des Wärmebedarfs decken. Den Rest liefert der Zusatzbrenner für die Spitzenlast. Der gesamte Brennstoffverbrauch von 15 400 kWh/a teilt sich dann auf in:

- 13 000 kWh/a für das BHKW,
- 2 400 kWh/a für den Zusatzbrenner.

Bei dieser Aufteilung erzeugt das 1 kW_{el}-BHKW 3 200 kWh/a Strom, was mit dem zusätzlichen Brennstoffverbrauch von 3 400 kWh gegenüber dem Heizkessel erzielt wird.

Die Stromerzeugung von 3 200 kWh entspricht etwa auch dem durchschnittlichen Stromverbrauch im Haushalt. Der Stromverbrauch in einem Einfamilienhaus mit 4 Personen liegt tendenziell höher, wird aber durch das individuelle Nutzerverhalten überdeckt. Dieses entscheidet auch, wie hoch der Anteil des selbst genutzten Stroms (Eigenanteil) am gesamten Stromverbrauch ist. Der Eigenanteil kann zudem durch den Pufferspeicher und eine optimierte Betriebsweise auf deutlich über 50 % angehoben werden.

3.1.3 Einsatz eines Pufferspeichers

Durch Einsatz eines Pufferspeichers, dem in der modernen Heiztechnik eine immer wichtigere Rolle zukommt, kann die Laufzeit des BHKW verlängert werden, weil die gespeicherte Wärme die vom Spitzenheizkessel ersetzt. Außerdem lässt sich die Anzahl der Starts reduzieren und eine programmierte Steuerung kann die Laufzeit des BHKW besser an den Strombedarf und die Tarifstruktur anpassen.

Der Wärmebedarf unterliegt oft nicht nur den Jahres- und Tageszyklen, sondern auch kurzzeitigen Schwankungen im Viertelstundenbereich. Wenn der Wärmebedarf unter die Wärmeproduktion des BHKW absinkt, müsste das BHKW abschalten. Der Pufferspeicher ist ein eigens zum Zweck der Wärmepufferung installierter Behälter, der in das Heizungsnetz eingebunden wird. Er wird nach der BHKW-Größe und der gewünschten Laufzeit dimensioniert (Abb. 44). Natürlich wirkt das System »Heizung-Gebäude« bereits als Puffer. Ein vorhandener Brauchwarmwasserspeicher kann ebenfalls die Funktion eines Wärmepuffers übernehmen. Im Gegensatz zum Pufferspeicher ist er jedoch mit Trinkwasser gefüllt und über Wärmetauscher an das Heizsystem angeschlossen. Seine Größe hängt von dem maximalen Warmwasserbedarf im Objekt ab. In der Regel ist es kostengünstiger einen großen Pufferspeicher einzubauen als den Warmwasserspeicher für diesen Zweck zu dimensionieren.

Praktisch kann ein Pufferspeicher, der beispielsweise für eine Volllaststunde ausgelegt ist, durchaus mehrere Stunden lang Wärme aufnehmen, weil der Wärmebedarf im Objekt meist nicht ganz, sondern nur teilweise wegfällt. In den Nachtstunden, wenn der Strombedarf und evtl. die Strompreise niedrig sind, kann der Speicher wieder leer gefahren werden.

| | BHKW Größe 1 | BHKW Größe 2 | BHKW Größe 3 | BHKW Größe 4 | BHKW Größe 5 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Thermische Leistung in kW | 2,5 | 12 | 32 | 100 | 378 |
| Größe des Pufferspeichers in Liter bei einer Temperaturspreizung von 30 K und 2/3 nutzbarem Speichervolumen für eine Volllaststunde | 110 | 540 | 1 380 | 8 340 | 16 250 |
| Erforderlicher Wärmespeicher für förderfähige BHKW in Liter | 300 | 750 | 1 600 | | |
| Mögliche Stromverlagerung bzw. indi- rekt gespeicherter Strom in kWh _{el} | 1,0 | 5,5 | 15 | 50 | 251 |

■ **Abb. 44:** Größe von Pufferspeichern als Funktion der BHKW-Größe und des verschiebbaren Stroms

Der Pufferspeicher kann auch genutzt werden, um das BHKW »stromoptimiert« zu betreiben (Kap. 2.4.1). Die dann mögliche Verlagerung an Strom geht aus der Abb. 44 hervor. Ein äquivalenter Stromspeicher hätte eine viel geringere Lebensdauer und wäre deutlich teurer.

Um den Investitionszuschuss für BHKW bis 20 kW_{el} (Kap. 1.4) zu bekommen, ist eine Mindestgröße für den Pufferspeicher erforderlich. Diese Pufferspeichergröße ist auch in der Abb. 44 angegeben. Sie ist als Mindestgröße anzusehen, die die Hersteller in der Regel anbieten. Der stromoptimierte Betrieb erfordert eher einen doppelt so großen Pufferspeicher.

3.2 Zukünftige Einsatzbedingungen für die KWK

Durch die stark gestiegenen Strompreise (Kap. 1.2.3) hat die Stromseite der KWK an Bedeutung gewonnen. Das bedeutet, dass die KWK sich mehr am Strommarkt orientieren muss. Die Wärmeerzeugung wird dann mehr zu einer Abwärmeverwertung, die mit einem Pufferspeicher zudem zeitlich variabel verfügbar ist. Für die KWK sind neben den Absichtserklärungen und Forderungen der Bundesregierung auch viele Randbedingungen wichtig, die das noch lange nicht sichtbare zukünftige »Strommarktdesign« kennzeichnen sollen:

- Die letzten Kernkraftwerke werden 2022 abgeschaltet, auch wenn Kreise der Wirtschaft sie unbedingt noch länger in Betrieb haben wollen
- Reduktion der Treibhausgase bei der Stromerzeugung bezogen auf die Werte von 1990: bis 2020 um 40 %, bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80–95 %
- Ausbau der regenerativen Stromerzeugung von 25 % im Jahr 2013 auf 40 bis 45 % im Jahr 2025
- Senkung des Stromverbrauchs bis 2020 um 10 % gegenüber 2011,
- Besondere Förderung von Offshore Windparks
- Das NABEG (Netzausbaubeschleunigungsgesetz) bekommt Gesetzeskraft
- Neubau von effizienteren konventionellen Kraftwerken, andererseits gehen die Benutzungszeiten modernster fossiler Kraftwerke stark zurück
- Höhe und Preis bei der Zuteilung von CO₂-Zertifikaten
- Weitere Verschärfung der Energieeinsparverordnung (Kap. 1.3)
- Der Eigenbedarf wird teilweise mit der EEG-Umlage belastet
- Förderprogramme wie das Gebäudesanierungsprogramm und das BHKW-Förderprogramm (Kap. 1.4)
- Zukünftiges Strommarktdesign ist nicht einmal andeutungsweise erkennbar
- Entwicklung der Elektromobilität und der Wärmebedarfsdeckung durch Wärmepumpen
- Entwicklung von Speichertechnologien (Batterien, Power-to-Gas).

Alle genannten Punkte sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Seit der Energiewende hat sich jedoch gezeigt, dass die veränderten Rahmenbedingungen sich eher günstig auf die Wirtschaftlichkeit der KWK ausgewirkt haben. Durch die prinzipiellen Vorteile der KWK (Effizienz, zeitlich flexibler Einsatz, Eigenerzeugung, Vermarktung, Umweltschutz) kann man auch für die Zukunft ein positives Bild aufzeigen. Es liegt in der Hand der Politik für das zukünftige Strommarktdesign die technischen und organisatorischen Wege zu finden und Anreizmechanismen zu entwickeln, um die KWK in das System einzubinden.

3.3 Umweltauswirkungen

Die Grundfrage »Welche Umwelteffekte werden durch welche Energiesysteme bewirkt?« wird seit ca. 30 Jahren intensiv wissenschaftlich untersucht. Während früher die Säure bildenden Luftschadstoffe Schwefeldioxid (SO_2 – »saurer Regen«) und Stickoxide (NO_x) im Mittelpunkt der Diskussion standen, ist im letzten Jahrzehnt die Schädlichkeit der sog. Treibhausgase im Hinblick auf einen Temperaturanstieg der Atmosphäre in den Vordergrund getreten. Für den Treibhauseffekt der Erdatmosphäre sind demnach die folgenden Spurengase besonders relevant:

- Kohlendioxid (CO_2),
- Ozon (O_3),
- Distickstoffoxid (N_2O),
- Methan (CH_4).

Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist CO_2 , dessen Anteil in der Atmosphäre seit der Industrialisierung um ca. 30 % angestiegen ist. Die Hauptquelle dieses Anstiegs ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe.

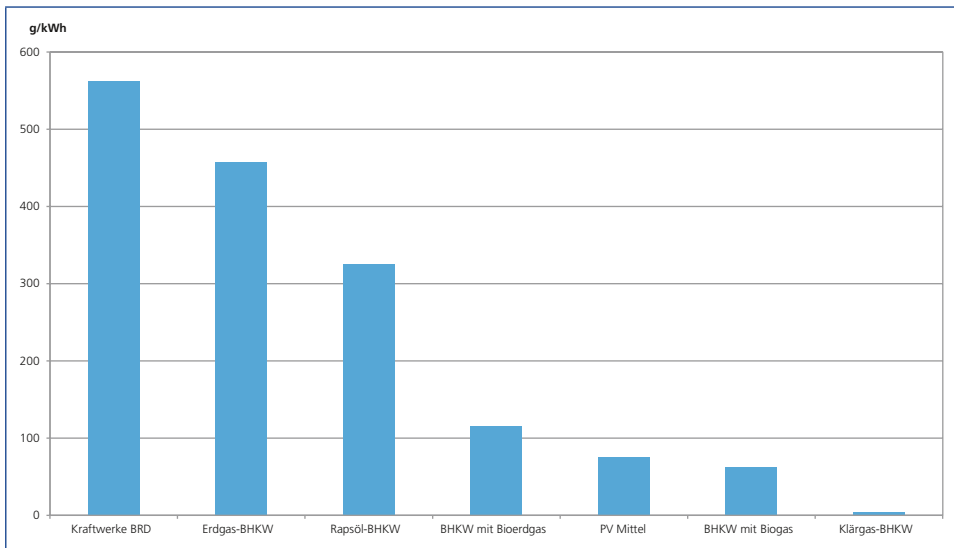
Neben den o.g. direkt wirkenden Spurengasen gibt es auch indirekt wirkende Spurengase, die zur Bildung oder zum Abbau der direkten Spurengase beitragen. Der Beitrag solcher klimarelevanten Spurengase wird relativ zum Treibhauspotenzial von CO_2 angegeben (CO_2 -Äquivalent). Das Treibhauspotenzial ist wegen der unterschiedlich langen Verweilzeiten der Spurengase in der Atmosphäre auch vom zeitlichen Betrachtungshorizont abhängig. Meistens wählt man eine Langzeitwirkung von 100 Jahren.

Außer dem Energiesparen sind die Erhöhung der Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung und die Umstellung der Primärenergieträger auf weniger kohlenstoffhaltige Brennstoffe die wirksamsten Maßnahmen und das erklärte Ziel der Bundesregierung.

Je nach Zustand bzw. Funktion wird Energie als Primär-, End- oder Nutzenergie bezeichnet. Energieträger sind physikalische Erscheinungsformen und Stoffe, aus denen direkt oder nach Umwandlung Nutzenergie (hauptsächlich Licht, Kraft und Wärme) gewonnen werden kann. Primärenergieträger sind die von der Natur in ihrer ursprünglichen Form angebotenen Energieträger (z. B. Steinkohle, Erdöl, Erdgas, Wind, Biomasse, Uran).

Der Endenergieträger, der beim Endverbraucher eingesetzt wird (z. B. Heizöl, Strom) ist in der Regel durch mehrere Umwandlungen und Behandlungen aus dem Primärenergieträger entstanden. Die Endenergieträger werden bei den Verbrauchern (Haushalte, Kleinverbraucher, Verkehr, Industrie) in Nutzenergie umgewandelt (z. B. in Motoren, Generatoren, Öfen, Lampen). In der Kette von der Primärenergie bis zur Nutzenergie treten vor allem bei der Stromerzeugung erhebliche Umwandlungs- und Transportverluste auf. Der KWK mit den geringsten CO_2 -Emissionen ist daher der Vorzug zu geben. Die CO_2 -Emissionen von KWK-Systemen sind beim Einsatz von regenerativen Brennstoffen niedriger als die des gegenwärtigen Kraftwerk-parks, der auch schon einen regenerativen Anteil von 25 % enthält (Abb. 40).

Mit dem Emissionsmodell GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) wurde 1989 erstmals versucht, diese Kette mit ihren Emissionen in einem Modell abzubilden. Inzwischen liegt die vierte Version als PC-Programm vor und ist im Internet kostenlos abzurufen [19]. GEMIS berücksichtigt die vorgelagerten Energie-, Stoff- und Transportprozesse.



■ **Abb. 45:** CO₂-Äquivalent-Emissionen verschiedener stromerzeugender Systeme

Das bedeutet, dass z. B. auch die Energiemengen zum Bau und Betrieb von Bergwerken, zum Bau und Betrieb der Eisenbahn oder der Gaspipeline, aber auch der Bau einer KWK-Anlage in dem Modell enthalten sind. In GEMIS können jegliche Emissionen verglichen werden, die z. B. durch ein KWK-System oder konventionelle Strom- und Wärmezeugung abgegeben werden. Bei so vielen unterschiedlichen KWK-Prozessen ist es kaum denkbar, einen speziellen Fall nicht erfassen zu können. Die Daten von GEMIS sind inzwischen in das Datensystem von ProBas des Umweltbundesamtes eingeflossen [20]. Die einzelnen Studien zu den CO₂-Emissionen des deutschen Kraftwerksparks unterscheiden sich je nach Interessenslage doch erheblich [21].

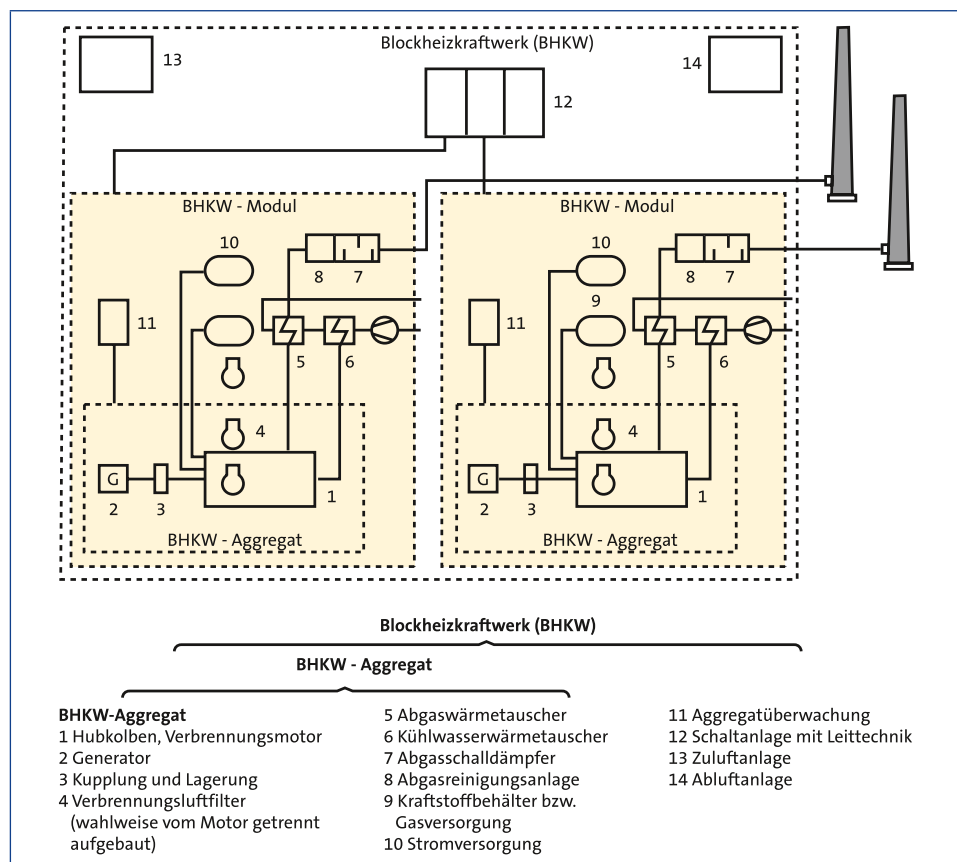
4 BHKW-Technik

4.1 Definition

Die Definition und Abgrenzung der motorbetriebenen BHKW-Komponenten zeigt Abb. 46, wobei zwischen dem BHKW-Aggregat, dem BHKW-Modul und der gesamten Anlage (BHKW) unterschieden wird.

BHKW werden heute bis zu einer Größe von 1 000 kW_{el} als anschlussfertige, weitgehend standardisierte Kompaktanlagen geliefert, die alle gängigen DIN- und DVGW-Bestimmungen sowie die Vorschriften der Stromversorger erfüllen.

Zu einer BHKW-Anlage gehört weiterhin die Abgasabführung ins Freie, nicht jedoch der Schornstein bzw. ein Kamin.



■ **Abb. 46:** Definition und Abgrenzung der BHKW-Komponenten in Anlehnung an DIN 6280-14

4.2 Bewertungskriterien

Maschinen und technische Anlagen können in Bezug auf Ihren Nutzen mittels Kennzahlen eingeordnet werden. Bei KWK-Anlagen geht es um die rationelle Energienutzung. Daher sind die energetischen Kennzahlen (Abb. 24) wesentlich und für die weiteren ökonomischen und ökologischen Betrachtungen unbedingt notwendig.

Aus den drei Basisgrößen

- Stromerzeugung (S),
- Wärmeerzeugung (Q) und
- Brennstoffverbrauch (B)

wie sie in der Abb. 2 dargestellt sind können weitere Kenngrößen berechnet werden. Eine oft bei KWK-Anlagen genannte – davon abgeleitete – Größe ist die Stromkennzahl (SK). Sie gibt das Verhältnis von Strom- zu Wärmeerzeugung an ($SK = S/Q$). Sie ist damit ein Maß für die Stromausbeute. Da der Strom auch wirtschaftlich gesehen deutlich höherwertiger als die Wärme ist, werden möglichst hohe Stromkennzahlen angestrebt. Diesel-BHKW und Kombi-Anlagen kommen dieser Forderung mit einer SK von eins am nächsten, während der klassische Dampfkraftprozess und auch die Stirlingmotoren bei nur 0,1 bis 0,3 liegen. Den wirtschaftlichen Nachteil, den KWK-Anlagen mit niedriger Stromkennzahl haben, kann man durch niedrigere Brennstoffkosten ausgleichen. Eine Kompensation über geringere Anlagenpreise ist nur begrenzt möglich, weil die Kapitalkosten nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten eines BHKW haben.

Eine weitere Größe ist der Nutzungsgrad (η) der gesamten Anlage, der sich auf einen längeren Zeitraum, meist ein Jahr, bezieht:

$$\eta_{\text{ges}} = (S + Q)/B$$

Der Nutzungsgrad erlaubt es, die Effektivität einer Anlage im tatsächlichen Betrieb zu bestimmen, da Verluste, Eigenbedarf, Betriebsunterbrechungen und Teillast durch Jahreswerte berücksichtigt werden. Strom und Wärme sind als Nettowerte einzusetzen, d. h. es muss der Eigenbedarf berücksichtigt werden. Mit dem Vergleich von Nutzungsgraden können auch unterschiedliche Techniken (z. B. BHKW versus Gasturbine mit Abhitzeessel) bewertet werden.

Im Gegensatz zum Nutzungsgrad, der Energiemengen in Beziehung setzt, werden beim Wirkungsgrad Leistungen verglichen. Die Leistungen ergeben sich aus kurzzeitigen Messungen der Energieströme im Minutenbereich. Die Anlage wird dabei mit Nennleistung gefahren. Der Wirkungsgrad ist immer höher als der Nutzungsgrad, weil beim Wirkungsgrad die Anfahrverluste und die Teillastzeiten mit schlechteren Wirkungsgraden nicht berücksichtigt werden. Aus verständlichen Gründen werden von den Herstellern nur Wirkungsgrade angegeben.

Sowohl der Nutzungsgrad als auch der Wirkungsgrad können sich nur auf den Strom oder nur die Wärme beziehen. Man spricht dann von dem elektrischen oder thermischen Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad. Die elektrischen Wirkungsgrade nahezu aller am Markt vorhandener BHKW sind in der Abb. 47 dargestellt. Je größer die Anlagen sind, desto höher ist auch der elektrische Wirkungsgrad. Größere Anlagen und speziell die Dieselmotoren haben daher prinzipiell einen wirtschaftlichen Vorteil, weil sie eine höhere Stromkennzahl haben. Beim Gesamtwirkungsgrad ist kaum eine Größenabhängigkeit zu erkennen.

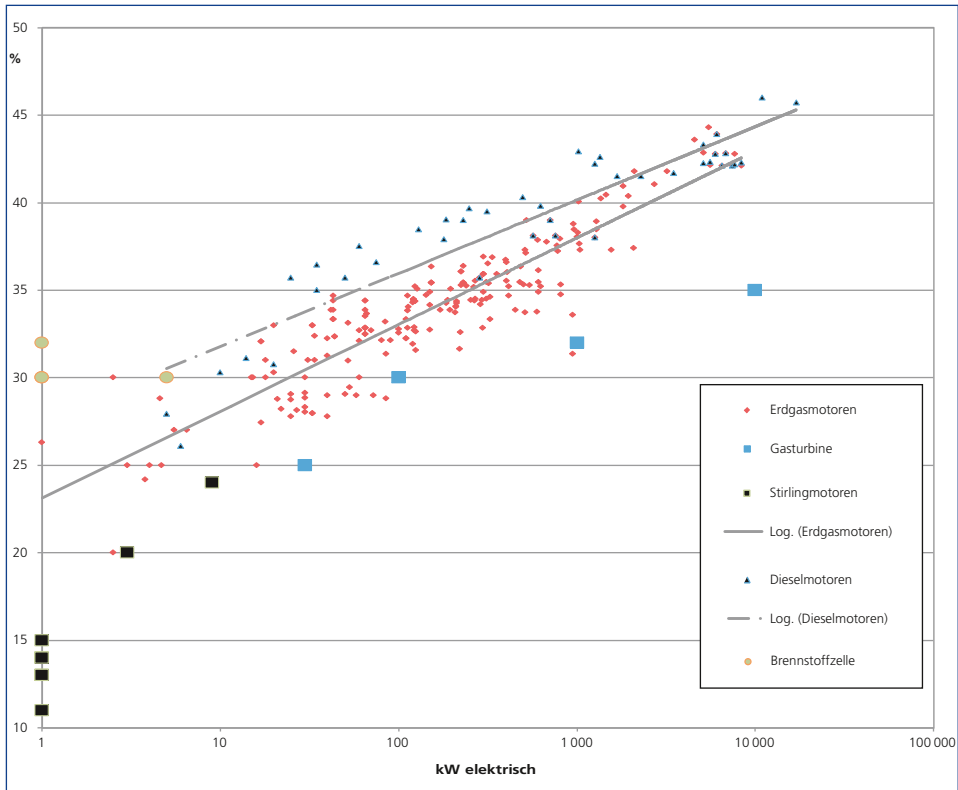


Abb. 47: Elektrischer Wirkungsgrad

$$\eta_{el} = S/B \text{ bzw. } \eta_{th} = Q/B$$

Die Summe aus dem elektrischen und dem thermischen Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad ergibt dann den Gesamtwirkungs- bzw. Gesamtnutzungsgrad.

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th}$$

Eine weitere Kenngröße ist eine Zeitangabe: Die Ausnutzungsdauer oder auch Vollbenutzungsstunden, die die Einsatzdauer einer Anlage beschreiben soll. Man bezieht die erzeugte Wärme oder den Strom auf die entsprechende Nennleistung der Anlage. Je höher die Ausnutzungsdauer, desto mehr lohnt sich die Anlage. Denn der Anteil der festen Kosten nimmt ebenso ab wie die gesamten Erzeugungskosten geringer werden.

4.3 Flächenbedarf und Gewicht

Aus Kostengründen sollte man anstreben, das BHKW möglichst im Heizungskeller bzw. in der Nähe des Heizkessels aufzustellen. Damit werden Kosten für Baumaßnahmen und lange Einbindungsleitungen eingespart. In der folgenden Abb. 48 ist der Flächenbedarf für fünf typische BHKW-Modulgrößen aufgeführt. Bei den größeren Anlagen muss in der Regel ein Schaltschrank berücksichtigt werden. In einzelnen Fällen (z. B. Dachheizzentrale) kann auch

das Gewicht eine Rolle spielen, und die Statik des Raumes muss überprüft werden. Die vom Hersteller genannten Leergewichte sind deshalb ebenfalls mit aufgeführt.

Die angegebenen Durchmesser der Gas- und Abgasanschlüsse sind druckabhängig. Bei längeren Leitungen muss deshalb der nächst größere Durchmesser gewählt werden.

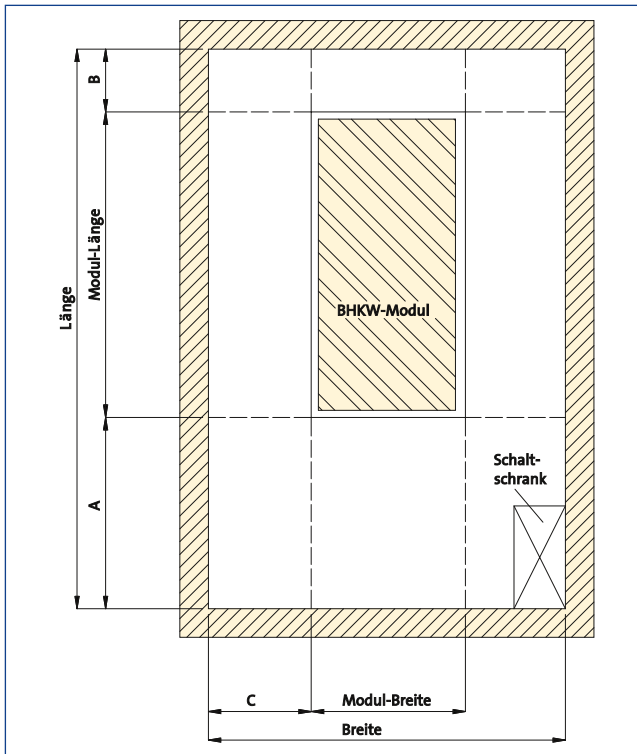
Für den Strom gibt es einen Mindest-Querschnitt, der von der angeschlossenen elektrischen Leistung abhängig ist. Empfehlenswert ist jedoch, einen größeren Querschnitt zu nehmen, weil die Verluste sonst zu groß werden. Immerhin werden die Leitungen 5000 oder mehr Stunden im Jahr belastet. Im Zweifelsfall kann man sich mit einer kleinen Wirtschaftlichkeitsberechnung die Mehrkosten gegenüber den Verlusten an Stromgutschriften ausrechnen.

Außer dem Platzbedarf für das Modul wird noch Platz für Montage- und Wartungsarbeiten benötigt. Dies ist in Abb. 49 mit den Größen A, B und C dargestellt.

Die Maße sind als Richtgrößen zu nehmen. In Einzelfällen können spezielle Aufstellungsvarianten mit geringerem Platzbedarf vom Hersteller ausgeführt werden. Wenn mehrere Module aufgestellt werden, können Abstände eingespart werden.

| | BHKW Größe 1 | BHKW Größe 2 | BHKW Größe 3 | BHKW Größe 4 | BHKW Größe 5 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Elektr. Leistung | 1 kW _{el} | 5 kW _{el} | 15 kW _{el} | 50 kW _{el} | 251 kW _{el} |
| Leergewicht | 82 kg | 510 kg | 750 kg | 1 500 kg | 4 800 kg |
| Modul-Länge | 118 mm | 1 100 mm | 1 500 mm | 2 400 mm | 4 626 mm |
| Modul-Breite | 32 mm | 720 mm | 1 000 mm | 1 200 mm | 1 532 mm |
| Modul-Höhe | 113 mm | 1 000 mm | 1 000 mm | 1 600 mm | 1 950 mm |
| Abstand A | 600 mm | 600 mm | 1 300 mm | 1 500 mm | k. A. |
| Abstand B | 150 mm | 150 mm | 500 mm | 500 mm | |
| Abstand C | 600 mm | 600 mm | 500 mm | 800 mm | |
| Gesamt-Länge | 2 000 mm | 1 850 mm | 3 300 mm | k. A. | k. A. |
| Gesamt-Breite | 1 500 mm | 1 920 mm | 2 000 mm | k. A. | 2 438 mm |
| Gesamt-Höhe | 2 000 mm | 1 500 mm | 2 000 mm | 2 000 mm | 2 591 mm |
| Anschluss Heizung | k. A. | k. A. | DN 25 | DN 40 | DN 50 |
| Anschluss Abgas | DN 25 | DN 25 | DN 70 (PPS-Rohr) | DN 65 | DN 150 |
| Anschluss Gas | DN 15 | DN 15 | DN 20 | DN 25 | DN 50 |
| Anschluss Strom min: | 1,5 mm ² | 1,5 mm ² | 4 mm ² | 25 mm ² | 95 mm ² |
| empfehlenswert | 2,5 mm ² | 2,5 mm ² | 6 mm ² | 35 mm ² | 120 mm ² *) |
| *) Einzeladern; sonst mehradrige Cu-Kabel | | | | | |

■ **Abb. 48:** Typische Maße und Gewichte von BHKW (ca.-Angaben, Abstände beziehen sich auf Abb. 49)



■ **Abb. 49:** Aufstellplatz eines BHKW-Moduls

4.4 Anlagenkomponenten

4.4.1 Motoren

BHKW-Antriebsmaschinen sind umgebaute oder für den Dauerbetrieb modifizierte Serienbauarten aus der PKW-, LKW- oder Schiffsmotorenproduktion. Es sind üblicherweise Langsamläufer mit Drehzahlen von 1500 Umdrehungen/Minute (Groß-BHKW über 3 MW_{el} haben oft weit geringere Drehzahlen).

Bei den Antriebsmotoren unterscheidet man

- Gasotomotoren (auch Gasmotoren genannt),
- Dieselmotoren,
- Dieselmotoren (auch Zündstrahlaggregate genannt),
- Gasturbinen und
- Stirlingmotoren.

Dazu kommen noch die Brennstoffzellen, die ohne Antriebsmotoren auskommen.

Da Erdgas der häufigste BHKW-Brennstoff ist, sind überwiegend Gasotomotoren verbreitet. Beim Betrieb unter Nennlast haben Dieselmotoren im Durchschnitt höhere mechanische und damit auch höhere elektrische Wirkungsgrade als Gasotomotoren (Abb. 47). Daher verschiebt sich beim Diesel-BHKW die Brennstoffausnutzung zugunsten der Stromausbeute. Die Leistung von Gasmotoren kann immerhin bis etwa 60 % der Nennlast ohne nennenswerte

Wirkungsgradeinbuße abgesenkt werden. Unter 50 % Teillast fallen die Wirkungsgrade aber ab. Deshalb wird der Teillastbetrieb häufig nach unten begrenzt. Der elektrische Wirkungsgrad von Biogasmotoren ist vergleichbar dem von Erdgasmotoren.

Der Dieselmotor kann ähnlich hohe elektrische Wirkungsgrade erreichen wie der Dieselmotor. Er benötigt aber für den Betrieb ständig zwei Kraftstoffe, nämlich Gas als Hauptbrennstoff und eine kleine Menge Zündöl (Diesel/Heizöl), das in das hoch verdichtete Gas-Luftgemisch eingespritzt wird und dieses entzündet. Der Zündölanteil beträgt 5 bis 10 % der bei Nennleistung benötigten Brennstoffmenge und kann wahlweise ohne Unterbrechung stufenlos bis auf 100 % Dieselanteil umgeschaltet werden. Diese Motoren spielen aber bei den meisten BHKW-Anwendungen eine untergeordnete Rolle.

In den letzten Jahren hat sich gerade bei den Gasturbinen unter 100 kW_{el} die Rekuperator-Technik durchgesetzt, um elektrische Wirkungsgrade von 25 bis 28 % zu erreichen. Ein Rekuperator nutzt die Wärmeenergie aus den Turbinenabgasen und wärmt damit die Verdichteraustrittsluft auf, bevor diese in die Brennkammer gelangt. Dadurch vermindert sich der benötigte Brennstoffeinsatz zu Gunsten des elektrischen Wirkungsgrades. Trotzdem fallen die Wirkungsgrade von Motorenanlagen derselben Größenklasse noch um 5 bis 10 Prozentpunkte höher aus (Abb. 47), was sich bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung deutlich bemerkbar macht.

Die elektrischen Wirkungsgrade der Brennstoffzellen und der Stirlingmotoren liegen deutlich über bzw. unter denen der klassischen Verbrennungsmotoren (Abb. 45). In den kommenden Jahren wird eher die Brennstoffzelle beim elektrischen Wirkungsgrad zulegen.

4.4.2 Generatoren

BHKW bis zu 1 MW_{el} werden niederspannungsseitig an das 400-V-Netz angeschlossen. Als Stromerzeuger gibt es zwei verschiedene Bauarten für den BHKW-Betrieb, nämlich Asynchron- und Synchrongeneratoren. Die Auswahl ist abhängig vom Anwendungszweck, den lokalen Netzverhältnissen und von den Anforderungen des Netzbetreibers.

Im Netzparallelbetrieb laufen überwiegend Asynchrongeneratoren, die robust und preiswert sind sowie keine Regeleinrichtungen benötigen. Das Netz gibt Spannung und Frequenz vor und liefert den zur Erregung notwendigen Magnetisierungsstrom (Blindstrom). Die Stromversorgungsunternehmen fordern daher i. d. R. bei Anlagen ab etwa 15 kW_{el} eine Blindstrom-Kompensation. Werden sie im Stillstand ans Netz geschaltet, funktionieren sie als Elektromotor und können quasi als Anlasser das BHKW zum Sanftanlauf mit Anlaufstrombegrenzung starten. Diesen Startvorgang nennt man Generatorstart.

Synchrongeneratoren benötigen für den Netzparallelbetrieb eine Synchronisiereinrichtung. Sie können je nach Anforderung auch Blindstrom liefern. Synchrongeneratoren sind außerdem in der Lage, bei Bedarf ein eigenes Netz (Inselnetz) aufzubauen und zu versorgen, in dem Spannung und Frequenz durch Regler konstant gehalten werden. Sie sind daher unabdingbar bei Insel- und Netzersatzbetrieb. Das BHKW startet mit Hilfe eines Netzstartgeräts bzw. Batterieanlassers (beim Insel- und Netzersatzbetrieb).

Die Generatoren werden in luft- oder wassergekühlter Ausführung eingebaut. Die häufiger anzutreffende wassergekühlte Bauart erzielt eine von ihrer Größe abhängige elektrische und thermische Mehrleistung. Diese beträgt beispielsweise bei einem 50 kW_{el}-Modul etwa 2 kW_{el}

und 5 kW_{th}. Dadurch verbessert sich der BHKW-Gesamtwirkungsgrad um ein bis zwei Prozentpunkte. Die Mehrinvestitionen für den wassergekühlten Generator amortisieren sich bereits nach wenigen Jahren. Außerdem senkt die Wasserkühlung den Kühlluftbedarf des Moduls.

Die Generatoren werden wie andere elektrische Maschinen durch übliche Schalteinrichtungen gegen Überlast und Kurzschluss geschützt. Die elektrische Netzanbindung kann bis zu einer installierten BHKW-Leistung von maximal 1 000 kW_{el} direkt an das vorhandene Niederspannungsnetz erfolgen. Für den Netzparallelbetrieb sind insbesondere die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des zuständigen Stromversorgungsunternehmens sowie die BDEW-Richtlinie »Parallelbetrieb mit dem Niederspannungsnetz« zu beachten. Bei anschlussfertigen Kompaktgeräten sind diese Vorschriften in der Regel alle erfüllt, so dass der Anwender damit nichts zu tun hat.

4.4.3 Steuerungstechnik

BHKW-Module werden für den vollautomatischen Betrieb ohne Beaufsichtigung ausgelegt. Die zum Lieferumfang gehörende Modulsteuerung übernimmt dabei alle erforderlichen Steuer-, Regel- und Überwachungsaufgaben für das Modul und die zugehörigen Hilfsaggregate. Zahlreiche am Modul installierte elektrische Messfühler/Sensoren (z. B. für Temperaturen, Drücke, Füllstände, Strom, Spannung) erfassen die verschiedenen Betriebszustände und leiten diese an Speichermodule weiter. Im Wesentlichen erfüllt die Modulsteuerung folgende Grundfunktionen:

- Motorsteuerung, d. h. An- und Abfahren des Moduls, Leistungsregelung, Auswahl einer Betriebsart: wärmegeführt, zeitgesteuert, einspeiseoptimiert oder eigenverbrauchsoptimiert (Kap. 2.4),
- Motorüberwachung, d. h. Kontrolle, Anzeige und Abspeicherung der verschiedenen Betriebszustände,
- Netz- und Generatorüberwachung (einschl. Synchronisation, Frequenz- und Leistungsregelung),
- Überwachung, Anzeige und Abspeicherung der Kenngrößen für die erzeugte elektrische Leistung,
- Regelung der Abgasreinigungsanlage,
- Schnittstelle für Störmelde- bzw. Datenfernübertragung bzw. für Anbindung an übergeordnete Leittechnik,
- Notabschaltung.

Eine funktions- und eigensichere Modulsteuerung ist für den störungsfreien Betrieb der Anlage von wesentlicher Bedeutung. Die Steuerung ist modular aufgebaut. Die Möglichkeit, über Fernabfragen den Zustand der Anlage zu kontrollieren und einzugreifen ist heute Standard. Die frühere »Geschichte« der Anlage kann für den Service eine wichtige Information sein.

Werden mehrere BHKW an verschiedenen Orten zu einer »Einheit« zusammengeschaltet und von einer Leitwarte gesteuert, spricht man von einem Virtuellen Kraftwerk. In Feldversuchen werden erste Erfahrungen gesammelt. Voraussetzung ist jedoch die oben beschriebene Steuerung mit der Möglichkeit, den Betriebszustand zu überwachen und in den Anlagenbetrieb von außen einzugreifen und zu optimieren.

4.4.4 Abgastechnik

Die Abgasleitungen müssen grundsätzlich die zuverlässige Ableitung der BHKW-Abgase ins Freie sicherstellen. Abgasanlagen für BHKW können praktisch problemlos ausgeführt werden als

- Überdrucksystem,
- Unterdrucksystem oder als
- Mehrfachbelegung mit Unterdruck.

Für den Druckverlust der Abgasleitung ist der max. zulässige Abgasgegendruck (ca. 350 bis 800 mbar) gemäß BHKW-Hersteller zu beachten. Die Leitungen sind gasdicht, schallentkoppelt und wärmeisoliert zu verlegen. Sie sollten auf möglichst kurzem und geradem Wege vom BHKW-Anschluss nach außen führen.

Beim Überdrucksystem führt man eine durchgehende Rohrleitung (»Auspuffrohr«) vom BHKW bis nach außen. Diese Abgasleitung kann innerhalb von Gebäuden in hinterlüfteten Kanälen und Schächten verlaufen. Außerhalb von Gebäuden kann die Abgasleitung an der Außenfassade bis über Dach verlegt werden.

Beim Unterdrucksystem werden die BHKW-Abgase in einen nicht belegten (freien) Schornsteinzug ohne zusätzliches Abgasrohr eingeleitet, wodurch sich Montageaufwand und Kosten deutlich senken lassen. Diese Abgasanlage arbeitet wie ein Abgaszug einer Feuerstätte im Unterdruck (Kaminzug). Eine weitere Möglichkeit ist die Mehrfachbelegung, bei der die BHKW- und Kessel-Abgase in einen gemeinsamen Schornsteinzug eingeleitet und ebenfalls über Unterdruck abgeführt werden. Die Funktionsfähigkeit des Unterdrucksystems muss sowohl beim freien als auch beim mehrfach belegten Schornstein durch eine Berechnung nach DIN 4705 nachgewiesen werden.

Verwendet werden können Steckrohrsysteme mit Bauartzulassung, die einfach zu montieren sind. Die horizontale Verbindungsleitung vom BHKW bis zum Steigrohr bzw. zur Schornstein-einmündung kann in »schwarzem« Stahlrohr (St 37) ausgeführt werden. Eine kontinuierliche Kondensatableitung ist sicherzustellen. Das anfallende Kondensat soll vor Einleitung ins Abwassernetz entsprechend den örtlichen Einleitungsbedingungen und abwassertechnischen Vorschriften behandelt werden (z. B. Neutralisation). Bei Erdgas-BHKW mit Dreiwege-Katalysator ist unter bestimmten Bedingungen die Einleitung auch ohne Neutralisation zulässig (s. Abwassertechnische Vereinigung, ATV-Merkblatt DWA-M 252 und das Arbeitsblatt A 115) [22, 23].

Da der Schornsteinfeger immer die sichere Benutzbarkeit der Abgasleitung zu bescheinigen hat, empfiehlt sich eine rechtzeitige Abstimmung mit ihm. Im Allgemeinen erleichtert der Einbau von Leitungssystemen mit Bauartzulassung oder von Edelstahlrohren (Werkstoff-Nr. 14571, Rohrwandstärke mindestens 2 mm) als Kaminzug die Bescheinigung, da dann keine Beanstandungen zu erwarten sind.

Die meisten Hersteller haben nicht ohne Eigennutz spezielle Bausätze mit Bauartzulassung für die abgastechnische Einbindung. Die Heizungsinstallateure wählen den sicheren Weg und befolgen die herstellerspezifischen »Vorschriften«, Anleitungen, Anweisungen und Empfehlungen.

Die TA-Luft schreibt Emissionsgrenzwerte für genehmigungsbedürftige Verbrennungsmotorenanlagen vor (Kap. 1.3.7). Auch bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen wird die Einhaltung der TA-Luft verlangt, da deren Grenzwerte als Stand der Technik angesehen werden.

Das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren ist abhängig von:

- dem eingesetzten Brennstoff,
- der Motorenbauart und der Motoreneinstellung,
- der Gesamtfeuerungsleistung.

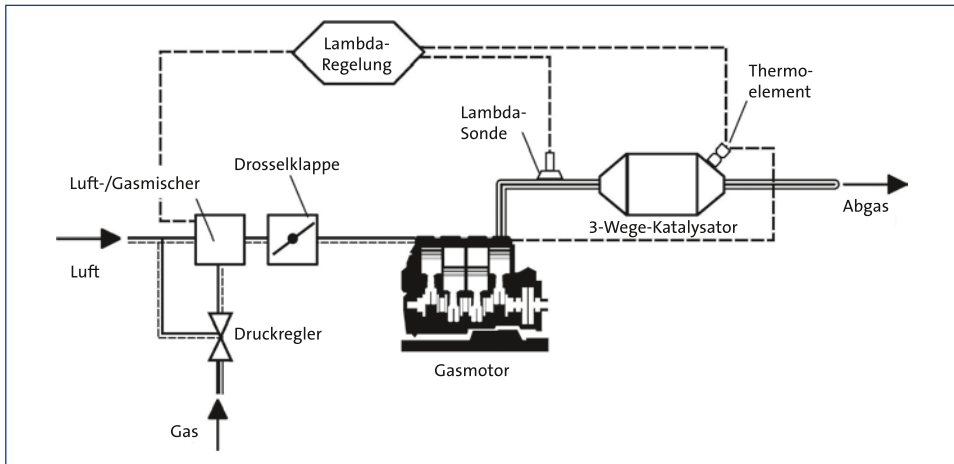
Während bei Gasmotoren im reinen Erdgasbetrieb naturgemäß im Wesentlichen die Stickstoffoxid (NO_x)-Emissionswerte als kritisch zu betrachten sind, kommen bei Diesel- und Gasdieselmotoren außer NO_x zusätzlich noch die Emissionen von Partikeln (Ruß) und organischen (Nicht-Methan-) Kohlenwasserstoffen (C_mH_n) hinzu.

Bei der Emissionsminderung unterscheidet man zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen sowie Kombinationen aus beiden Verfahren. Primärmaßnahmen sind motorische Maßnahmen konstruktiver oder betrieblicher Art (wie z. B. Brennraumgestaltung, Verdichtungsverhältnis oder Abmagerung Brenngas/Luft-Verhältnis, Änderung des Zündzeitpunkts bzw. der Motorbelastung), die dazu führen, dass höhere Schadstoffkonzentrationen erst gar nicht entstehen. Sekundärmaßnahmen nennt man alle dem Verbrennungsprozess nachgeschalteten Abgasbehandlungsprozesse (z. B. Einsatz von Katalysatoren).

Bei bestimmten Brennstoffen wie Bio-, Klär- und Deponiegas sollten Katalysatoren nicht (oder nur in Verbindung mit einer zuverlässigen Gasreinigungsanlage) eingesetzt werden, da die in den Gasen üblicherweise enthaltenen Katalysatorgifte (wie Schwefel, Chlor, Fluor, Phosphate, Silizium usw.) einen vorzeitigen Funktionsausfall verursachen können.

Zur Minimierung der Abgasemissionen werden folgende Verfahren angewandt, wobei für jedes dieser Verfahren eigene Einsatzbereiche und Beschränkungen gelten:

- Dreiwegekatalysatoren mit $\lambda=1$ -Regelung werden bei erdgasbetriebenen Ottomotoren am häufigsten eingesetzt. Ihr Einsatz erstreckt sich bis etwa 1 000 kW Motorleistung. Sie erreichen die niedrigsten Abgasemissionen gleichzeitig bei den drei Schadstoffarten NO_x , CO und C_mH_n . Die Grenzwerte der TA Luft werden weit unterschritten (Abb. 50). Der Katalysator sollte nach etwa 15 000 Betriebsstunden ausgetauscht und die λ -Regelung turnusgemäß überprüft bzw. nachjustiert werden.
- Magermotoren sind Gasottomotoren, die mit hohen Luftzahlen ($\lambda = 1,6$ bis $1,8$) betrieben werden und keine aufwendige Gemischregelung benötigen. In Verbindung mit weiteren primärseitigen Maßnahmen bedingt der hohe Luftüberschuss verringerte NO_x -Emissionen. Die Magermotortechnik lässt sich über einen großen Leistungsbereich (bis etwa 1 500 kW) einsetzen und ist auch für »Problemgase« wie Klär- und Deponiegas geeignet. Sie erreicht nicht ganz so niedrige Emissionen wie der $\lambda=1$ -Motor, die festgelegten Grenzwerte der TA Luft werden aber sicher eingehalten.
- Die selektive katalytische Reduktion (SCR-Verfahren) ist bei den mit Luftüberschuss (Luftzahl $\lambda > 1$) betriebenen Diesel- und Dieselmotoren neben Primärmaßnahmen eine weitere Möglichkeit, die NO_x -Emissionen zu verringern. Der selektiv arbeitende Katalysator benötigt hierzu ein weiteres Reduktionsmittel (z. B. Harnstoff oder Ammoniak). Allerdings kann dieses Verfahren aufgrund der hohen Kosten normalerweise nur bei großen



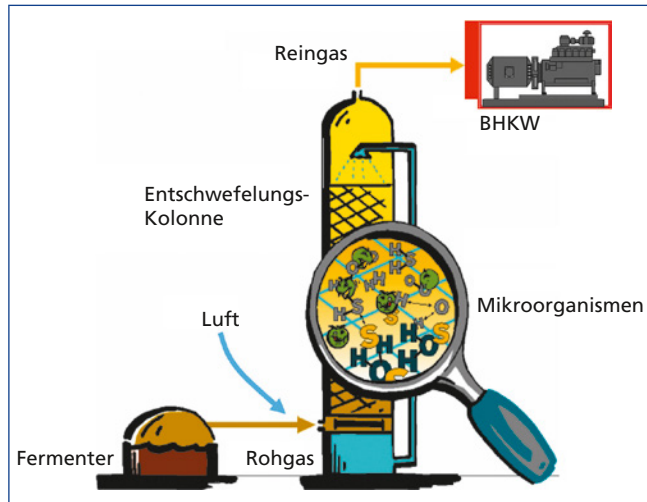
■ **Abb. 50:** Abgasemissionsminderung durch Dreizegekatalysator mit Lambda-Sonde

Einheiten ab ca. 500 kW eingesetzt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Katalysatoren sich durch Ruß im Abgas zusetzen können.

- Ruß- bzw. Partikelfilter sollen bei Diesel- bzw. Dieselmotoren feste Abgasbestandteile zurückhalten. Zur Minderung der Rußemissionen werden Faserstrickfilter eingesetzt. Die Rußpartikel werden im Filter zu 90 % zurückgehalten. Bei Temperaturen über 600 °C verbrennt der Ruß zu CO_2 und CO. Die Filter haben eine katalytische Beschichtung, wodurch die Abbrandtemperatur um ca. 150 °C herabgesetzt wird. Der Rußfilter kann im Rahmen von Wartungsarbeiten alle 1 500 Stunden von Inertanteilen gesäubert und gewaschen werden.
- Eine biologische Entschwefelung von Bio-, Klär- und Deponiegasen arbeitet mit Mikroorganismen. Es werden H_2S -Gehalte von weit weniger als 100 ppm erreicht. Das Verfahren arbeitet ohne Abfälle. Der gewonnene Schwefel kann in der Landwirtschaft eingesetzt werden (Abb. 51).
- Eine spezifische Primärmaßnahme für Dieselmotoren stellt die Zumischung von Wasser zum Diesel dar. Durch Einspritzung einer Diesel-Wasser-Emulsion werden sowohl die NO_x als auch die Ruß-Emissionen bei gleich bleibendem Wirkungsgrad beträchtlich reduziert.

Dreizegekatalysator und Magermotor finden in BHKW am häufigsten Verwendung; überwiegend in Neuanlagen. Grundsätzlich sind bei Brennstoffen mit Katalysatorgiften motorseitige Maßnahmen (Magermotortechnik) der Emissionsminderung zu bevorzugen. Die Nachrüstung in Altanlagen dürfte nur bei Groß-BHKW sinnvoll sein und muss im Einzelfall geprüft werden.

■ **Abb. 51:** Biologische Entschwefelung: Reduzierung des H_2S -Gehaltes im Biogas weit unter 100 ppm



4.4.5 Schallschutztechnik

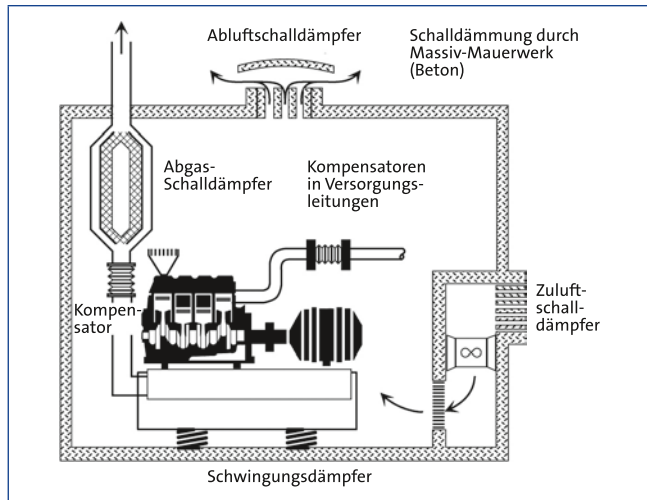
Der Geräuschpegel eines BHKW-Moduls wird hauptsächlich durch den Verbrennungsmotor (Zündung und Drehzahl) bestimmt. Beim Gasotomotor ist der Geräuschpegel nur etwa halb so groß wie der eines vergleichbaren Dieselmotors. Spezielle Schallschutzmaßnahmen am Modul, wie Abgasschalldämpfer, elastische Lagerung der Motor-Generator-Einheit und des Modulrahmens begrenzen die Luft- und Körperschallübertragung an die Umgebung (Abb. 52). Das Modul wird schwingungs isoliert auf den Boden gesetzt und die anzuschließenden Rohrleitungen und Kanäle werden mit elastischen Elementen (Kompensatoren) akustisch getrennt. BHKW-Kompaktmodule können daher direkt in Heizzentralen aufgestellt werden. Bei besonderen Schallschutzanforderungen gibt es folgende Möglichkeiten, die Maschine von der Bodenplatte zu entkoppeln:

- Zusätzlicher Fundamentblock unmittelbar unter dem BHKW-Modul (Schwingungsdämpfung) auf schwingungsdämpfender Unterlage,
- Trennung des Maschinenfundamentes vom Gebäudefundament (durch Aufschneiden oder Schwingungsdämpfer).

Je nach Bedarf kann für jedes einzelne BHKW-Aggregat eine Schallschutzhaube vorgesehen werden bzw. für mehrere Aggregate eine gemeinsame Schallschutzkabine. Bei mit Schallschutzhauben ausgestatteten Einzelaggregaten liegt der Schallpegel in 1 m Abstand bei etwa 62 dB(A) oder darunter. Für größere BHKW-Anlagen bietet sich die Schallisolierung des Aufstellungsraumes an.

Die langjährigen Erfahrungen der Hersteller und Betreiber von BHKW haben zu bewährten Lösungen der Schalldämmung geführt. Dadurch ist ein sicheres Einhalten der Vorgaben der TA Lärm, wie zum Beispiel des Immissionswertes in Gebäuden nachts von 25 dB, gewährleistet.

■ **Abb. 52:** Schallschutzmaßnahmen an einem BHKW-Modul



4.5 BHKW-Integration

4.5.1 Hydraulische Einbindung

BHKW ohne integrierte Spitzenlastbrenner werden neben der Kesselanlage wie ein zusätzlicher Wärmeerzeuger installiert. Die Rücklauftemperatur im Heiznetz sollte möglichst niedrig sein ($< 70^{\circ}\text{C}$) und die BHKW-Anlage sollte immer Vorrang vor den Kesseln haben (Grundlastbetrieb), damit eine möglichst lange taktfreie Laufzeit sichergestellt ist. Der Vorrangbetrieb ist Aufgabe der Zentralsteuerung (Kap. 4.5.2).

Da die installierte BHKW-Wärmeleistung nur auf einen Anteil (meistens kleiner 30 %) des gesamten Wärmeleistungsbedarfs der Verbraucher ausgelegt ist (Kap. 3.1.1), sind die installierten Heizleistungen bzw. Heizwasservolumenströme der Kesselanlage deutlich höher als die der BHKW-Anlage. Deswegen ist es am besten, wenn die Heizkessel mit modulierenden Brennern ausgestattet sind, da sie dann den Wärmebedarfsverlauf im Folgebetrieb flexibler nachfahren können.

Generell ist darauf zu achten, dass die hydraulische Einbindung der BHKW-Anlage möglichst einfach, kostengünstig und betriebssicher ausgeführt wird. Bei vorhandenen Heizanlagen sollten größere Umbauarbeiten vermieden werden. Gleichzeitig empfiehlt sich eine Entschlammung des Heiznetzes durch einen zeitweise angeschlossenen Filterbehälter, wodurch die BHKW-Wärmetauscher entlastet werden können. Auch beim Befüllen der Anlage sind die herstellersizifischen Vorgaben und die VDI 2035 zu beachten. Eine Befüllung mit dem Trinkwasser vor Ort entspricht heute nicht mehr dem Stand der Technik.

Maßgebliche Kriterien für die hydraulische Einbindung von BHKW in das Heizsystem sind im Wesentlichen:

- baulicher und regelungstechnischer Zustand der Heizungsanlage,
- Betriebstemperaturen im Vor- und Rücklauf,
- umlaufende Wassermengen bzw. Größe der Umwälzpumpen,
- Platzverhältnisse.

Grundsätzlich gibt es zwei Einbindungsarten, nämlich die Reihenschaltung sowie die Parallelschaltung von BHKW und Kessel. Die Einbindung eines Pufferspeichers in dieses System gilt heute als Standard.

Die Reihenschaltung wird wegen ihrer Einfachheit oft gewählt. Das BHKW wird in den Hauptrücklauf eingebunden und erhält vorrangig das Rücklaufwasser (Abb. 53).

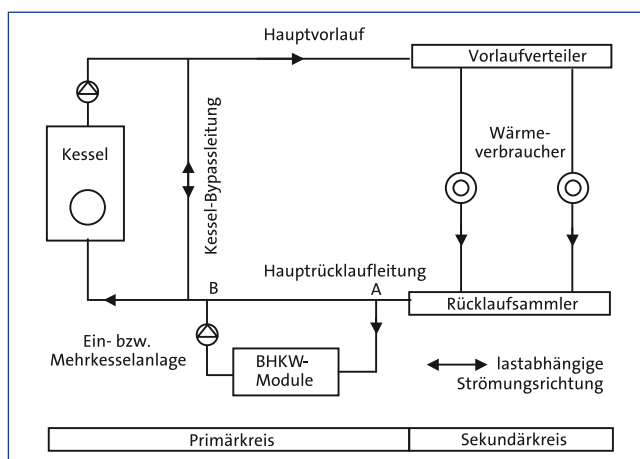
Das BHKW entnimmt dem Hauptrücklauf am Einbindepunkt A einen Teilstrom und hebt dessen Temperatur an. Am Mischpunkt B vor dem Kessel wird dieser erwärmte Teilstrom in den Hauptrücklauf eingespeist und bewirkt eine Temperaturanhebung des Kesselrücklaufwassers. Der Kessel heizt bei Bedarf nach, bis die von der Kesselsteuerung geforderte Soll-Vorlauftemperatur erreicht ist. Unter Umständen kann durch die Vorwärmung über das BHKW die oft übliche Kesselrücklauf-Anhebung entfallen.

Beim reinen BHKW-Betrieb in längeren Schwachlastzeiten soll ein Durchströmen der nicht benötigten Kesselanlage vermieden werden, um die Stillstandsverluste einzuschränken. Es empfiehlt sich eine Kessel-Bypassleitung vorzusehen, über die der BHKW-Heizwasserdurchfluss bei hydraulisch abgesperrter Kesselanlage sichergestellt ist. Diese Bypassleitung wäre im Falle einer hydraulischen Weiche zwischen Erzeuger- und Verbraucherkreis bereits vorhanden.

Nach den bisherigen Erfahrungen hat die Reihenschaltung eine hohe Funktionssicherheit und erreicht hohe BHKW-Laufzeiten.

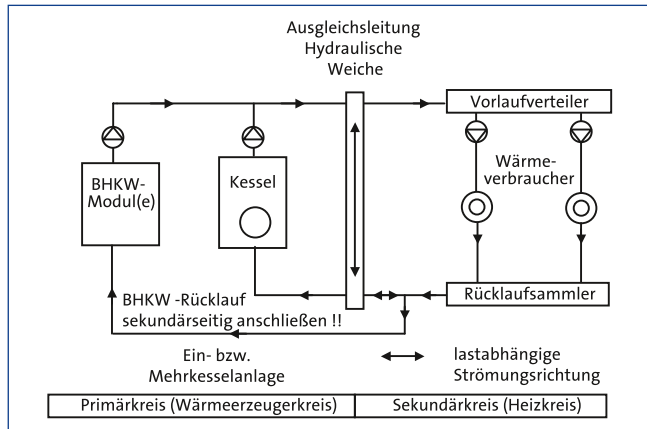
Die Parallelschaltung von Kessel und BHKW wird häufig bei Kesselanlagen, für die möglichst niedrige Rücklauftemperaturen erwünscht sind (z. B. bei Brennwertkesseln wegen der gewünschten Abgaskondensation) sowie bei größeren BHKW-Anlagen und komplexeren Heizungsanlagen vorgesehen (Abb. 54).

Dabei muss das Rücklaufwasser proportional zum Leistungsanteil über die Einzelanlagen verteilt werden, um die volle Leistungsabgabe jedes Wärmeerzeugers zu ermöglichen. Damit die erforderliche Wasserverteilung nicht durch Volumenstromänderungen auf der Verbraucherseite oder bei Kesselfolgebetrieb beeinträchtigt wird, empfiehlt sich die hydraulische Entkopplung von Wärmeerzeugerkreis (Primärseite) und Verbraucherkreis (Sekundärseite). Dazu installiert man zwischen Hauptvor- und -rücklauf eine hydraulische Ausgleichsleitung, über



■ **Abb. 53:** Prinzipschema Reihenschaltung von BHKW und Kessel

■ **Abb. 54:** Prinzipschema Parallelschaltung von BHKW und Kessel



die sich (je nach Fließrichtung) die Volumenstromdifferenzen ausgleichen können, wenn die Heizkreise mehr Wasser anfordern als der Wärmeerzeugerkreis gerade liefert und umgekehrt.

Der Rücklauf des BHKW wird auf der Sekundärseite (Netzurücklauf) abgenommen. Bei primärseitigem Anschluss des BHKW würde bei verringerter Wärmeabnahme über die Weiche strömendes Vorlaufwasser (z. B. infolge Pumpennachlauf eines abgeschalteten Kessels) die Rücklauftemperatur erhöhen und sich nachteilig auf den BHKW-Betrieb auswirken.

Pufferspeicher sollen helfen, die Modul-Schaltheufigkeit zu verringern und die BHKW-Laufzeiten und -Einsatzzeiten zu optimieren. Ein Beispiel für die hydraulische Einbindung des Speichers zeigt Abb. 55.

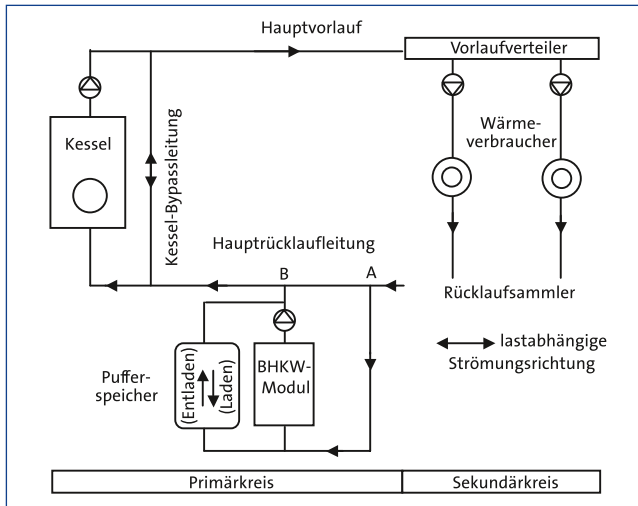
Die Speicher werden gezielt mit überschüssiger BHKW-Wärme in verbrauchsschwachen Zeiten aufgeladen. Bei hohem Wärmebedarf (z. B. morgendliche Aufheizphase nach der Nachtabsenkung) wird der Speicher gezielt zur Unterstützung der BHKW-Anlage entladen. Dadurch können gezielt Wärmebedarfsspitzen ohne Zuschaltung des Kessels abgedeckt sowie bei stromgeführter – besser stromoptimierter – BHKW-Betriebsweise anfallende Stromspitzen abgefahren werden (Kap. 2.4). Damit die Speicherkapazität möglichst vollständig für den BHKW-Betrieb genutzt werden kann, soll man verhindern, dass die Kesselanlage den Speicher nennenswert belädt.

Um eine möglichst hohe Ausnutzung der Speicherkapazität zu erreichen, sollte die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf möglichst hoch sein.

Das Speichervolumen sollte pro Modul eine Vollast-Laufzeit von einer Stunde ermöglichen oder nach der festgelegten Stromspitzenlast bemessen werden (Abb. 44). Ein Pufferspeicher kann die Funktion einer hydraulischen Weiche übernehmen und die BHKW von der Kesselanlage entkoppeln.

Als Wärmepuffer ebenfalls nutzbar sind z. B. überdimensionierte Warmwasserspeicher oder in gewissen Grenzen die Speicherkapazität eines Heiznetzes.

Die Viertelstunden-Impulse des EVU-Zählers können natürlich auch dazu genutzt werden, um ab einer bestimmten Leistungsanforderung des Nutzers das BHKW anzufordern, um eine teure Leistungsspitze zu vermeiden. Dies setzt allerdings voraus, dass ein Pufferspeicher oder ein Notkühler vorhanden ist.



■ **Abb. 55:** Prinzipschema Pufferspeicher bei Reihenschaltung von BHKW und Kessel

4.5.2 Steuer- und regelungstechnische Einbindung

Nano-BHKW werden in der Regel als eine Einheit aus BHKW-Modul, integrierten Spitzenlastbrenner und Pufferspeicher angeboten. Die Modulsteuerung (Kap. 4.4.3) ist ebenfalls anschlussfertig integriert und benötigt nur einen Stromanschluss. Die Einbindung ist problemlos.

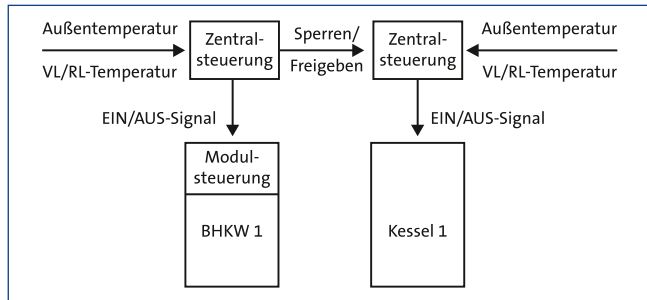
Wird dagegen der Wärmebedarf nicht nur von einer BHKW-Einheit sondern noch von weiteren Wärmeerzeugern gedeckt, so ist eine übergeordnete Zentralsteuerung erforderlich, die folgende Aufgaben zu erfüllen hat:

- einen möglichst kontinuierlichen BHKW-Betrieb zu gewährleisten, d. h. die Zahl der Startvorgänge zu minimieren,
- eine maximale BHKW-Laufzeit zu gewährleisten,
- Wahl einer Betriebsart,
- falls vorhanden, einen Pufferspeicher gezielt zu laden und zu entladen.

Die Minimierung der Startvorgänge und die Maximierung der Laufzeiten werden dadurch realisiert, dass dem BHKW steuerungstechnisch der Vorrang vor der Kesselanlage gegeben wird. Sobald die Zentralsteuerung einen für den BHKW-Betrieb genügend hohen Wärmebedarf ermittelt hat, werden zunächst die BHKW der Reihe nach oder der Pufferspeicher zugeschaltet. Bei steigender Wärmeanforderung, bzw. wenn die BHKW oder der Pufferspeicher den bestehenden Bedarf nicht decken können, werden die Kessel der Reihe nach (in Stufen oder auch modulierend) freigegeben. Diese Zuschaltung sollte möglichst feinstufig bzw. stufenlos erfolgen, damit das Wärmeangebot die Wärmenachfrage nicht schlagartig übersteigt und es damit – über einen Anstieg der Rücklauftemperaturen – zu unnötigen Abschaltungen der BHKW kommt.

Das Ergebnis der z. T. umfangreichen Rechenvorgänge in der übergeordneten Zentralsteuerung ist am Ende ein Signal: »BHKW EIN« bzw. »BHKW FREIGABE«. Dieses Signal wirkt auf die Modulsteuerung, die daraufhin die Routinevorgänge des Starts, den optimierten Betrieb und das Abfahren übernimmt (Abb. 56).

■ **Abb. 56:** Vorrang des BHKW-Betriebes ohne gemeinsame Regelung der Wärmeerzeugungsanlage



Die BHKW- und die Heizungssteuerung unterscheiden sich in Ihrem Verhalten deutlich. Während die Heizungssteuerung im Normalbetrieb mit einer sehr engen Hysterese arbeitet und es damit zu häufigem Ein- und Ausschalten des Brenners kommt, ist diese Betriebsweise für den BHKW-Betrieb gänzlich unerwünscht. Die BHKW Regelung lässt viel größere Abweichungen von Soll zu Ist-Vorlauftemperatur zu, um damit die Zahl der Startvorgänge zu minimieren und die Laufzeit pro Takt zu verlängern.

Für die Verbraucherkreise ist dies nicht weiter problematisch, da die Kreise einzeln über die Außentemperatur geregelt werden. Sinkt die Vorlauftemperatur ab, so kann dies durch die Mischventile der Regelkreise ausgeglichen werden.

Sowohl die dem BHKW zugeordnete Zentralsteuerung als auch die schon vorhandene Steuerung der Heizungsanlage ermitteln – unabhängig voneinander – die aktuell erforderliche Vorlauftemperatur. Die Zentralsteuerung des BHKW bzw. eine externe übergeordnete Steuerung ermittelt, ob das BHKW und/oder der Pufferspeicher den Wärmebedarf alleine decken können. Solange dies der Fall ist, gibt die Zentralsteuerung die Kessel nicht frei. In dem Moment, in dem die Zentralsteuerung die Kessel freigibt, hängt es von der vorhandenen Kesselsteuerung ab, mit welcher Leistung die Kessel zuschalten. Im Regelfall kommt es hier meist zu einem Überspringen, da die Kesselregelung eine große Abweichung zwischen Vorlauf-Soll- und Vorlauf-Ist-Temperatur feststellt und diese auszugleichen versucht. Ein modulierender Brenner wird so u. U. in der größten Leistungsstufe gestartet. Sehr schnell wird die Vorlauftemperatur ansteigen und die Brennerleistung muss zurückgenommen werden.

Dieses Verfahren der BHKW-Vorrangschaltung über eine Kesselfreigabe seitens einer Zentralsteuerung funktioniert in der Praxis hinreichend gut. Der Aufwand, eine bestehende Kesselsteuerung durch eine neue Zentralsteuerung für Kessel und BHKW zu ersetzen, erscheint somit nicht gerechtfertigt.

4.6 Wartungs- und Überwachungskonzepte

4.6.1 Vollwartung

Dank der enormen Fortschritte der BHKW-Technik steht heute ein breites Angebot an zuverlässigen und zugleich anspruchslosen Maschinen bereit. Während der Hersteller von BHKW im MW-Bereich sein Angebot oft auf Einsatzfeld, Wünsche und Möglichkeiten des Anwenders abstimmt, umfasst die Leistungsklasse der BHKW bis 300 kW vollständig konfektionierte Komplettangebote, die den Einsatz eines BHKW fast so einfach machen wie den eines Heizkessels.

Dies gilt noch viel mehr für die BHKW-Betreiber mit wenigen kW. Damit ist ein Anwenderkreis angesprochen, der anders als gewerbliche oder industrielle Anwender, sich mit seinen technischen Anlagen im Haus nicht weiter beschäftigen will oder es auch gar nicht kann.

Das hier entscheidende Angebotsselement ist die Vollwartung. Unter diesem Begriff werden bei vielen Anbietern alle Arbeiten verstanden, die für den störungsfreien Betrieb einer BHKW-Anlage über viele Jahre notwendig sind. Das reicht von der Inspektion, Wartung, Instandhaltung und Instandsetzung über die Bereitstellung und Entsorgung der Betriebsstoffe, Verschleißteile und Ersatzteile bis hin zum Austausch ganzer Aggregate. Der regelmäßige Service gehört ebenso zum Leistungsangebot wie der unverzügliche Kundendienst bei Betriebsstörungen, und natürlich sind alle Reisekosten der Monteure immer eingeschlossen. Dieses Leistungspaket sollte sich der Anwender in allgemeiner Form zusichern lassen. Die hier gegebene Beschreibung des Leistungsumfanges der Vollwartung ersetzt nicht das sorgfältige Studium der Verträge, denn mancher Hersteller legt den nicht genormten Begriff Vollwartung durchaus zu seinen Gunsten enger aus.

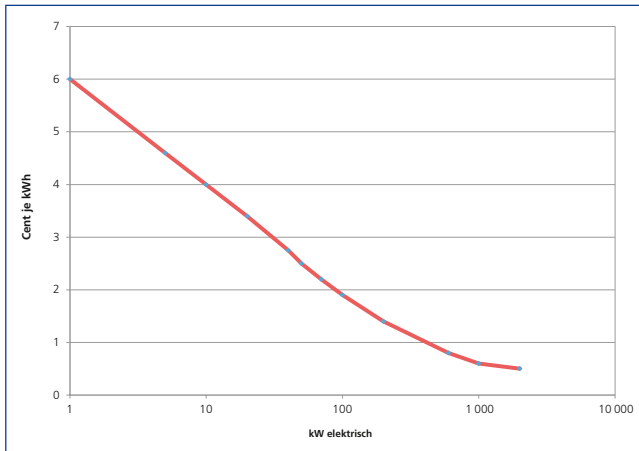
Ein umfassender Katalog von Leistungen, die hier eine Rolle spielen, wurde von führenden BHKW-Herstellern der Fachgemeinschaft Kraftmaschinen im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) erstellt. Dieser detaillierte Katalog sollte aber eher der Kalkulation und Organisation auf der Herstellerseite vorbehalten bleiben, denn vor allem die Anwender von kleineren BHKW werden mit den zahllosen Details stark verunsichert. In DIN 31051 sind relevante Begriffe definiert, auf die man bei Bedarf zurückgreifen kann.

Das ganze Paket Vollwartung kann zumeist durch eine sehr einfache, an der Inanspruchnahme des BHKW orientierten Kostenregelung bezahlt werden, nämlich in Cent/kWh BHKW-Strom, manchmal auch in Kombination mit den Betriebsstunden der Maschine. Die Laufzeit eines solchen Vertrages liegt üblicherweise bei 10 Jahren. Kürzer sollte sie nicht sein, da bekanntlich die Anfälligkeit für Reparaturen mit zunehmendem Alter einer Maschine wächst.

Ein solcher Vollwartungsvertrag hat für den Anwender drei große Vorteile:

- Der Betreiber des BHKW braucht sich weder um die Ausführung irgendwelcher Arbeiten an der BHKW-Anlage noch um technische Risiken des BHKW (z.B. Motorschaden) zu kümmern, all dies ist durch den Leistungsumfang des Vollwartungsvertrages voll und ganz abgedeckt. Der Betreiber braucht keinerlei technisches Fachpersonal.
- Das einfache Abrechnungsverfahren gibt dem Anwender Kalkulationssicherheit. Denn der Preis für die Vollwartung ist dank Preisgleitklauseln über lange Zeiträume einfach zu schätzen, viel einfacher als z.B. die komplizierten Strompreise.
- Schon bei der Auswahl der Maschine rückt die Bedeutung von Qualitätsforderungen an die Technik und vom Umfang der Ausstattung für den Anwender in den Hintergrund. Wenn er die Maschine bei gleichzeitigem Abschluss eines Vollwartungsvertrages kauft, wird der Hersteller aus seinem Eigeninteresse heraus für die notwendige und hinreichende Qualität und Ausstattung des BHKW sorgen. Damit kann ein BHKW ohne Kenntnis technischer Details risikolos gekauft werden, wenn der Anbieter die Bonität für einen 10-Jahres-Vollwartungsvertrag bietet.
- Manche Förderprogramme, die Investitionszuschüsse gewähren, erfordern den Nachweis eines Vollwartungsvertrages.

Praktisch bedeutet ein Vollwartungsvertrag eine Garantie über die Vertragslaufzeit, also in der Regel über 10 Jahre. Abb. 57 zeigt die mittleren Vollwartungspreise. Gerade bei kleinen



■ **Abb. 57:** Mittlere Preise für eine Vollwartung

Anlagen schlagen sich die Kosten für die Vollwartung beträchtlich in der Wirtschaftlichkeit nieder. Bei einem 5 kW_{el}-BHKW und einer Benutzungsdauer von 6000 Stunden macht das über 1 300 EUR je Jahr. Das ist ein Vielfaches mehr als ein Wartungsvertrag für einen Kessel.

4.6.2 Eigene Wartung und Teilwartung

Die eigene Wartung kann deutlich preiswerter sein, wenn geeignetes Fachpersonal vorhanden ist und wenn für dessen Einsatz innerbetrieblich nur die direkt für die BHKW erforderlichen Stunden zu kalkulieren sind.

In vielen Anwendungsbereichen gibt es BHKW-Betreiber, die selbst über das nötige Fachwissen für Wartung und Instandhaltung von BHKW verfügen oder sich leicht aufbauen können. Das trifft z. B. für Stadtwerke zu, die neben der Stromversorgung auch über einen Busbetrieb verfügen, sicher aber auch für viele Gewerbe- oder Industriebetriebe mit Ihrem Instandhaltungspersonal. Spezielle Arbeiten wie große Inspektionen mit Überarbeitung von Zylinderköpfen, Kurbelwelle oder Zylinderbuchsen bis hin zu gezielten Einzelreparaturen kann auch ein solcher Betreiber jederzeit bei der Herstellerfirma in Auftrag geben. Freilich bleibt auch das Risiko für die Häufigkeit solcher Arbeiten dann beim Betreiber.

Zwei offensichtliche Gründe für den Preisvorteil eigener Wartung sind zum Beispiel, dass Reisezeiten wegfallen, die eine Fremdfirma kalkulieren muss, und dass Wartezeiten bis zur Störungsbeseitigung wesentlich verkürzt sein können. Es gibt über Jahre gesammelte Erfahrungen, dass bei einem BHKW mit etwa 100 kW_{el} die Kosten eines Vollwartungsvertrages durch eigene Vollwartung halbiert werden können.

4.6.3 Betriebsüberwachung

Ziel des BHKW-Betriebes ist es, einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb mit hoher Jahreslaufzeit der Module zu erreichen. Um Ausfallzeiten zu vermeiden müssen die Maschinen optimal gewartet und überwacht werden. Die kontinuierliche Überwachung stellt sicher, dass Unregelmäßigkeiten im Betrieb frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

Die Betriebsüberwachung übernimmt die zentrale Regeleinrichtung des BHKW. Diese Mikroprozessorregelung stellt aber außerdem eine Kommunikationsschnittstelle dar, über die alle Betriebsdaten vor Ort ausgelesen oder auch per Internet abgerufen werden können. Moderne BHKW-Regeleinrichtungen bieten aber neben der normalen Betriebsüberwachung auch die Möglichkeit, Unregelmäßigkeiten oder Störmeldungen über das Internet an eine Zentrale abzugeben, von der aus Schalthandlungen am BHKW vorgenommen werden können. Erst wenn die Störungen nicht über das Internet beseitigt werden können, muss der Service vor Ort tätig werden.

Mit der Regeleinrichtung und den entsprechenden Schnittstellen des BHKW sind die technischen Voraussetzungen gegeben, das Virtuelle Kraftwerk – also das Zusammenschalten und »fahren« mehrerer hundert oder tausend BHKW – umzusetzen. Erste virtuelle Kraftwerke sind in der Erprobung (Kap. 1.5, 6.3.3).

4.7 Technologische Einbindung

Unter der technologischen Einbindung wird der Einsatz eines BHKW in einen größeren Technikverbund verstanden. Die Effizienz und die wirtschaftlich kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung kommen dabei besonders zum Tragen. Dazu zählen die Kälteerzeugung und die Speichertechnologie Power-to-Gas.

4.7.1 Kälteerzeugung

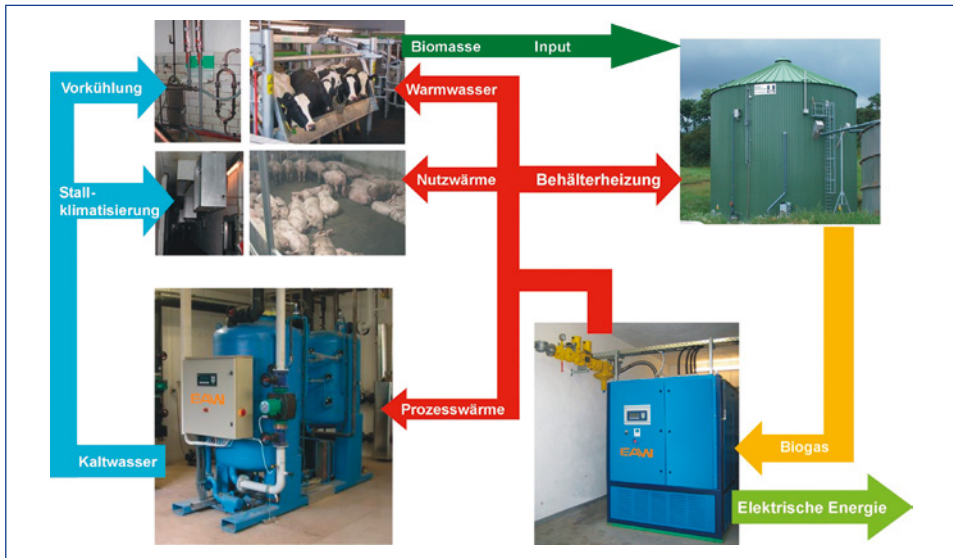
Die Wärmeabgabe eines BHKW eignet sich prinzipiell auch dazu, Kälte zu erzeugen. Wenn ein Kälteprozess hinter einen KWK-Prozess geschaltet wird, spricht man von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Abb. 58 zeigt die prinzipiellen Nutzungsmöglichkeiten in Verbindung mit einem BHKW und Abb. 59 eine Absorptionskälteanlage ohne BHKW.

Bei der Kälteerzeugung aus BHKW-Abwärme werden das Absorptionsverfahren (Stichwort: »Campingkühlschrank«) und bei sehr kleinen Anlagen das Adsorptionsverfahren (Kap. 2.3) realisiert.

Der Absorptionsprozess nutzt zur Kälteerzeugung unterschiedliche Drücke und Anreicherungszustände eines Salz-Wasser-Gemischs (üblich: das Stoffpaar Lithiumbromid/Wasser). Unter Wärmezufuhr verdampft Wasser aus einer salzhaltigen Lösung und kondensiert. Bei Unterdruck verdampft es erneut und entzieht dem zu kühlenden Medium Wärme. Der Kältemitteldampf wird anschließend von dem Salz absorbiert und kann wieder erhitzt werden. Lösungsmittel und Kältemittel werden im Kreislauf geführt.

Der Adsorptionsprozess funktioniert prinzipiell gleich, mit dem Unterschied, dass das Kältemittel von einem festen Stoff (Kieselsäuregel) physikalisch adsorbiert und dass der Prozess nicht im Kreislauf, sondern periodisch geführt wird. Die Antriebswärme und die (Nutz-) Kälte fallen als Abwärme auf einem Temperaturniveau oberhalb der Umgebungstemperatur an und müssen abgeführt werden (Rückkühlung).

Die Leistungszahl von Ab- und Adsorptionsprozessen verbessert sich allgemein mit steigender Heiztemperatur, steigendem Temperaturniveau der Nutzkälte und sinkendem Temperatur-



■ **Abb. 58:** Wärme- und Kälteerzeugung mit einem BHKW

■ **Abb. 59:** Absorptionskälteanlage



niveau der Rückkühlung. Übliche Leistungszahlen sind 0,65 bis 0,70 kWh Nutzkälte pro kWh Heizwärme.

Absorptionskältemaschinen verursachen als Wärmeverbraucher aufgrund des physikalischen Prozesses keine großen Auskühlungen des Heizungswassers und benötigen möglichst hohe Heiztemperaturniveaus. Beide Tatsachen führen zu Rücklauftemperaturen des Heizmediums, die im Regelfall für BHKW sehr hoch sind. Um nun eine Rückkühlung nennenswerter Wärmemengen ungenutzt an die Umgebung zu vermeiden, sollten BHKW in KWKK-Anwendungen mit vergrößerten (ggf. externen) Motorkühlwasser-Wärmetauschern, in Sonderfällen auch mit der sog. Heißkühlung ausgerüstet sein. Die BHKW liefern dann höhere Vorlauftemperaturen und »verkräften« höhere Rücklauftemperaturen, es verbleibt dann nur noch die nicht nutzbare Generatorkühlwärme mit rund 10 %. Bei Adsorptionsmaschinen ist das Problem aufgrund einer größeren Auskühlung des Heizmediums nicht so gravierend.

Verschiedene Hersteller bieten Absorptionskältemaschinen in Leistungsgrößen von knapp 10 kW bis einigen MW an, Adsorptionsmaschinen sind von wenigen kW bis einige hundert kW verfügbar (Kap. 2.3).

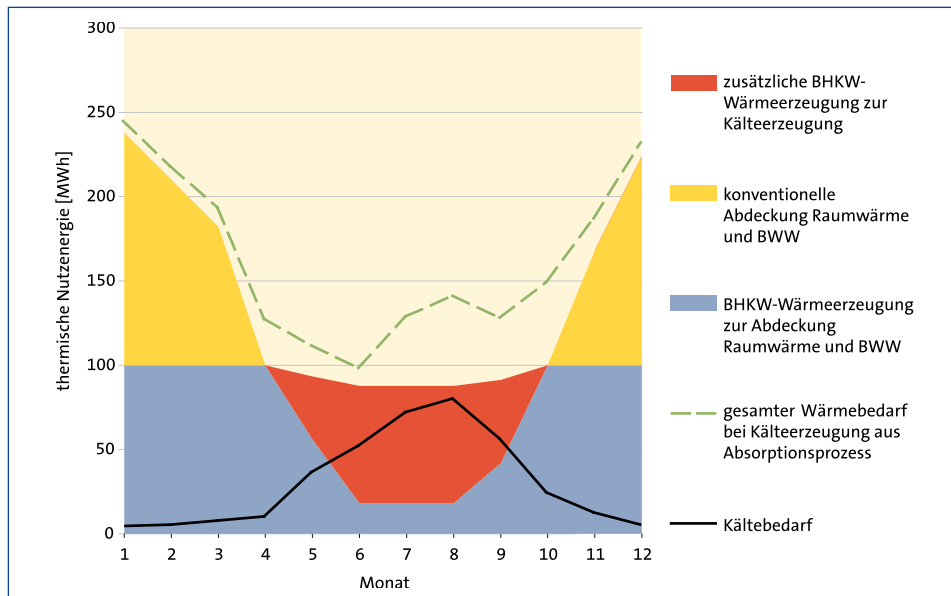
Eine Kälteerzeugung mittels Ab- oder Adsorptionsprozess vereinigt mehrere Vorteile. Im Sommer fehlt oft eine hinreichende Nutzungsmöglichkeit für die vom BHKW erzeugte Wärme. Da nun in vielen technisch hoch ausgestatteten Gebäuden (Bürogebäude, Krankenhäuser etc.) im Sommer ein nennenswerter Kältebedarf besteht, liegt es nahe, diese Kälte mit der BHKW-Abwärme zu erzeugen. Die Kälteerzeugung aus BHKW-Abwärme kann die jährliche BHKW-Laufzeit deshalb signifikant erhöhen (Abb. 60).

Der Absorptionsprozess ist stufenlos bis auf 25 % der Volllast regelbar.

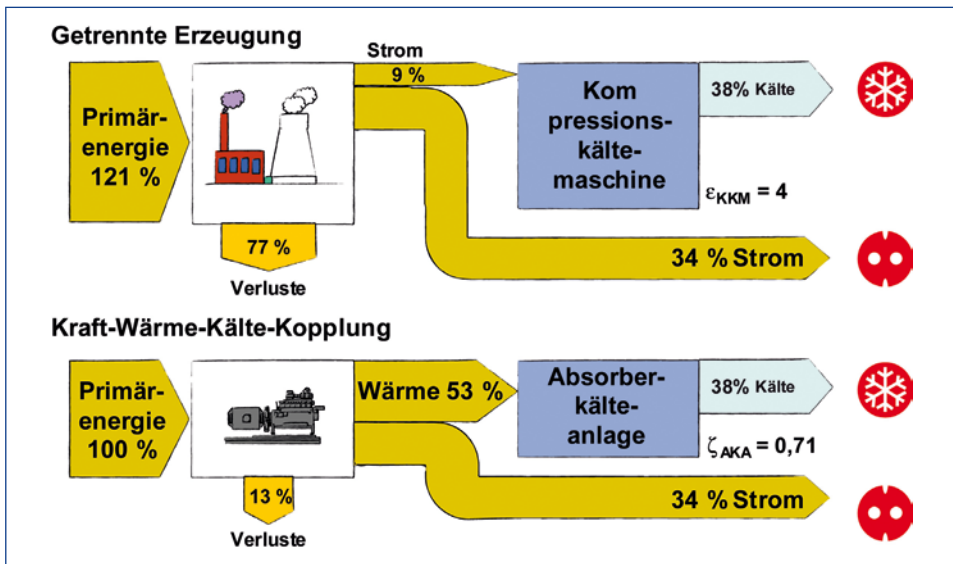
Konventionell wird Kälte mit elektromotorisch betriebenen Kompressionsmaschinen erzeugt. Es wird also Strom benötigt, der ggf. im Sommer die kostenrelevante Strom-Leistungsspitze eines Gebäudes dominiert. Solche Stromspitzen fallen bei der Kälteerzeugung mit Absorptionskältemaschinen nicht an, da hier elektrische Energie fast »nur« zur Umwälzung der Kältemittel sowie in größerem Maße zur Umwälzung des Rückkühlmediums benötigt wird. Die hohe Primärenergieeinsparung durch die Kombination KWK/Absorptionskälteanlage geht aus der Abb. 61 hervor.

Als Kältemittel werden üblicherweise klimaunschädliche Arbeitsmedien eingesetzt, z. B. beim Absorptionsprozess ein Stoffpaar aus Lithiumbromid und Wasser. Auf ozonschädigende Fluorkohlenwasserstoffe und deren Ersatzstoffe kann verzichtet werden.

Die Primärenergie-, die CO₂- und die Schadstoffbilanz sind bei der KWKK verglichen mit der konventionellen Erzeugung der drei Nutzenergien Wärme, Kälte und Strom positiv, d. h. es werden je nach Anlagenauslegung bis zu 20 % Einsparungen erreicht.



■ **Abb. 60:** Beispielhafte Jahresgänge Nutzwärme- und Kältebedarf sowie deren Abdeckung durch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung



■ **Abb. 61:** Primärenergieeinsparung durch die Kombination einer KWK-Anlage mit einer Absorptionskälteanlage

Die Nachteile der KWKK: Der apparative Aufwand der Ad- oder Absorptionskälteerzeugung sowie der Aufwand für die Rückkühlung (auch deren Pumpstromaufwand) sind sehr hoch.

Das Nutz-Temperaturniveau der Kälte ist i. d. R. nur für Raumkühlung geeignet (»Klimakälte«), also nicht für Prozess- oder Lebensmittelkühlung unterhalb 6 °C. Temperaturniveaus unterhalb 0 bis 6 °C sind im Absorptionsprinzip nur mit dem Stoffpaar Ammoniak/Wasser erreichbar. Für dieses Stoffpaar existieren einerseits keine serienmäßigen, indirekt beheizten Aggregate, andererseits erfordert Ammoniak umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen.

Aufgrund des Rückkühl-Temperaturniveaus sind Verdunstungskühler notwendig, die einen hohen Verbrauch an aufbereitetem Frischwasser aufweisen.

Die KWKK ist i. d. R. nur wirtschaftlich, wenn Wärme als »Abfallprodukt« zur Verfügung steht und signifikante Sommerstromspitzen aus der konventionellen Kälteerzeugung gekappt werden können. Wenn die Wärme im Kessel separat erzeugt werden muss, ist das Verfahren nicht so wirtschaftlich, aber immer noch günstiger als der Einsatz von Kompressionskälteanlagen für Klimakälte.

4.7.2 Speichertechnologien

Die regenerativen Energien stellen einen der bedeutendsten Wirtschaftsfaktoren der Zukunft dar:

- Die Kosten für Wind- und Solarstrom werden im Gegensatz zu Öl, Gas und Kohle langfristig weiter abnehmen (Abb. 8).
- Das Ausbaupotenzial für Wind und Sonne stellt keinen Engpass dar.
- Langfristig muss der Energiebedarf aus den nachhaltigen, kohlendioxidfreien Alternativen gedeckt werden.

Das Problem: Ökostrom fällt fluktuierend, also unstetig, an. Damit passt er nicht immer zum Strombedarf moderner Gesellschaften. Ist die Nachfrage hoch, flaut vielleicht der Wind gerade ab. Wenn der Wind kräftig bläst oder die Sonne brennt, herrscht nicht unbedingt eine entsprechende Nachfrage. Dann gibt es beispielsweise zu viel Windstrom als aktuell benötigt wird. Die Folgen: Das Stromnetz droht instabil zu werden, der Strompreis an der Strombörse rutscht ab – manchmal sogar ins Negative – und konventionelle Kraftwerke werden runter gefahren. Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien wird diese Situation noch öfter als derzeit vorkommen. In solchen Fällen bietet sich eine Ökostromspeicherung an.

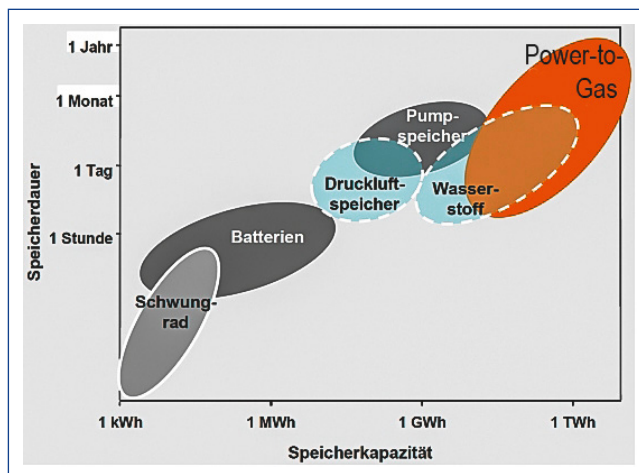
Den Strom zu speichern, bis er gebraucht wird, ist derzeit aber nur in engen Grenzen möglich. Bestehende Speicherkapazitäten (Abb. 62) reichen gerade aus, um den Strombedarf knapp einen Tag zu überbrücken. Benötigt werden aber Langzeitspeicher im TWh-Bereich, die auch Windflauten von zwei bis drei Wochen überbrücken können. Eine umfassende Speichermöglichkeit für Strom aus erneuerbaren Quellen könnte das Angebot an Ökostrom mit der Nachfrage synchronisieren: Wir verbrauchen erneuerbare Energien dann, wenn wir sie auch tatsächlich benötigen. Der Stromspeicher müsste aber eine ausreichend große Kapazität bieten und sich an die bestehende Infrastruktur flexibel anpassen zu können.

Grundsätzlich gibt es vier Stellhebel, um Angebot und Bedarf zu synchronisieren:

- Ausgleich zwischen regionalen Netzen (Grid Extension),
- Konventionelle Backup-Power (v. a. Gaskraftwerke),
- Demand-Side Management, Verbraucherverhalten (Smart-Metering),
- Speicher (z. B. Pumpspeicher) und Konvertierung (Power-to-Gas).

Das Potenzial zum Einsatz bestehender Technologien wie Pumpspeicher ist gerade in Ländern mit hohen Wind- und PV-Anteilen weitgehend ausgeschöpft. Andere Ansätze wie Ausgleich zwischen regionalen Netzen setzen die Schaffung oder Ausbau der Infrastruktur mit entsprechend langem zeitlichen Vorlauf und entsprechenden Genehmigungsschwierigkeiten voraus.

Die gängigen »Stromspeicher« wie Pump- oder Druckluftspeicherkraftwerke sind nicht nur zu klein für einen überregionalen Lastausgleich sondern benötigen auch die entsprechenden Hochspannungsleitungen, die gegenwärtig noch nicht in genügender Kapazität vorhanden



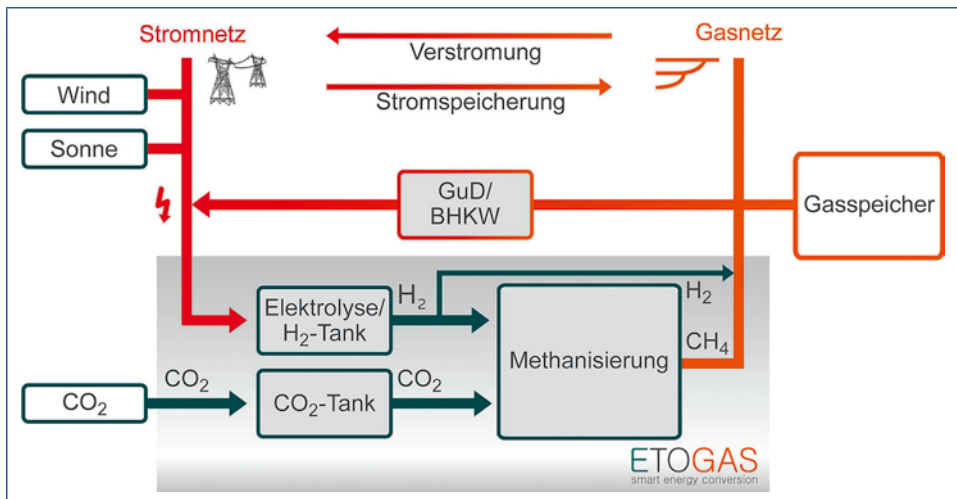
■ **Abb. 62:** Speicherdauer und Speicherkapazität von Systemen zur Stromspeicherung

sind. Die KWK kann zwar durch eine stromoptimierte Fahrweise zum Lastmanagement beitragen, aber eine reine Stromspeicherung ist nicht möglich. Daher bietet das nachfolgend beschriebene Power-to-Gas Verfahren für die KWK in Zukunft ein nahezu unbegrenztes Einsatzpotential für Zeiten mit wenig regenerativer Stromerzeugung.

Die neue Power-to-Gas Technik speichert regenerativ erzeugten Strom als Erdgas. Das Erdgas ist mit dem Erdgas aus den Tiefen der Erde praktisch identisch, aber regenerativ hergestellt. Es wird auch als Bio-Erdgas bezeichnet. Das Verfahren zur Erdgasherstellung, kombiniert erstmals die Technologien Wasserstoff-Elektrolyse und Methanisierung. Das Verfahren spaltet aus überschüssigem erneuerbarem Strom Wasser per Elektrolyse. Dabei entsteht Wasserstoff und Sauerstoff. Durch eine chemische Reaktion des Wasserstoffs mit Kohlendioxid (CO_2) entsteht dann Methan. Dabei steigt die Energiedichte um den Faktor 3 an. Das Methan wiederum ist eigentlich nichts anderes als Erdgas, nur synthetisch erzeugt (Abb. 63).

Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Ökostrom zu erneuerbarem Erdgas beträgt rund 60 %, was nahe am thermodynamischen Optimum liegt. Mit der neuen Technik kann der Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigt und die Abhängigkeit von Gasimporten eingedämmt werden. Das erhöht die heimische Wertschöpfung. Agrarflächen sind für die Produktion des erneuerbaren Erdgases nicht nötig. Der Hauptvorteil liegt jedoch in der Stromwirtschaft: Verstromung des Bio-Erdgases in zentralen Gaskraftwerken (Bereitstellung von Reserveenergie als Puffer für Zeiten mit einem geringen Angebot erneuerbarer Energien) oder in dezentralen KWK-Anlagen vor allem in Gas-BHKW.

Eine Pilotanlage im industriellen Maßstab für die AUDI AG wurde im Herbst 2013 eingeweiht. Die elektrische Anschlussleistung beträgt rund 6 MW, der Wirkungsgrad soll größer als 54 % sein. Diese Anlage produziert täglich rund 4000 m³ Bio-Methan. Mit der Megawattanlage wird ein wichtiger Schritt zur Kommerzialisierung der Technik gemacht.



■ **Abb. 63:** Umwandlung von Ökostrom in ein CO_2 -neutrales und erneuerbares Erdgas (Bio-Erdgas)

5 Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlichkeitsprognosen haben den Zweck, Aussagen über die finanziellen Auswirkungen von Investitionen zu ermöglichen. Da es sich dabei auch um Annahmen für die Zukunft handelt, sind sie mit den sonst üblichen – aber nie genauen – bestimmbar Unsicherheiten verbunden. Daher sollte man nicht von Wirtschaftlichkeits**berechnungen** sprechen, sondern nur von Prognosen. Dies betrifft vor allem die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die nicht von politischen Interessen frei sind.

Beim Betrieb eines BHKW handelt es sich um eine Koppelproduktion von Strom und Wärme. Die Art der Aufteilung z. B. der Brennstoffkosten auf die Produkte Strom und Wärme unterliegt einer gewissen Willkür. In der VDI-Richtlinie 2077 Beiblatt 3.1 ist aber festgelegt, dass der Aufteilungsschlüssel für die umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten einer KWK-Anlage entsprechend den Energieflüssen zwischen Strom und Wärme vorzunehmen ist. Die Arbeitsfähigkeit bzw. die unterschiedliche Wertigkeit der Produkte Strom und Wärme werden dabei nicht berücksichtigt. Um dennoch einen »gerechten« Weg bei der Wirtschaftlichkeitsprognose zu beschreiten, müssen die Kapital- und Betriebskosten sowie die Erlöse aus der Strom- und Wärmeproduktion des BHKW alternativ einer getrennten Strom- und Wärmebeschaffung gegenübergestellt werden.

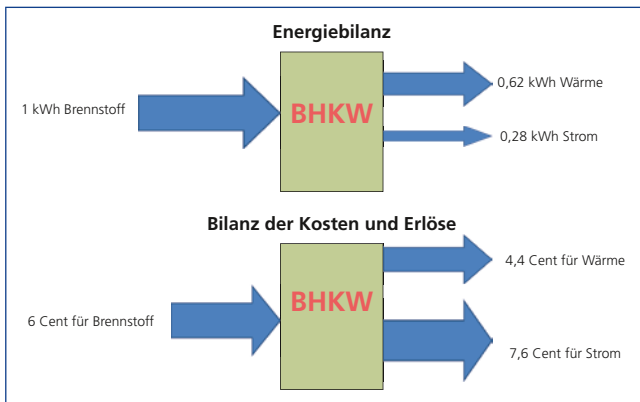
Es gibt zwar noch unzählige andere Verfahren und Modelle der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, aber sehr oft stehen Einzelinteressen dahinter, die ein BHKW-Projekt in ein gutes oder schlechtes Licht rücken wollen. Die alleinige Betrachtung einer Kostenreduktion durch ein BHKW sagt noch nichts über dessen Wirtschaftlichkeit aus. Es hat sich gezeigt, dass nicht die Berechnungsmethode, sondern die Ausgangsdaten und die entsprechenden Preissteigerungen und Zinssätze über den Betrachtungszeitraum für die Wirtschaftlichkeit eines BHKW entscheidend sind. Aber gerade über diese Annahmen lässt sich trefflich streiten.

Ein wie auch immer geartetes positives Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsprognose sollte ein hinreichendes Kriterium für oder gegen ein geplantes BHKW-Projekt sein. Es ist davon auszugehen, dass die überwiegende Zahl der mehr als 40 000 BHKW in Deutschland wirtschaftlich betrieben wird.

5.1 Grundlagen

In der Abb. 64 oben ist die Energiebilanz aus der Abb. 2 übernommen und auf 1 kWh zugeführte Brennstoffenergie bezogen. Aus 1 kWh Brennstoff werden 0,62 kWh Wärme und 0,28 kWh Strom. Die restlichen 0,1 kWh sind Verluste. Entsprechend der Energieströme für Brennstoff, Wärme und Strom werden deren Kosten und Erlöse im unteren Teil der Abb. 64 dargestellt. Eine kWh Brennstoff kostet 6 Cent. Bei der Strom- und Wärmeerzeugung des BHKW übersteigen nun die Werte bzw. die Erlöse aus dem Wärme- und Stromverkauf weit die Brennstoffkosten, sonst wäre kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Vor allem der Strom erfährt eine deutliche Wertsteigerung, weil er einen höheren Marktwert als die Wärme hat.

Die einzelnen Komponenten sind vom Einzelfall abhängig und können stark variieren. Zu den Kosten/Erlösen, die den Energieströmen zugeordnet werden können, kommen noch weitere Kosten wie die Wartungs- und Instandhaltungskosten, Personalkosten sowie die Investitionen und staatlichen Vergünstigungen.



■ **Abb. 64:** Bilanz der Energieströme und entsprechende Kosten und Erlöse eines BHKW

5.1.1 Berechnungsverfahren

Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Wirtschaftlichkeitsermittlung ist grundsätzlich zu beachten, in welchem Verhältnis die Genauigkeit und Aussagekraft des Ergebnisses zum Aufwand der Berechnung und der Genauigkeit der Eingabewerte steht. Ein vollkommen statisches Verfahren ohne Berücksichtigung von Zinsen für Eigen- und/oder Fremdkapital kann aber in aller Regel als nicht ausreichend angesehen werden. Auf der anderen Seite ist nicht in jedem Falle eine aufwendige Berechnung unter Einbeziehung einer Sensitivitätsanalyse erforderlich, um die notwendige Grundlage für eine Investitionsentscheidung zu liefern.

In den meisten Fällen ist es angebracht, eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen, wobei von den dafür zur Verfügung stehenden finanzmathematischen Berechnungsmethoden die Annuitätenmethode als besonders geeignet erscheint. Durch den Ausweis von jahresbezogenen Kosten und Erlösen bzw. im Ergebnis von jährlichen Überschüssen oder Unterdeckungen sind diese Berechnungen insbesondere auch für nicht betriebswirtschaftlich Vorgebildete verständlich.

Neben der Art der Berechnung ist von entscheidender Bedeutung, dass auch tatsächlich alle zu erwartenden Erlöse und Kosten berücksichtigt werden. Dies sollte eigentlich selbstverständlich sein, wird aber in der Praxis nicht immer beachtet. Eine Wirtschaftlichkeitsprognose liefert kein als Entscheidungsgrundlage geeignetes Ergebnis, wenn beispielsweise Zinsen oder Kosten für die BHKW-Einbindung oder bestimmte Wartungsaufwendungen nicht berücksichtigt werden.

Ein anerkanntes und gut nachvollziehbares Verfahren zur Berechnung der Wärmeerzeugungskosten eines BHKW – einschließlich eines umfassenden Katalogs von Kosten- und Erlösparametern – ist in VDI 2067, Blatt 7 festgehalten. In der Praxis sollte man aber nicht von der komplizierten Ermittlung von Tageslastgängen ausgehen, sondern von typischen Jahresdauerlinien des Wärmebedarfes verschiedener Versorgungsobjekte, die dann mit den zu untersuchenden Objektdaten verknüpft werden. Die Jahresdauerlinie bildet für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Einsatzes eine wesentliche Voraussetzung.

5.1.2 Beurteilungskriterien

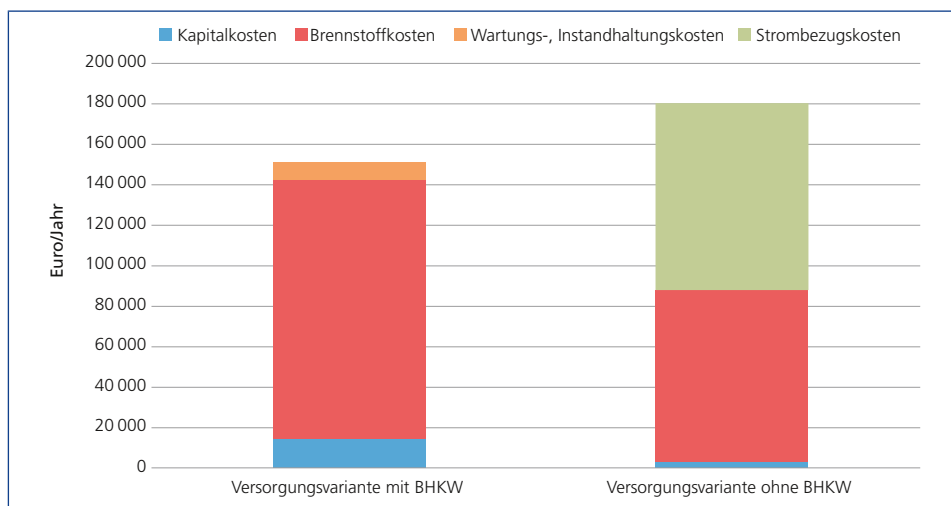
Als Beurteilungskriterium für die Wirtschaftlichkeit ist auch heute noch die statische Amortisationsdauer üblich, auch wenn ihre Aussage begrenzt ist. Die Amortisationsdauer gibt nur an, nach welcher Zeit das eingesetzte Kapital wiedergewonnen wird. Die Höhe des Überschusses, der während der Nutzungsdauer einer Investition insgesamt erwirtschaftet wird, erhält man dagegen durch das Aufsummieren der Gewinne. Aus diesen kann dann eine Rendite des eingesetzten Kapitals berechnet werden.

Als Zielgröße kommen die Stromgestehungskosten, die Wärmegestehungskosten oder die Gesamtkosten des BHKW in Frage. Diese Kosten werden mit den entsprechenden Kosten eines Strombezugs, einer Wärmeerzeugung in einem Kessel oder mit beidem zusammen verglichen.

Dienen als Zielgröße die Stromkosten, müssen die Wärmekosten, die beim Betrieb eines Heizkessels entstehen würden, als Gutschrift von den Gesamtkosten des BHKW abgezogen werden. Die sich ergebenden Stromgestehungskosten können mit den Strombezugskosten verglichen werden.

Umgekehrt können bei der Zielgröße »Wärmegestehungskosten« die eingesparten Strombezugskosten und/oder die Einnahmen aus dem Stromverkauf in Ansatz gebracht werden. Die Wärmegestehungskosten sind dann allein mit den Kosten einer alternativen Wärmeerzeugung in einem Heizkessel vergleichbar – wobei entscheidend ist, ob die Kapitalkosten des Heizkessels (Vollkostenrechnung) berücksichtigt werden. An dieser Stelle kann es leicht zu Unstimmigkeiten kommen, wenn sich nur ein geringer Vorteil für die BHKW-Lösung ergibt.

Im dritten Fall der Vollversorgung aus einem BHKW und einem Spitzenkessel werden alle Kosten für das BHKW und den Kessel mit den Kosten für die getrennte Wärme- und Strombereitstellung verglichen. In Abb. 65 werden auch die Kapitalkosten für den Kessel berücksichtigt. Die Aufteilung der Kosten bezieht sich auf das Beispiel eines 100 kW_{el}-BHKW mit 166 kW thermischer Leistung und 89 % Nutzungsgrad. Die Aufteilung ist sehr stark von der Benutzungsdauer abhängig. Bereits bei einer Benutzungsdauer von 5 500 Stunden spielen die Kapitalkosten bzw. der Preis für die Anlage eine eher untergeordnete Rolle.



■ **Abb. 65:** Kostenverteilung für verschiedene Versorgungsvarianten

Bei Neuanlagen (Kessel + BHKW) kann es sein, dass die Kesselleistung vermindert werden kann. Dann sind über die ersparten Brennstoffkosten hinaus auch die ersparten Investitionen durch geringere Kesselleistung in den Vergleich einzubeziehen. Sofern bei einer Mehrkesselanlage durch den BHKW-Einsatz ein kompletter Kessel eingespart wird, zählen hierzu auch die Investitionen, Reparatur-, Wartungs- und sonstige Betriebskosten.

5.2 Kostenermittlung

5.2.1 Kapitalkosten

Um aus einer einmaligen Investition die jährlichen Kapitalkosten (K_K) zu berechnen, werden die Anschaffungskosten (Investitionen), die Nutzungsdauer und der Zinssatz benötigt:

$$K_K = I \cdot a \quad I = \text{Investitionen} \quad a = \text{Kapiteldienst- oder Annuitätsfaktor}$$

$$a = \frac{q^n(q-1)}{q^n-1} \cdot 100 \text{ [in \% pro Jahr]}$$

n = Kalkulationszeitraum, Betrachtungszeitraum, Abschreibungsdauer

q = Zinsfaktor ($=1 + p/100$)

p = Zinssatz [in %]

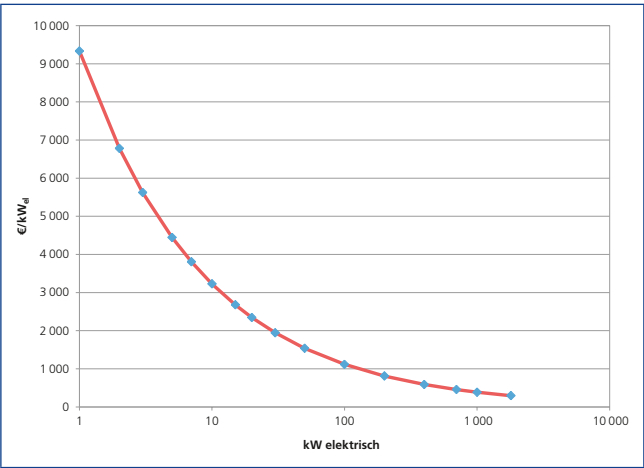
Die Annuitätsfaktoren können nach der oben angegebenen Formel berechnet werden. Sie sind aber auch in der VDI Richtlinie 2067 Blatt 1 Tabelle 7 zusammengestellt. Näheres zur Bestimmung der Kapitalkosten und Festlegung der Zinssätze findet sich in der VDI-Richtlinie 6025.

Investitionen

In der ersten Planungsphase genügen zunächst Investitionen, die sich aus durchschnittlichen Richtpreisangeboten verschiedener Hersteller ergeben. Der angefragte Angebotsumfang für die BHKW-Investition soll dabei im Wesentlichen das KWK-Modul, evtl. Mehrkosten für Blindstromkompensation, Schalldämpfung, Katalysator, Schmierölver- und Entsorgung, Schaltschrank, Be- und Entlüftung, Fernüberwachung, Transport und Montage sowie Inbetriebnahme, Probetrieb und Abnahme umfassen. Die spezifischen Investitionen von Erdgas-BHKW in Abhängigkeit von der Anlagengröße sind in Abb. 66 dargestellt. Die spezifischen Investitionen von kleinen Anlagen liegen um eine Größenordnung über denen von Anlagen im MW-Bereich. Dies ist ein wichtiger Grund, dass die BHKW unter 3 kW nur bei günstigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich darstellbar sind.

Die Abb. 67 zeigt, dass die spezifischen Preise von 1996–2011 nur für die Anlagen über 50 kW zurückgegangen sind. Die kleineren Anlagen sind dagegen stark im spezifischen Preis angestiegen; und zwar umso stärker je kleiner die Aggregate werden. Der zeitliche Preisrückgang ist allerdings marginal, wenn man ihn mit der bekannten Größendegression vergleicht.

■ **Abb. 66:** Spezifische Richtpreise für Erdgas-BHKW



| kW _{el} | 1996 | 2000 | 2005 | 2011 | Veränderung 1996/2011 in % |
|------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|
| 5 | 2 675 | 2 998 | 2 564 | 4 444 | 66 |
| 50 | 1 339 | 1 232 | 1 199 | 1 537 | 15 |
| 250 | 825 | 662 | 705 | 732 | –11 |
| 1 000 | 544 | 388 | 446 | 386 | –29 |

■ **Abb. 67:** Zeitliche Veränderung der Richtpreise für Erdgas-BHKW [in Euro/kW_{el}]

Zu den Investitionen kommen noch die Einbindungskosten hinzu. Die Projekterfahrungen zeigen, dass sich bei Aufstellung und Einbindung eines BHKW in einer vorhandenen Heizzentrale einschließlich Abgasableitung folgende Einbindungskosten realisieren lassen:

| Anlagengröße | durchschnittliche Kosten für die Einbindung |
|----------------------|---|
| 110 kW _{el} | 12 800–17 900 Euro |
| 50 kW _{el} | 10 200–12 800 Euro |
| 1 kW _{el} | 2 000–4 000 Euro |

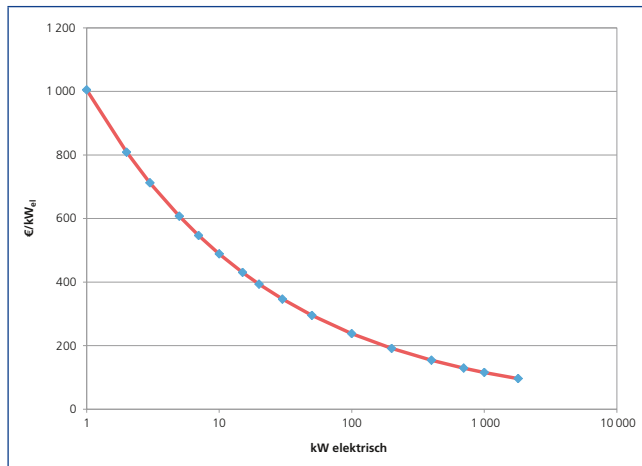
Die Einbindungsarbeiten können prinzipiell von jedem Heizungsbauunternehmen vorgenommen werden. Es empfiehlt sich aber, diese Arbeiten vom Lieferanten des BHKW ausführen zu lassen, da andernfalls der Koordinierungsaufwand unverhältnismäßig groß wird und hohe Kosten verursacht. Auch die Aufstellung des BHKW in einem eigenen Raum oder gar im eigenen Gebäude sollte vermieden werden. Wenn die Platzverhältnisse im Heizungsraum zu eng sind, ist eine Containerlösung immer kostengünstiger.

Neben den Investitionen für das BHKW und den Einbindungskosten sind ggf. Planungskosten zu berücksichtigen. Diese können sich einerseits nach dem Investitionsumfang richten; andererseits aber auch danach, in welchem Umfang die Planung im eigenen Hause des Betreibers bzw. beim Contracting-Anbieter durchgeführt wird oder extern eingekauft werden muss. Weiterhin sind Genehmigungskosten (Kap. 7.1) nicht zu vernachlässigen.

Nutzungsdauer

Für die wirtschaftliche Nutzungsdauer einer BHKW-Anlage sind neben der technischen Lebensdauer auch wirtschaftliche Einflussfaktoren von Bedeutung. Der ggf. technisch mögliche Weiterbetrieb einer alten Anlage ergibt dann keinen Sinn mehr, wenn er nicht mehr wirtschaftlich ist – sei es durch eine ungünstige Entwicklung der Brennstoff- und Strompreise oder dadurch, dass eine noch wirtschaftlichere Technik zur Verfügung steht, durch die der weitere BHKW-Betrieb ersetzt werden könnte.

In der Regel ist von einer wirtschaftlichen Nutzungsdauer eines modernen BHKW von 10 bis 15 Jahren auszugehen, wobei auch nach ca. 30 000 bis 40 000 Volllaststunden eine komplette Generalüberholung einkalkuliert werden muss. Die spezifischen Kosten dafür sind in der Abb. 68 als Richtwerte angegeben. Steuerlich sind BHKW gemäß der AfA (Absetzungen für Abnutzung) über einen Zeitraum von 10 Jahren abzuschreiben.



■ **Abb. 68:** Spezifische Richtpreise für eine Generalüberholung von Erdgas-BHKW

Wenn der Kalkulationszeitraum – auch Betrachtungszeitraum oder Abschreibungsdauer – kürzer ist als die wirtschaftliche Nutzungsdauer, dann wird ein entsprechender Restwert am Ende des Zeitraums angesetzt. Als tatsächliche Investition geht in die Kalkulation dann die Differenz zwischen Investitionssumme und Restwert ein.

Zinssatz

Der Kalkulationszinssatz ergibt sich i. d. R. aus den Zinsen, die für das eingesetzte Fremdkapital zu zahlen sind (Kreditzins z. B. 3 % p. a.) und der Verzinsung, die für eingesetztes Eigenkapital erwartet wird. Die Eigenkapitalverzinsung ergibt sich üblicherweise aus der Verzinsung, die für alternative Anlage- oder Investitionsmöglichkeiten bei vergleichbarer Laufzeit und ähnlichem Anlagerisiko erzielt werden kann. Ließe sich das investierte Eigenkapital z. B. zu 5 % p. a. anlegen, wäre für den Eigenkapitalanteil der Investition ein entsprechender Zinssatz anzunehmen. Je nach Anteil des Eigenkapitals kann dann der Zinssatz aus der Eigenkapitalverzinsung und dem Zins für Fremdkapital berechnet werden und in die Formel für den Annuitätsfaktor eingesetzt werden. Werden im Rahmen von Gebäudesanierungen KfW-Kredite für BHKW in Anspruch genommen, so gelten günstigere Zinssätze [24].

5.2.2 Brennstoffkosten

Die letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass die Brennstoffpreise enormen Schwankungen unterliegen, deren Ursachen kaum in der deutschen Energiepolitik zu suchen sind (Abb. 69), sondern vielmehr in der weltweiten Abhängigkeit von Öl- und Gaslieferungen. Schon lange läuft die weltweite Auseinandersetzung um die begrenzten Öl- und Gasreserven (Abb. 5). Ein Grund mehr, mit den Brennstoffen sparsam umzugehen, Techniken mit hohen Wirkungsgraden – aktuell mit dem Begriff »Effizienz« bezeichnet – zu wählen und langfristig auf regenerative Energieträger (z. B. Pflanzenöl, Biogas, Holz, Grubengas, Klärgas) auszuweichen.

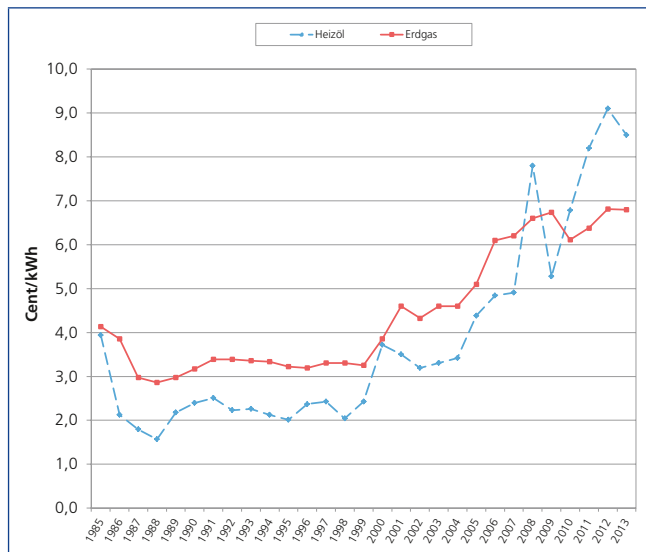
Bei der Wirtschaftlichkeitsermittlung muss auch berücksichtigt werden, dass die regenerativen Energieträger nur in Ausnahmefällen kostenfrei zur Verfügung stehen. Vielmehr müssen die Kosten für die Erzeugungsanlagen (Biogasanlage, Klärgasanlage) und die Aufbereitung berücksichtigt werden, soweit sie dem BHKW-Betrieb zuzurechnen sind und nicht ohnehin auch ohne BHKW anfallen. Die Brennstoffkosten sind in fast allen Fällen der größte Kostenbestandteil.

Sofern schwefelarmes Heizöl als Brennstoff eingesetzt wird, kann auf den Brennstoff für das BHKW eine Steuerrückerstattung von 6,135 Cent/l geltend gemacht werden. Dieser Rückerstattungs-Satz gilt auch für das Standard-Heizöl mit dem höheren Steuersatz von 7,635 Cent/l. Da das schwefelarme Heizöl um 3–5 Cent/l teurer ist, bedeutet dies für den BHKW-Betreiber seit 2009 einen finanziellen Nachteil.

Beim Einsatz von Erdgas als Brennstoff für BHKW kann auf den Brennstoff für das BHKW eine Steuerrückerstattung von 0,55 Cent/kWh_{Ho} geltend gemacht werden, was 7 % des Brennstoffpreises entspricht. Beim produzierenden Gewerbe beträgt die Steuerrückerstattung nur 60 % des Normalsatzes, also 0,33 Cent/kWh_{Ho}.

Die Preissysteme der Gasversorger sehen in der Regel feste (Grund-/Leistungspreise) und variable Bestandteile (Arbeitspreis) vor. Im Falle von leistungsabhängigen Preisbestandteilen wird zumeist entweder der höchste Tagesverbrauch (z. B. kWh Gas_{Ho} pro 24 Std.) oder die

■ **Abb. 69:** Heizöl- und Erdgaspreise



Nennwärmeleistung der angeschlossenen Kessel oder deren Feuerungswärmeleistung als Maßgröße herangezogen. Die Tageshöchstmenge beim Gasbezug erhöht sich entsprechend dem zusätzlichen Gasbedarf für die Stromerzeugung gegenüber dem reinen Kesselbetrieb zu Zeiten der Winterspitzen. Sie erhöht sich nicht um den gesamten Tagesbrennstoffeinsatz des BHKW, da sich durch das BHKW die im Kessel eingesetzte Höchstmenge i. d. R. verringert.

Zumeist sind Heizungsanlagen mit BHKW so ausgelegt, dass auch der Heizkessel allein in der Lage ist, den maximalen Wärmebedarf des Gebäudes abzudecken. Bei Leistungspreissystemen erfolgt möglicherweise eine Addition der Leistungswerte sowohl des Kessels als auch des BHKW. Dies ist aber der Praxis nicht immer angemessen, da ein gleichzeitiger Betrieb von Kessel und BHKW mit voller Leistung zumindest bei regelbaren Kesselanlagen nicht stattfindet. Denn durch die Wärmeerzeugung im BHKW kann diejenige im Kessel entsprechend reduziert werden. Gedanklich wäre allenfalls der der Stromerzeugung zurechenbare (Gas-)Leistungsanteil des BHKW zur Berechnung des erhöhten Leistungspreises heranzuziehen. Sofern der Heizkessel verriegelt werden kann, dürfte die Situation eindeutig sein. Denn dann lässt sich der Leistungsbedarf des Kessels entsprechend dem BHKW-Wärmeanteil für das Gasversorgungsunternehmen nachvollziehbar begrenzen.

Einzelne Gasversorger fördern BHKW, indem sie Rabatte oder Investitionszuschüsse gewähren.

5.2.3 Zusatz- und Reservekosten

Ein Betreiber kann nur einen Teil seines Strombedarfs aus dem BHKW decken. Den Rest muss er als Zusatzstrom vom Stromversorger beziehen. Im Energiewirtschaftsgesetz ist geregelt, zu welchen Konditionen dies zu geschehen hat: Betreibt ein Tarifikunde ein BHKW bis 30 kW elektrischer Leistung, dann hat er weiterhin ein Anrecht auf Versorgung zu Tarifikonditionen. Beim Betrieb eines BHKW mit mehr als 30 kW elektrischer Leistung besteht kein Anrecht des Kunden auf Versorgung zu Tarifikonditionen. In diesem Falle besteht das Recht auf Versorgung zu Konditionen, die für das Versorgungsunternehmen wirtschaftlich zumutbar sind.

Obwohl die übliche Auslegung der wirtschaftlich zumutbaren Konditionen nach Ansicht der Stromversorger die zwangsläufige Anwendung von Sondervertrags-Konditionen unterstellt, sprechen wesentliche Argumente dafür, auch die Tarifikonditionen als wirtschaftlich zumutbar einzustufen. Denn der Drittversorger kann in seinem Strombezugsverhalten durchaus vergleichbar mit anderen Tarifikunden sein.

Die im Gesetzestext formulierte Beschränkung, dass nur bei so genannter Eigenbedarfsdeckung das Recht auf Tarifikonditionen fortbesteht, widerspricht der mit dem EnWG grundsätzlich intendierten Liberalisierung des Strommarktes und der Förderung von Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung. Deshalb gibt es derzeit Bestrebungen, die darauf zielen, die Gewährung von Tarifikonditionen für BHKW bis 30 kW auch explizit und unmissverständlich auszudehnen auf Drittversorgungsmodelle, die technisch und ökonomisch in vielen Fällen einer »klassischen« Eigenversorgung vergleichbar sind.

Als Ergänzung zur (Zusatz-)Stromversorgung für Eigenerzeuger bieten die Stromversorger die Lieferung von Reservestrom an. Diese Reservestrombereitstellung bezieht sich auf Ausfälle von Eigenerzeugungsanlagen, die dem Reserveversorger in der Regel innerhalb einer bestimmten Frist gemeldet werden müssen. Im Falle eines gemeldeten Stillstands wird der vergleichsweise

preiswerte Reservestrom in Anrechnung gebracht anstelle des durch den BHKW-Ausfall erhöhten Bezugs an Strom gemäß den Bedingungen des »normalen« Stromvertrags. Sofern Ausfälle zu solchen Zeiten stattfinden, in denen der Kunde selbst Verbrauchsspitzen aufweist, kann der kostengünstige Reservestrom tatsächlich zur Kostensenkung beitragen. Jedoch verursacht nicht nur die Inanspruchnahme, sondern auch die ganzjährige Bereitstellung des Reservebezugs durch den Stromversorger Kosten.

Von daher muss anhand der Preiskonditionen und der erwarteten Wahrscheinlichkeit für Ausfälle zu Spitzenzeiten ermittelt werden, ob die Reservebestellung sinnvoll ist. Bei kleineren und mittleren BHKW moderner Bauart, die in der Wärmegrundlast betrieben werden, dürfte die Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage zu Zeiten von Stromspitzen (zumeist im Winter) in Betrieb ist, so hoch sein, dass sich die Bestellung von Reservestrom nicht rentiert. Nach Vorliegen einiger Betriebserfahrungen im jeweiligen Projekt sollte die Entscheidung für oder gegen Reserve-Bereitstellung nochmals überprüft werden.

Das Aushandeln von Konditionen für die Zusatz- und Reservestromerzeugung mit dem Stromversorger führt oft in ein undurchschaubares Dickicht von unterschiedlichsten Tarif- und Sondervertragsbestimmungen, die letztendlich den potenziellen BHKW-Betreiber verunsichern und von seinem Vorhaben abbringen sollen. Dabei sind zwei weit verbreitete Vorgehensweisen zu beobachten.

Auf die Ankündigung eines Kunden, eine Eigenerzeugungsanlage errichten zu wollen, erhalten potenzielle BHKW-Betreiber oft das Angebot günstigerer Preise, wenn sie auf das geplante BHKW verzichten. BHKW-Investitionen können im Vergleich zu den neuen Konditionen in vielen Fällen kaum konkurrieren.

Der zweite Weg der BHKW-Verhinderung, den einige Stromversorger beschreiten, beinhaltet die Androhung verschlechterter Bezugskonditionen, wenn ein Stromkunde ein BHKW betreiben möchte. Sachlich ist dies in der Regel nicht gerechtfertigt, denn BHKW-Betreiber unterscheiden sich in ihrem Strombezug nicht grundsätzlich vom Strombezug anderer Kunden, die kein BHKW betreiben. Dementsprechend müssten die Stromversorgungsunternehmen ihren BHKW-betreibenden Kunden regelmäßig die Konditionen vergleichbarer Kunden ohne BHKW gewähren. Kunden ohne BHKW haben in der Regel die Wahl zwischen den Norm-Sondervertragstypen des EVU. Je nach Höhe der benötigten Leistung und der benötigten elektrischen Arbeit ergibt sich einer der angebotenen Verträge als günstigste Variante. Dieses Recht steht prinzipiell auch BHKW-Betreibern zu.

5.2.4 Sonstige Kosten

Je nach Einsatzfall können weitere Kosten anfallen. Der Beaufsichtigungs- und Bedienungsaufwand einer BHKW-Anlage richtet sich nach deren Automatisierungsgrad. Durch Einsatz einer Datenfernübertragung kann der Betreuungsaufwand vor Ort minimiert werden. In diesem Falle sind die Investitions- und die Betriebskosten für das Fernüberwachungssystem einzubeziehen.

Personalkosten für den BHKW-Betrieb sind dann zu berücksichtigen, wenn es sich um eine Anlage mit niedrigem Automatisierungsgrad handelt oder wenn die Instandhaltung zumindest teilweise mit eigenem Personal durchgeführt werden soll.

Durch den BHKW-Betrieb können gegenüber einer reinen Wärmeerzeugungsanlage zusätzliche Verwaltungskosten entstehen. Die Anlage ist mit allen Vertragsbeziehungen im betrieblichen Rechnungswesen zu erfassen. In der Praxis dürfte vor allem die verwaltungsmäßige Betreuung von Reparatur- und Wartungsaufträgen bzw. -verträgen sowie der Energiebezugs- und Lieferverträge eine Rolle spielen.

Für den Abschluss von Versicherungen sind Prämienzahlungen einzukalkulieren. Näheres zu Inhalt und Notwendigkeit von Versicherungen findet sich in Kap. 7.3.

Die genaue Höhe der sonstigen Kosten lässt sich meist erst in einem späten Projektstadium ermitteln oder oft nur mit einiger Ungenauigkeit abschätzen (z. B. eigene Personal- oder Verwaltungskosten des BHKW-Betreibers). In frühen Projektphasen wird man auf einen pauschalen Ansatz zurückgreifen müssen. Dabei erscheinen Werte zwischen 0,5 % und 1,5 % der Investitionssumme als jährliche Kosten realistisch.

5.3 Erlöse, Einsparungen

Die Bewertung der BHKW-Produkte Strom und Wärme ist abhängig von der Form ihrer Verwendung und der Zuschlagszahlungen nach dem KWKG-Gesetz. Dienen die Produkte dazu, den Strombezug bzw. die Wärmeerzeugung eines Kessels zu ersetzen, dann handelt es sich um eine Einsparung. Bei dieser Eigennutzung ergibt sich der Wert der Produkte daraus, welche Kosten die anderweitige Beschaffung verursachen würde. Wenn die Strom- und Wärmeerzeugung des BHKW an Dritte verkauft wird, werden Erlöse erzielt.

5.3.1 Strom

Die Bewertung des BHKW-Stroms hängt davon ab, ob der Strom

- in das öffentliche Netz eingespeist wird,
- selbst genutzt wird und dadurch den eigenen Bezug vermindert,
- an Dritte im selben Objekt oder
- an weiter entfernte Dritte mittels Durchleitung verkauft wird.

In allen Fällen wird die Zuschlagszahlung nach dem KWKG-Gesetz bezahlt. Die Erlöse, die eine Netzeinspeisung bei neuen BHKW bringt, liegen bei ca. 8–10 Cent/kWh incl. der Zuschlagszahlung nach dem KWKG-Gesetz. Der Wert bzw. die Einsparung, die eine Eigennutzung bringt, geht aus den entsprechenden Tarif- bzw. Sondervertragsbedingungen hervor. Er liegt je nach Größe des Betriebes zwischen ca. 9 und 22 Cent/kWh. Der Stromverkauf an Dritte – möglichst zu den Tarifpreisen des lokalen Stromanbieters – ist die günstigste Lösung. Zum Tarifpreis um 23 Cent/kWh kommt noch der KWKG-Bonus von 5,4 Cent/kWh für BHKW bis 50 kW_{el} und außerdem kann von jedem aus dem BHKW versorgten Abnehmer auch ein Verrechnungspreis verlangt werden.

Der vierte Fall der Netzdurchleitung zur Versorgung weiter entfernter Dritter könnte in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit eines BHKW erheblich verbessern. Zur Versorgung räumlich verteilter Objekte besteht die Möglichkeit der Verlegung eigener Leitungen. Dazu dürfen gemäß den Regelungen des Energiewirtschaftsgesetzes auch öffentliche Wege genutzt werden. Es ist nicht zulässig, dass ein Konzessionsvertrag einem Stromversorger das alleinige Recht zur

Leitungsverlegung zusichert. Wenn auch rechtlich zulässig, so ist oftmals die Verlegung neuer Leitungen wirtschaftlich nicht vertretbar.

Durch das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) besteht ein Anspruch für Dritte, auch vorhandene Leitungsnetze der allgemeinen Versorgungsunternehmen zwecks Durchleitung von Strom zu nutzen. De facto besteht aber die Monopolsituation vor 1998 nahezu unverändert fort. Denn die früheren Gebiets-EVU und heutigen Netzbetreiber verhindern in aller Regel die Strom-Durchleitung mittels prohibitiv hoher Entgelte, komplizierter Berechnungssysteme auf Basis von Netzebenen und Entfernungen, unangemessenen Messanforderungen und anderen restriktiven Vertragsbedingungen. Klare und angemessene Entgelte – wie z. B. in Dänemark – könnten die Möglichkeiten zum Verkauf von Strom aus BHKW an Dritte erheblich erweitern.

Die Erlöse bzw. die Einsparungen durch den BHKW-Strom müssen im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit den Kosten für das BHKW verglichen werden. Dabei sind alle Kostenarten einschließlich der Kapitalkosten und der Wärmegutschriften zu berücksichtigen.

5.3.2 Wärme

Die im BHKW erzeugte Wärme ersetzt die Erzeugung der gleichen Wärmemenge im Kessel. Der Heizkessel ist i. d. R. zur Deckung des Spitzen- und Reservebedarfs an Wärme weiterhin erforderlich. Die Wärmekosten einer mit einem BHKW und einem Heizkessel versorgten Wohnanlage richtet sich nach der VDI-Richtlinie 2077 Beiblatt 3.1. Die Verbrauchswerte liegen bei der Planung aber noch nicht vor. Daher legt man eine alternative Wärmebereitstellung aus einem Kessel zu Grunde, wobei man zwischen der Vollkostenbetrachtung (mit Investitionen) und der Ermittlung nur der laufenden Kosten unterscheidet. Die Brennstoffkosten als überwiegenden Anteil an den laufenden Kosten ergeben sich aus dem Brennstoffpreis geteilt durch den Nutzungsgrad des alternativen Kessels.

5.4 Beispiele

5.4.1 BHKW mit 1 und 5,5 kW_{eI}

Im Folgenden soll ein Verfahren zur annuitätischen Wirtschaftlichkeitsrechnung dargestellt werden, das nicht die gesamten jährlichen Energiekosten eines Objekts berücksichtigt, sondern nur die Jahreskosten, die durch den Betrieb des BHKW unmittelbar beeinflusst werden. Beispielsweise werden die Kapital- und Betriebskosten des neben dem BHKW betriebenen Heizkessels außer Acht gelassen, da sie sich durch die BHKW-Wärmeerzeugung nur marginal ändern. Zur isolierten Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines BHKW ohne Betrachtung der Vollkosten der alternativen Wärmeerzeugung ist dieses Verfahren hier ausreichend.

Dagegen werden die Kapital- und Betriebskosten des BHKW betrachtet sowie die erzielbaren Erlöse, Zuschlagszahlungen, Investitionshilfen und Steuerersparnisse. Preisänderungen beim Strom werden in einer Variante für das 1 kW_{eI}-BHKW berücksichtigt.

Die Wärmeerzeugung des BHKW wird durch Ermittlung des Brennstoffaufwands für eine alternative Wärmeerzeugung aus einem Kessel als Gutschrift berücksichtigt. Dabei sind der Nutzungsgrad des Kessels mit 80 % und die Steuerrückerstattung für das im BHKW

eingesetzte Erdgas, aber nicht die Kapitalkosten der alternativen Wärmeerzeugung in einem Kessel berücksichtigt.

Für die Bewertung des BHKW-Stroms werden zwei Varianten betrachtet. Einmal wird der Strom für 22 Cent/kWh zu Haushaltsstrompreisen verkauft. Dazu kommt noch der KWK-Bonus von 5,3 Cent/kWh. In der zweiten Variante wird eine 100 %ige Netzeinspeisung zu etwa 10 Cent/kWh angesetzt.

Das 1 und 5,5 kW_{el}-BHKW haben als Arbeitsmaschine einen Verbrennungsmotor. Die beiden Größen haben ein riesiges Potenzial in der gewerblichen und privaten Gebäudeheizung, sowohl beim Neubau als auch bei der energetischen Sanierung.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines kleinen BHKW sind in Abb. 70 und 71 die Kriterien »jährlicher Überschuss« und »Amortisationsdauer« in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer aufgeführt. »Überschuss« bedeutet, dass man gegenüber einem Heizkessel etwas einspart.

Es lassen sich folgende grundsätzliche Aussagen ableiten:

- Nach dem Impulsprogramm für Mini-BHKW macht die Förderung bei dem 1 kW_{el}-BHKW 13 % und bei dem 5,5 kW_{el} nur 10 % der Investitionen aus. Die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit sind daher gering.
- Die Stromerlöse liegen etwas über den Brennstoffkosten. Man kann also sagen, dass das BHKW eine Heizung ist, die kostenlos Strom erzeugt.
- Es sollte eine Netzeinspeisung möglichst vermieden werden. Für das 1 kW_{el}-BHKW ist eine Wirtschaftlichkeit auch bei hohen Benutzungsdauern nicht darstellbar. Die Netzeinspeisung bei dem 5,5-kW_{el}-BHKW ist erst ab einer Benutzungsdauer von über 6000 h/a wirtschaftlich zu vertreten.
- Wesentlich wirtschaftlicher ist der Eigenverbrauch und Stromverkauf. Für diese Variante der Stromnutzung ist das 5,5 kW_{el}-BHKW bereits ab einer Benutzungsdauer von 2000 h/a wirtschaftlich. Beim 1 kW_{el}-BHKW ist dies erst ab einer Benutzungsdauer von 4000 h/a der Fall.
- Mit dem gewählten BHKW von 5,5 kW_{el} und einer Benutzungsdauer von 2000 Stunden könnte der Wärmebedarf eines Objekts mit einem entsprechenden Heizölverbrauch von ca. 3000 Litern versorgt werden. Dann ist eine Amortisationsdauer von 10 Jahren gegeben. Dies ist eine Lösung ohne zusätzlichen Heizkessel, der sich nie amortisieren würde.
- Für Neubauten von Ein- und Zweifamilienhäusern – vor allem wenn sie energieeffizient ausgeführt werden (z. B. als sogenanntes Effizienzhaus 55, 3-Liter-Haus oder gar Passivhaus) – ist die BHKW-Größe von ca. 5 kW_{el} kaum wirtschaftlich darstellbar, kleinere BHKW zwischen 1 und 2 kW_{el} dagegen sehr wohl.
- BHKW-Größen um 5 kW_{el} führen dann zu einem wirtschaftlichen Einsatz, wenn sie in neugebauten oder sanierten Mehrfamilienhäuser zum Einsatz kommen.
- Der Ansatz einer auch moderaten Strompreissteigerung von 4 %/a führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Dies führt dazu, dass das 1 kW_{el}-BHKW auch bei niedrigen Benutzungsdauern und 100 % Eigenbedarf und Stromverkauf wirtschaftlich betrieben werden kann.

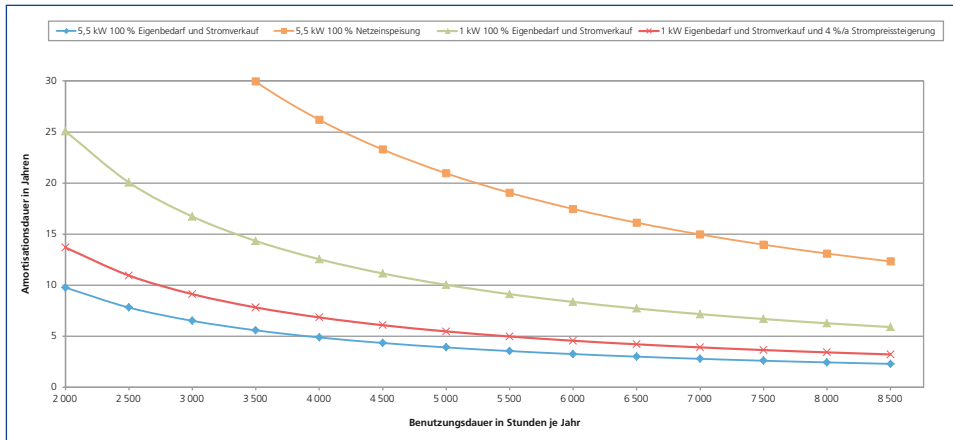


Abb. 70: Wirtschaftlichkeit eines 1 und 5,5 kW_{el}-BHKW in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer

Variante Eigenversorgung Erdgas-Mikro-BHKW

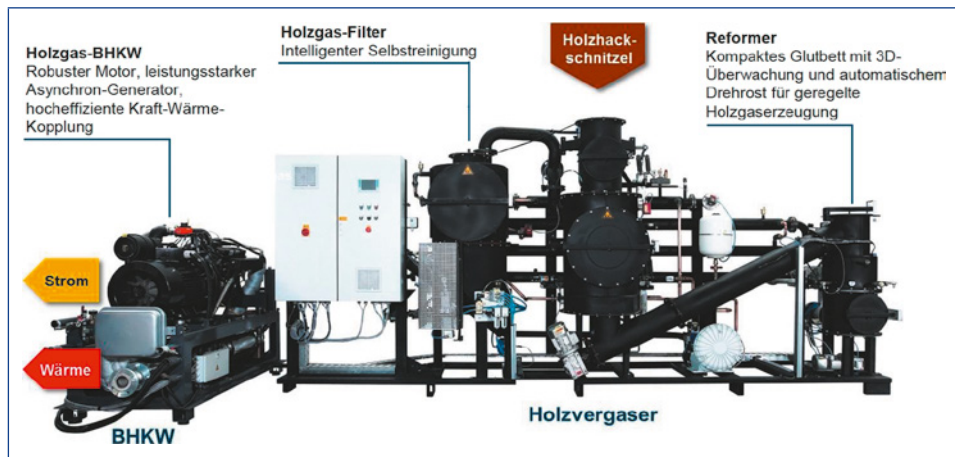
| | | | | | | |
|--|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| elektrische Leistung | | 1 | 1 | 1 | 1 | kW |
| thermische Leistung | | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | kW |
| Brennstoffleistung | | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | kW |
| Vollbenutzungsstunden | | 2000 | 3500 | 5000 | 7000 | h/a |
| Brennstoffpreis | | 7 | 7 | 7 | 7 | Cent/kWh |
| Jahresbrennstoffmenge | | 7778 | 13612 | 19445 | 27223 | kWh/a |
| Stromerzeugung | | 2000 | 3500 | 5000 | 7000 | kWh/a |
| Wärmeerzeugung | | 5000 | 8750 | 12500 | 17500 | kWh/a |
| Zinssatz | | 3 | 3 | 3 | 3 | % |
| Stromerlös durch Stromverkauf zu Haushaltsstrompreisen + KWK-Bonus | | 27 | 27 | 27 | 27 | Cent/kWh |
| Netzeinspeisung Variante 2 | | 10 | 10 | 10 | 10 | Cent/kWh |
| Wärmeerlös | | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | Cent/kWh |
| Energiesteuer | | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | Cent/kWh |
| BHKW-Preis | | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | € |
| Förderung | | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | € |
| Kapitalkosten (15 Jahre und 3 % Zins) | | 754 | 754 | 754 | 754 | €/a |
| Erlös für Strom | + | 540 | 945 | 1.350 | 1.890 | €/a |
| Erlös für die Wärme | + | 438 | 766 | 1.094 | 1.531 | €/a |
| Energiesteuer | + | 43 | 75 | 107 | 150 | €/a |
| Brennstoffkosten | - | 544 | 953 | 1.361 | 1.906 | €/a |
| Wartung + Instandhaltung 5 Cent/kWh _{el} | - | 100 | 175 | 250 | 350 | €/a |
| Jährlicher Überschuss | | 376 | 658 | 940 | 1315 | €/a |
| Amortisationsdauer | | 23,9 | 13,7 | 9,6 | 6,8 | Jahre |
| Stromerzeugungskosten | | 48,1 | 31,9 | 25,4 | 21,1 | Cent/kWh |

| Variante Netzeinspeisung Erdgas-Mikro-BHKW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| elektrische Leistung | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 kW |
| thermische Leistung | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 kW |
| Brennstoffleistung | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 | 3,889 kW |
| Vollbenutzungsstunden | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6500 | 7000 | 7500 | 8000 | 8500 | 9000 | 9500 | 10000 | 10500 | h/a |
| Brennstoffpreis | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | Cent/kWh |
| Jahresbrennstoffmenge | 7778 | 9723 | 11667 | 13612 | 15556 | 17501 | 19445 | 21390 | 23334 | 25279 | 27223 | 29168 | 31112 | 33057 | 35001 | 36945 | 38889 | 40833 | kWh/a |
| Stromerzeugung | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6500 | 7000 | 7500 | 8000 | 8500 | 9000 | 9500 | 10000 | 10500 | kWh/a |
| Wärmeerzeugung | 5000 | 6250 | 7500 | 8750 | 10000 | 11250 | 12500 | 13750 | 15000 | 16250 | 17500 | 18750 | 20000 | 21250 | 22500 | 23750 | 25000 | 26250 | kWh/a |
| Zinssatz | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | % |
| Stromerlös durch Stromverkauf zu Haushaltsstrompreisen + KWK-Bonus | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | Cent/kWh |
| Netzeinspeisung Variante 2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | Cent/kWh |
| Wärmeerlös | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | Cent/kWh |
| Energiesteuer | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | Cent/kWh |
| BHKW-Preis + Einbindung | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | 10500 | € |
| Förderung | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | € |
| Kapitalkosten (15 Jahre und 3 % Zins) | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | 754 | €/a |
| Erlös für Strom | + | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | €/a |
| Erlös für die Wärme | + | 438 | 547 | 656 | 766 | 875 | 984 | 1094 | 1203 | 1313 | 1422 | 1531 | 1641 | 1750 | 1859 | 1969 | 2078 | 2188 | €/a |
| Energiesteuer | + | 43 | 53 | 64 | 75 | 86 | 96 | 107 | 118 | 128 | 139 | 150 | 160 | 171 | 182 | 193 | 204 | 215 | €/a |
| Brennstoffkosten | - | 544 | 681 | 817 | 953 | 1089 | 1225 | 1361 | 1497 | 1633 | 1769 | 1906 | 2042 | 2178 | 2314 | 2450 | 2586 | 2722 | €/a |
| Wartung + Instandhaltung 5 Cent/kWh _{el} | - | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 375 | 400 | 425 | 450 | 475 | 500 | €/a |
| Jährlicher Überschuss | 36 | 45 | 54 | 63 | 72 | 81 | 90 | 99 | 107 | 116 | 125 | 134 | 143 | 152 | 161 | 170 | 179 | 188 | €/a |
| Amortisationsdauer | 251,3 | 201,0 | 167,5 | 143,6 | 125,6 | 111,7 | 100,5 | 91,4 | 83,8 | 77,3 | 71,8 | 67,3 | 62,8 | 58,3 | 53,8 | 49,3 | 44,8 | 40,3 | Jahre |
| Stromerzeugungskosten | 48,1 | 40,5 | 35,5 | 31,9 | 29,2 | 27,1 | 25,4 | 24,1 | 22,9 | 22,0 | 21,1 | 20,4 | 19,8 | 19,2 | 18,6 | 18,0 | 17,4 | 16,8 | Cent/kWh |

■ Abb. 71: Daten zur Wirtschaftlichkeit eines 1 kW_{el}-BHKW

5.4.2 Holz-BHKW mit 30 kW_{el}

In der Beispielrechnung (Abb. 73) wird ein 30 kW_{el}-Holz-BHKW (Abb. 72) im Vergleich zu einem Heizkessel plus Strombezug betrachtet. Der Strombezug entspricht der Stromerzeugung des BHKW und die Wärmeerzeugung des BHKW der des Heizkessels. Es ist eine annuitätische Vollkostenrechnung. Die gesamten Kosten für das BHKW sind um jährlich rd. 22 600 Euro günstiger als der Heizkessel mit Strombezug. Selbst wenn man annimmt, dass das BHKW nicht zur Reduzierung der Stromspitze beiträgt, liegt der Kostenvorteil immer noch bei 18 300 Euro pro Jahr. Wenn die Vollkosten der Wärmebereitstellung des Heizkessels von den Vollkosten des BHKW abgezogen werden, ergeben sich für die Stromerzeugungskosten des BHKW nahezu 0 Cent/kWh. Mit den Erlösen durch die Wärmelieferung des BHKW sind die Kosten der Stromerzeugung mit abgedeckt. Würde man den Strom ins Netz einspeisen kämen noch einmal Erlöse von rd. 33 000 Euro dazu. Die Anlage hat sich nach 3 Jahren amortisiert.



■ Abb. 72: 30 kW_{el}-Holzvergaser-BHKW

5.4.3 BHKW mit 75 kW_{el} in einer Biogasanlage

Die Biomassenutzung ist gemäß dem EEG seit dem 01.01.2014 stark eingeschränkt worden. Es werden nur noch Anlagen bis zu einer Größe von 750 kW gefördert. Weiterhin wird der Strom nur vergütet, wenn er zu mindestens 60 % in KWK erzeugt wird und der Mais höchstens einen Anteil von 60 % hat. Die Beispielrechnung (Abb. 74) zeigt, dass eine Investition auch in kleine Biogasanlagen mit hoher Auslastung einen wirtschaftlichen Betrieb verspricht. Es ist nicht zwingend notwendig, dass ein Landwirt das BHKW mit der Biogasanlage betreiben muss. Beides wird als ein technischer Komplex betrachtet, dem in diesem Beispiel nur 15 % Mais- und Grassilage als Rohstoff zugeführt wird. Dieser Rohstoff muss bezahlt werden, denn er hat Beschaffungskosten verursacht. Die 85 % Schweinegülle verursacht nur einen winzigen Bruchteil der Beschaffungskosten.

Der Strom wird in das Stromnetz eingespeist und nach dem EEG mit 24 Cent/kWh vergütet. Die vollständige Verwertung der Wärme macht in der Praxis Probleme, weil nur maximal 40 % der BHKW-Wärme für den Biogasprozess benötigt werden. Im vorliegenden Fall steht über das ganze Jahr eine Wärmeleistung von 51 kW zur Verfügung. Als Wärmeabnehmer

| | Einheit | BHKW | Heizkessel + Strombezug |
|---|-----------------|--------------|-------------------------|
| Technische Daten | | | |
| Brennstoffleistung BHKW / Heizkessel | kW | 130 | 94 |
| elektrische Leistung BHKW / Strombezug | kW | 30 | 30 |
| Thermische Leistung BHKW / Heizkessel | kW | 80 | 80 |
| Vollbenutzungstunden BHKW Heizkessel | h/a | 5000 | 5000 |
| Jahresbrennstoffmenge BHKW Heizkessel | kWh/a | 650000 | 470588 |
| Stromerzeugung BHKW / Strombezug | kWh/a | 150000 | 150000 |
| Wärmeerzeugung BHKW / Heizkessel | kWh/a | 400000 | 400000 |
| Nutzungsgrad BHKW / Heizkessel | % | 85 | 85 |
| Wirtschaftliche Daten | | | |
| BHKW-Preis + Einbindungskosten / Heizkessel | € | 130000 | 25000 |
| Kalkulationszins | %/a | 3 | 3 |
| Laufzeit Finanzierung | Jahre | 10 | 10 |
| Vollwartung | Cent/kWh // €/a | 2,5 | 350 |
| Personalaufwand | €/a | 3650 | 0 |
| Brennstoffkosten | Cent/kWhHo | 3,20 | 7,0 |
| Stromkosten ohne Leistung | Cent/kWh | | 17 |
| Leistungspreis des Strombezugs | €/kW | | 145 |
| Vollkosten des Heizkessels | Cent/kWh | | 9,1 |
| Einspeisevergütung KUP kleiner 10 ha (2014) | Cent/kWh | 21,73 | |
| Jahreskosten | | | |
| Kapitalkosten | €/a | 15236 | 2930 |
| Brennstoffkosten | €/a | 20800 | 32941 |
| Wartungs- Instandhaltungskosten | €/a | 7400 | 350 |
| Strombezugskosten | €/a | | 29859 |
| Summe Ausgaben incl. Kapitalkosten und Stromleistung | €/a | 43436 | 66080 |
| Summe Ausgaben ohne Kapitalkosten und Stromleistung | €/a | 28200 | 58791 |
| Einspeisevergütung | €/a | 32595 | |
| Summe Einnahmen | €/a | 32595 | |
| Statische Amortisationszeit | Jahre | 3,4 | |
| Stromerzeugungskosten | Cent/kWh | 0,0 | |
| Kostenvorteil des BHKW ohne Kapitalkosten und ohne Strom-Leistungsreduktion | €/a | 30591 | |
| Kostenvorteil des BHKW incl. Kapitalkosten und ohne Strom-Leistungsreduktion | €/a | 18285 | |

■ **Abb. 73:** Wirtschaftlichkeit eines 30 kW_{el}-Holz-BHKW

| Biogasanlage | Einheit | |
|---|-----------------|----------------|
| Substratbedarf Schweine 350 GV | t / a | 6 388 |
| Substratbedarf Grassilage | t / a | 394 |
| Substratbedarf Maissilage | t / a | 750 |
| Technische Daten BHKW | | |
| Brennstoffleistung | kW | 200 |
| Elektrische Leistung | kW | 75 |
| Thermische Leistung BHKW | kW | 85 |
| Vollbenutzungsstunden BHKW | h/a | 8 000 |
| Stromerzeugung BHKW | kWh/a | 600 000 |
| Wärmeerzeugung BHKW | kWh/a | 680 000 |
| für Prozess | kWh/a | 272 000 |
| für freie Verwertung (60 %) | kWh/a | 408 000 |
| Nutzungsgrad BHKW | % | 80 |
| Wirtschaftliche Daten | | |
| BHKW-Preis | € | 79 802 |
| Biogasanlage | € | 472 199 |
| Kalkulationszins | %/a | 3 |
| Laufzeit Finanzierung | Jahre | 10 |
| Instandhaltung incl. Arbeitskosten | € / a | 22 463 |
| Verbrauchsgebundene Kosten | € / a | 66 291 |
| Labor, Verwaltung, Sonstiges | € / a | 8 760 |
| Wärmepreis | Cent/kWh | 6,0 |
| Einspeisevergütung | Cent/kWh | 24 |
| Jahreskosten | | |
| Kapitalkosten | €/a | 64 694 |
| Betriebsgebunden Kosten | €/a | 97 514 |
| Summe Ausgaben | €/a | 162 208 |
| Jahreseinnahmen | | |
| Stromerlöse | €/a | 144 000 |
| Wärmeverkauf | €/a | 24 480 |
| Summe Einnahmen | €/a | 168 480 |
| Jahresergebnis (Einnahmen minus Ausgaben incl. Festkosten) | €/a | 6 272 |
| Jahresergebnis (Einnahmen minus Ausgaben ohne Festkosten) | €/a | 70 966 |
| Statische Amortisationszeit | Jahre | 7,8 |
| Stromerzeugungskosten incl. Festkosten | Cent/kWh | 27,0 |
| Stromerzeugungskosten ohne Festkosten | Cent/kWh | 14,3 |

■ **Abb. 74:** Wirtschaftlichkeit eines 75 kW_{el}-Biogas-BHKW

kommen z. B. die Stallungen und angrenzende Gebäude, Absorptionskältemaschinen oder kleine Nahwärmenetze in Frage.

Als Wärmepreis wurden 6 Cent/kWh angesetzt, das ist deutlich weniger als die Wärmebereitstellung aus einem Heizkessel mit fossilen Brennstoffen.

Die Daten zur Wirtschaftlichkeit zeigen, dass sich bei einer gemischten Verwertung von Gülle, Gras- und Maissilage in der Biogasanlage und eine vollständige Nutzung der Wärme ein jährlicher Überschuss – Einnahmen minus Ausgaben ohne Festkosten – von 70 966 Euro ergibt. Die Anlage amortisiert sich in 8 Jahren.

Schon geringe Änderungen an der Betriebsweise oder der Zusammensetzung der Substrate können sich enorm auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Deshalb ist es wichtig, bereits bei der Planung alle Kosten, die möglichen EEG-Einspeisevergütungen, Wärmepreise und die Betriebsweise möglichst exakt festzulegen. Das aufgezeigte Beispiel lässt sich kaum auf andere Anlagengrößen oder Substrate übertragen. Vor allem konnten hier nicht die vielen speziellen Investitionshilfen, und Fördermöglichkeiten in der Landwirtschaft berücksichtigt werden.

5.4.4 Lichtblick-BHKW mit 19 kW_{el} und 36 kW_{th}

Das BHKW von Lichtblick wurde für Objekte empfohlen, die einen Brennstoffverbrauch von über 120 000 kWh (ca. 12 000 l Heizöl) haben. Der BHKW-Interessent kauft das BHKW von Lichtblick. Das BHKW ist dann Bestandteil eines virtuellen Kraftwerks und wird von Lichtblick ferngesteuert. Zusätzlich kann der Anwender verschiedene Servicepakete wie Wartung, Finanzierung oder Stromverkauf an weitere Nutzer in Anspruch nehmen. Die Abb. 75 zeigt, dass sich das BHKW gegenüber einem Heizkessel und dem Standard-Strombezug in weniger als 5 Jahren amortisiert. Dabei ist ein Wärmebedarf von 179 MWh und ein Strombedarf von 89 MWh je Jahr angesetzt.

| Einmalige Ausgaben | Lichtblick-BHKW | Bestandsanlage (Gaskessel) | |
|--|-----------------|----------------------------|-----------------|
| Investitionen incl. Einbau | 60 150 € | – € | |
| Abzüglich Förderung | 3 450 € | – € | |
| Netto-Gesamtinvestition | 56 700 € | – € | |
| Investitionsdifferenz | 56 700 € | | |
| Jährliche Ausgaben/Einnahmen | | | |
| Betriebs- u. Wartungskosten | 3 029 € | 300 € | 0,053 |
| Erdgaskosten | 14 720 € | 11 588 € | 0,051 |
| Stromkosten für den Eigenbedarf | 9 590 € | 20 470 € | |
| Summe Erlöse (KWK-Gesetz, Steuererstattung, vermiedene Netznutzungsentgelte) | 8 197 € | – € | |
| Summe jährliche Gesamtkosten nach Abzug der Erlöse | 19 142 € | 32 358 € | 13 216 € |
| | | | 4,29 € |
| Amortisationsdauer | 4,3 | | |

■ **Abb. 75:** Wirtschaftlichkeit eines BHKW als Teil eines virtuellen Kraftwerks

6 Organisatorische Konzepte, Betriebs- und Vermarktungsmodelle

Wie in Kapitel 5 ausgeführt, kann die Investition in ein BHKW einen wirtschaftlichen Erfolg bringen, wenn die Rahmenbedingungen wie z. B. eine genügend hohe Benutzungsdauer gegeben sind. In diesem Kapitel werden organisatorische Konzepte, Betriebs- und Vertragsmodelle behandelt, die sichern helfen, dass Investoren, Eigentümer und Nutzer in den Genuss der Vorteile einer gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung kommen – ohne dass sich der übliche Konflikt zwischen dem, der investiert und dem, der den Nutzen daraus hat, auftut [25]. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Eigen- und Fremdversorgung (Contracting).

Contracting ist eine besondere Form der Energiedienstleistung für Gewerbebetriebe, Kommunen und Wohnungswirtschaft, die spezielle Energiedienstleister, aber auch Hersteller, Stadtwerke und Energieversorger anbieten. Der Contractor kauft, errichtet und betreibt das BHKW (sog. Anlagen-Contracting). Die Anlage bleibt sein Eigentum und wird über einen mit dem Kunden vereinbarten Strom- und Wärmelieferpreis finanziert. Wartung und Betrieb der Anlage liegen gleichfalls beim Contractor.

Ob Contracting für den Kunden wirtschaftlich interessant ist, hängt von der Höhe des an den Contractor zu zahlenden Strom- und Wärmepreises im Vergleich zu den Aufwendungen und Erlösen bei der Eigenversorgung ab. Der Kunde sollte kritisch prüfen, ob sich für ihn eine eigene Investition lohnt. In jedem Fall sollte man sich von unabhängiger Seite beraten lassen sowie verschiedene Angebote einholen. Da es sich bei Contractingverträgen um langfristige Bindungen auf dem Sektor volatiler Brennstoffmärkte handelt, sollte man neben den Preisen für Strom und Wärme auch auf Dynamisierungsklauseln, Preisbindungen, Ausfallrisiken und die Bedingungen nach Ablauf des Vertrages achten.

Contracting ist gegenüber der Eigenversorgung wirtschaftlich benachteiligt, weil natürlich die Contractoren selbst kosten und sie zur Zahlung der EEG-Umlage verpflichtet sind. Bei der Eigenerzeugung entfällt diese Umlage-Verpflichtung bis zu einer Bagatellgrenze von 10 000 kWh/a. Ein weiteres Hemmnis geht von der seit dem 01.07.2013 geltenden Wärmelieferverordnung (WärmeLV) aus, weil bei einer Umstellung der Wärmelieferung vom Eigenbetrieb auf eine gewerbliche Wärmelieferung (Contracting) dies für den Mieter nicht teurer werden darf (Kostenneutralität). Dies ist bei einer Umlage von BHKW-Investitionen auf die Heizkosten nur in seltenen Fällen möglich. Der massive Einsatz von BHKW in der Wohnungswirtschaft durch Contractoren ist daher nicht zu erwarten, auch wenn das Effizienzkriterium der Heizung und der Betriebsführung gegeben sind.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen ermöglichen inzwischen eine Direktvermarktung des KWK-Stroms. Dadurch sind neue Anbieter von Betriebs- und Vertragsmodellen für eine Strom- und Wärmeversorgung am Markt entstanden, die alle die wirtschaftlichen Vorteile der KWK nutzen, aber in vielfältiger Weise von den klassischen Contractingmodellen abweichen. Auch die finanziellen Auswirkungen auf die Strom- und Wärmeverbraucher können um eine Größenordnung auseinander liegen. Aus der Sicht der Eigentümer bzw. der Nutzer werden nachfolgend eine sehr schlechte und eine sehr günstige Variante des BHKW-Einsatzes gegenüber gestellt.

Variante 1 – ungünstig für Eigentümer bzw. Nutzer einer Wohnanlage

Beim Kauf der einzelnen Wohneinheiten eines Mehrfamilienhauses erwirbt der Eigentümer wie üblich auch einen Teil am Gemeinschaftseigentum. Zum Gemeinschaftseigentum gehören in der Variante 1 aber **nicht** das BHKW und nicht die Kesselanlage, sondern nur die Räumlichkeiten dafür. Diese werden dann an einen Contractor vermietet, der auch der örtliche Stromversorger (Netzbetreiber) sein kann. Der Wärmepreis wird vom Contractor festgesetzt und liegt in der Regel über 10 Cent/kWh. Die Nutzer haben wie sonst auch die freie Wahl des Stromanbieters und zahlen die entsprechenden Strompreise. Die finanziellen Vorteile durch das BHKW hat ausschließlich der Contractor. Es gibt keine kostengerechte Umlage auf den Wärme- oder Strompreis. Der Gewinn bleibt ganz beim Contractor. Der Nutzer bzw. Eigentümer hat keinen Einfluss auf die Art der Wärmebereitstellung. Nur beim Strom hat er die freie Wahl des Stromanbieters.

Variante 2 – sehr günstig für Eigentümer bzw. Nutzer einer Wohnanlage

In dieser Variante gehören der Eigentümergemeinschaft oder einer dafür gegründeten Gesellschaft das BHKW und die Kesselanlage. Für den Betrieb der Anlage wird z. B. ein Heizungsbaubetrieb beauftragt, der auch die Wartung und Instandhaltung übernimmt. Er wird nach Aufwand bezahlt. Der BHKW-Strom wird den Nutzern der Wohnanlage zu einem Preis angeboten, der unter dem des örtlichen Stromversorgers liegt, damit möglichst viele sich für den BHKW-Strom-Anbieter entscheiden. Der »Wärmepreis« ergibt sich aus der Kostenumlage (VDI-Richtlinie 2077 Beiblatt 3.1), wobei die Erlöse aus dem Stromverkauf von den Kosten abgezogen werden. Dadurch ergeben sich Wärmekosten, die deutlich unter einer reinen Versorgung aus einem Heizkessel liegen. Die Rücklagenbildung für ein neues BHKW erfolgt wie für eine Kesselanlage. Die Vorteile der KWK kommen der Gemeinschaft zu Gute.

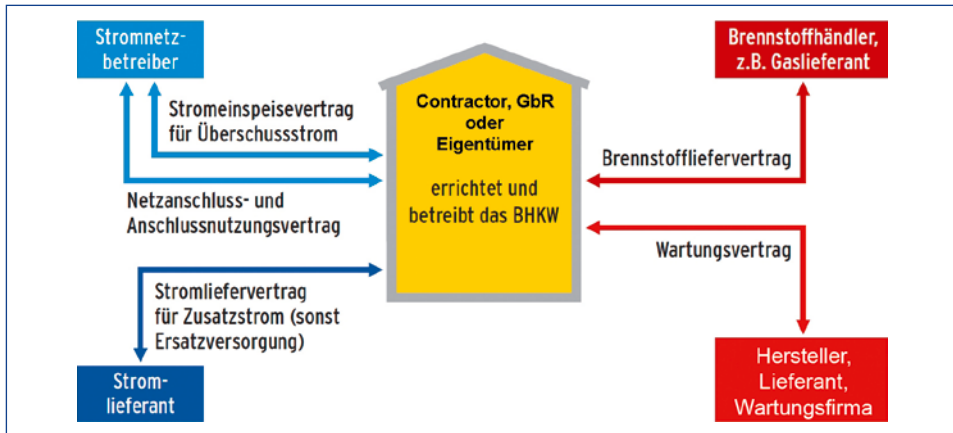
Zwischen den beiden privaten Varianten gibt es viele Zwischenlösungen, bei denen die Eigentümer bzw. die Nutzer oder der Contractor einen mehr oder weniger großen Vorteil aus dem Betrieb eines BHKW ziehen können.

Neben den Contractoren und den Kommunen werden in Zukunft noch weitere Akteure wie z. B. reine Stromhändler auf den Energiemärkten auftreten. Die Zusammenführung vieler KWK-Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk bietet auf den verschiedenen Strommärkten in Zukunft die Möglichkeit, wirtschaftliche Potenziale auszuschöpfen. Wie weit es für den BHKW-Betreiber interessant ist, sich in ein virtuelles Kraftwerk einbinden zu lassen, kommt auf den Einzelfall an (Kap. 6.3).

6.1 Eigenversorgung

Unabhängig davon, ob sich der Eigentümer, der Gewerbetreibende oder eine Nutzergemeinschaft selbst mit Strom und Wärme aus einem BHKW versorgt, müssen mindestens drei Verträge mit dem örtlichen Netzbetreiber geschlossen werden:

- ein Netzanschluss- und ein Anschlussnutzungsvertrag,
- ein Stromeinspeisevertrag sowie
- ggf. eine Vereinbarung über die Modalitäten der Zahlung des Zuschlags für den eigenverbrauchten, aber nicht eingespeisten KWK-Strom.



■ **Abb. 76:** Vertragliche Beziehungen für den Betrieb des BHKW

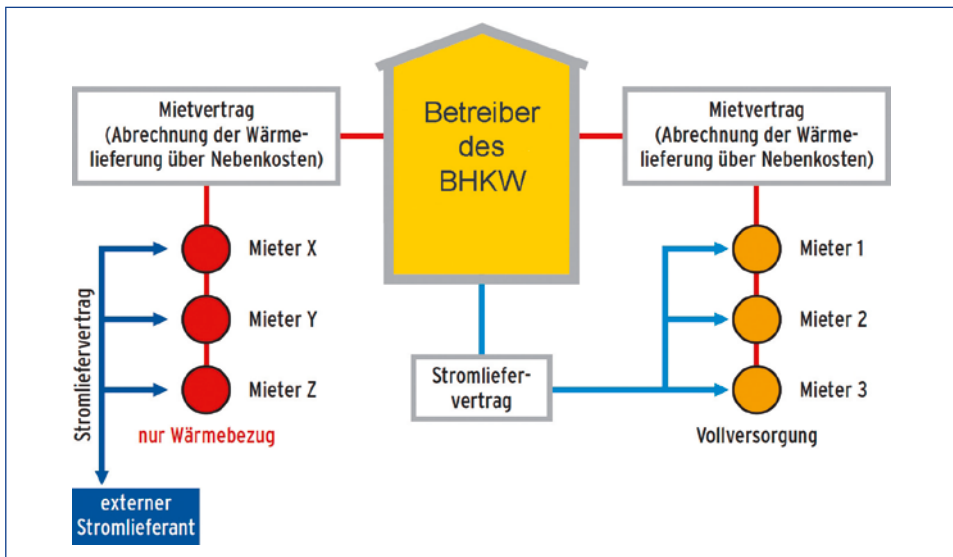
Außerdem muss der Anlagenbetreiber für Zusatzstrom aus dem öffentlichen Netz einen gesonderten Stromliefervertrag mit einem Stromversorger, z. B. mit einem Ökostromlieferanten, schließen. Um den KWK-Zuschlag für den eingespeisten und eigenverbrauchten Strom zu erhalten, beantragt der Anlagenbetreiber die Zulassung des BHKW beim BAFA (www.bafa.de) und führt den Nachweis des eingespeisten und eigenverbrauchten Stroms. Ein pauschalierter KWK-Zuschlag ist für BHKW bis 2 kW_{el} auch möglich.

6.1.1 Gewerbebetrieb, Eigentümer

Besonders gut eignen sich BHKW für Gewerbebetriebe wie Hotels, Gaststätten, Bäckereien oder für öffentliche Einrichtungen wie Schwimmbäder und Krankenhäuser. Das BHKW versorgt das Objekt ganzjährig mit Strom und Wärme. Wenn der Gewerbetreibende bzw. der Eigentümer sein selbst genutztes Objekt versorgt, sind die finanziellen und rechtlichen Bindungen durch die in Kap. 6.1 aufgeführten Verträge gegeben. Die wirtschaftlichen Vorteile kommen ganz dem Investor – also dem Gewerbetreibenden – bzw. dem Eigentümer zu Gute.

Ist dagegen der Eigentümer wie z. B. bei einem größeren Wohnobjekt nicht gleichzeitig der Nutzer, müssen mit den Mietern noch zusätzliche Vereinbarungen getroffen werden. Für die Versorgung der Wärmeabnehmer gilt der laufende Mietvertrag weiter. Die Wärmekosten verteilt der Eigentümer per Nebenkostenabrechnung auf seine Nutzer, in der Regel die Mieter. Dabei gelten die Heizkosten- und die Betriebskostenverordnung (VDI 2077). Grundsätzlich darf der Eigentümer nur die Brennstoffkosten zur Erzeugung der Wärme auf die Mieter umlegen. Eine Möglichkeit zu deren Ermittlung ist der thermische Wirkungsgrad, der sich aus den technischen Daten des BHKW ergibt. Diese Aufgabe übernimmt die Firma, die die Heizkostenabrechnung erstellt.

Bei der wirtschaftlich besonders interessanten Variante, dass die Nutzer/Mieter auch mit Strom aus dem BHKW versorgt werden, gilt noch zusätzlich: Die Mieter müssen einverstanden sein, dass der Hauseigentümer sie mit Strom aus der KWK-Anlage beliefert. Dafür sollte er mit jedem einzelnen Mieter einen Stromliefervertrag schließen. Der Mieter wird eher zustimmen, wenn der vereinbarte Strompreis günstiger ist als beim örtlichen Stromanbieter. Er muss immer die Möglichkeit haben, den Stromanbieter zu wechseln.



■ **Abb. 77:** Eigentümer versorgt Mieter mit Wärme und Strom

Die Mieter, die sich für die Versorgung des Eigentümers entscheiden, müssen ihre laufenden Stromlieferverträge mit ihren bisherigen Stromversorgern kündigen. Die Nutzung des Hausanschlusses durch diese Mieter ist beim örtlichen Netzbetreiber abzumelden. An dessen Stelle tritt der gemeinsame Netzanschluss für den Bezug von Zusatzstrom über einen einzigen abrechnungsrelevanten Zählpunkt (Saldierender Zweirichtungszähler oder kurz Summenzähler). Der Netzbetreiber muss diesen Zählpunkt für den Netzanschluss und die Abrechnung der Netzentgelte akzeptieren, selbst wenn nicht alle Mieter im Mehrfamilienhaus an der Eigenversorgung mit KWK-Strom teilnehmen.

Für die Mieter, die nicht an der Eigenversorgung mit KWK-Strom teilnehmen wollen, ändert sich nichts. Sie behalten ihren bisherigen externen Stromlieferanten. Ihr Verbrauch wird über ihren Zähler – als Unterzähler zum Summenzähler im Haus – durchgeleitet und bilanziell abgerechnet.

Der Eigentümer ist verpflichtet, die Aufnahme der Stromlieferung an seine Mieter der Bundesnetzagentur in Bonn anzuzeigen (sog. Anzeige der Energiebelieferung). Welche Nachweise der Eigentümer bei seiner Anzeige im Einzelnen erbringen muss, enthält das entsprechende Formblatt der Bundesnetzagentur [26].

6.1.2 Gemeinschaften

Wenn mehrere Eigentümer gemeinsam ihr Objekt mit Strom und Wärme versorgen, dann müssen auch die Verträge gemäß Kapitel 6.1 und die Zusatzvereinbarungen nach Kapitel 6.1.1 getroffen werden. Dies gilt auch, wenn ein Eigentümer seine Wohnung selbst bewohnt. Die Wohnungseigentümer können eine Gesellschaft wie z. B. eine Eigentümer-GbR oder eine Bürgergenossenschaft gründen. Da aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen ohnehin bereits eine »Gemeinschaft der Wohnungseigentümer« besteht, kann auch auf diese zurückgegriffen werden.

Bei größeren Wohnobjekten können die Nutzer/Mieter ihre Versorgung mit Wärme und Strom aus einem BHKW selbst organisieren. Sie betreiben mit Zustimmung der Eigentümer das BHKW gemeinsam. Mit dem Hauseigentümer wurde vereinbart, dass dieser das von ihm installierte BHKW der Mieter-GbR zur Nutzung überlässt. Die GbR tritt gegenüber dem Netzbetreiber als ein Anschlussnehmer auf. Die Verteilung und Abrechnung des Stroms aus dem BHKW und des Zusatzstroms regelt die GbR intern. Die Bundesnetzagentur hat festgestellt, dass solche Konstellationen vom Netzbetreiber anerkannt werden müssen. Somit erzeugt die GbR eigenen Strom und eigene Wärme.

Je nach Ausgestaltung des Mieter-GbR-Vertrags trägt die GbR die Brennstoffkosten und ist für die Instandhaltung und Wartung des BHKW verantwortlich. Ebenso steht ihr die Vergütung für den in das öffentliche Netz eingespeisten Überschussstrom sowie die Zuschläge nach dem neuen KWK-Gesetz für den eigenverbrauchten KWK-Strom zu. Für die GbR-Gründung genügt der Entschluss der Mieter, sich in Zukunft gemeinsam zu versorgen. Trotzdem empfiehlt es sich, in einer schriftlichen Vereinbarung die Eckpunkte der gemeinsamen Versorgung festzuhalten. Dazu gehören beispielsweise Regelungen

- zur Aufteilung der Kosten für die Nutzung des BHKW,
- zum Kauf des Brennstoffs,
- zur Wartung und Instandhaltung,
- zu den Einnahmen aus der Einspeisung des Überschussstroms
- zu den Zuschlägen für den eigenverbrauchten KWK-Strom sowie
- die rückerstattete Energiesteuer.

Weiter sollte vereinbart werden, wer nach außen für die GbR handelt und z. B. den Brennstoff einkauft. Haftungsrechtlich gilt bei der GbR, dass alle Mitglieder unbeschränkt und gesamtschuldnerisch für Verbindlichkeiten der GbR gegenüber Gläubigern haften. Es ist empfehlenswert, dass auch der oder die Eigentümer Mitglieder der Mieter-GbR werden. Dann ist die Anpassung der Mietverträge eine reine Formsache und der Abschluss der in Kap. 6.1 genannten Verträge wird durch die gemeinsame Interessenlage erleichtert.

Der Eigentümer, der in das BHKW investieren möchte, erhält von der Mieter-GbR ein Entgelt für die Nutzung des BHKW. Diese Bezahlung sollte sich im Sinne eines fairen Ausgleichs zwischen Investor und Nutzer an der Einspeisevergütung von ca. 10 Cent/kWh plus der Energiesteuerrückerstattung (0,55 Cent/kWh Brennstoff) orientieren.

6.2 Fremdversorgung (Contracting)

6.2.1 Contracting im Gewerbe

Bei größeren BHKW-Projekten kann anstelle einer Eigeninvestition auch ein Contractor beauftragt werden. Der Contractor errichtet und betreibt das BHKW. Der Contractor schließt mit dem Gewerbetreibenden einen Strom- und Wärmeliefervertrag. Vertragsgegenstand ist regelmäßig eine Vollversorgung des Kunden mit Strom und Wärme. Der Contractor schließt auch die Verträge mit dem örtlichen Netzbetreiber gemäß Kapitel 6.1, die Zulassung des BHKW beim BAFA und die sonstigen Rechtsfragen. Der Gewerbetreibende muss lediglich seinen bisherigen Stromliefervertrag kündigen. Gegebenenfalls bestehende Wärmelieferungsverträge sind ebenfalls zu kündigen, soweit kein Anschluss- und Benutzungszwang an die Fernwärmeversorgung

besteht. Im Vertrag mit dem Contractor werden der Strom- und Wärmepreis sowie die Lieferbedingungen vereinbart. Dieser Vertrag sollte vor allem folgende Punkte berücksichtigen:

- **Preisbestimmung:** Ist der angebotene Strom- und Wärmepreis wirtschaftlich im Vergleich zu einer Eigeninvestition? Gelten dieselben Preise und Bedingungen, wenn der Strom- oder Wärmebedarf des Gewerbetreibenden – z. B. konjunkturell bedingt – spürbar steigt oder sinkt? Ist eine Mindestabnahmeverpflichtung ausgeschlossen?
- **Preisanpassung:** Dient die – aufgrund der langen Vertragslaufzeit – notwendige Preisanpassungsklausel nur der Anpassung an die Kostenentwicklung des Contractors?
- **Laufzeit:** Nach den gesetzlichen Bestimmungen darf die Vertragslaufzeit für die Wärmelieferung maximal zehn Jahre betragen, wobei sich der Wärmeliefervertrag stillschweigend um jeweils fünf Jahre verlängert, wenn keine Seite ihn kündigt. Eine Laufzeit des Stromliefervertrages von mehr als zehn Jahren ist unangemessen und unwirksam. Laufzeiten zwischen fünf und zehn Jahren können im Einzelfall angemessen sein.
- **Eigentum am BHKW:** Errichtet der Contractor das BHKW auf dem Grundstück oder in den Räumlichkeiten des Gewerbetreibenden, so kann – und wird – in der Regel vereinbart, dass der Contractor Eigentümer des BHKW bleibt.
- **Leistungen des Contractors:** Sind wirklich alle Pflichten des Contractors im Zusammenhang mit Anschaffung, Errichtung und Betrieb des BHKW mit dem Strom- und Wärmepreis abgegolten? Wer trägt die Kosten der Messung sowie der Eichung und Instandhaltung der Zähler? Wer bezahlt den ggf. notwendigen Zusatzstrom bzw. die Ersatzwärme bei Ausfall/Wartung des BHKW? Garantiert der Contractor eine Mindestliefermenge für Strom und Wärme?
- **KWK-Vergütung:** Die KWK-Vergütung steht dem Contractor zu, da er das BHKW betreibt.

6.2.2 Contracting in der Wohnungswirtschaft

In der Wohnungswirtschaft wird ein Vertrag zwischen dem Contractor, der in das BHKW investiert und es betreibt sowie dem Eigentümer mit dem Ziel geschlossen, die Nutzer des Objektes mit Strom und Wärme zu versorgen. Im Vertrag sollten die in Kap. 6.2.1 erwähnten Punkte berücksichtigt werden. Auch in diesem Fall schließt der Contractor die Verträge mit dem örtlichen Netzbetreiber.

Der Hauseigentümer muss lediglich seinen bisherigen Stromliefervertrag kündigen. Entsprechendes gilt für die einzelnen Wohnungseigentümer. Gegebenenfalls bestehende Wärmelieferungsverträge sind ebenfalls zu kündigen, soweit kein Anschluss- und Benutzungszwang an die Fernwärmeversorgung besteht. An die Stelle des Eigentümers tritt der Contractor, der mit den Nutzern unmittelbar Strom- und Wärmelieferverträge abschließt, ohne dass der Eigentümer daran beteiligt ist.

Fällt der Contractor aus, muss der Vermieter nach der höchstrichterlichen Rechtsprechung jedoch für eine ununterbrochene Beheizung der Mietwohnungen sorgen. Anderenfalls ist der Mieter zur Mietminderung berechtigt. Es ist demnach keine rechtliche Gestaltung zulässig, in der der Vermieter vollständig von der mietvertraglichen Beheizungspflicht befreit wird. Eine entsprechende Pflicht des Vermieters zur Lieferung von Strom besteht dagegen nicht. Dafür hat der Mieter einen gesetzlichen Anspruch auf Stromlieferung durch den örtlichen Grundversorger. Es wird vom finanziellen Anreiz abhängen, ob sich der Mieter für die Stromlieferung durch den Contractor oder den örtlichen Stromversorger entscheidet.

6.3 Betriebskonzepte

6.3.1 Wärme- und Stromführung

Ein BHKW liefert Strom und Wärme immer gleichzeitig. Daher kann es nach dem Strom- oder dem Wärmebedarf eines Verbrauchers fahren. Man spricht im ersten Fall von strom-, im zweiten von einem wärmegeführten Betrieb. Durch den Einsatz eines Pufferspeichers kann die Erzeugung und der Verbrauch von Wärme zeitlich entzerrt und nach der Stromseite oder Wärmeseite verschoben werden.

Der Standardfall ist heute noch die Wärmeführung eines BHKW, weil auf diese Weise die Wärmenutzung ihr Maximum erreicht und sie von technischer Seite besonders einfach ist. Diese Betriebsweise ist im Wohnungsbau oder wohnähnlichen Objekten zweckmäßig und diese Art von Objekten bildet hinsichtlich des Energiebedarfs das größte Potenzial für BHKW. Das BHKW kann in solchen Fällen einfach wie ein mit Vorrang zu fahrender Heizkessel angesteuert werden.

Die reine Wärmeführung eines BHKW mit 100 %iger Netzeinspeisung ist aber kaum mehr wirtschaftlich darstellbar. Daher geht man aus wirtschaftlichen Gründen mehr und mehr zu einer stromorientierten Betriebsweise des BHKW über, um möglichst viel Strom selbst zu verbrauchen bzw. im Objekt zu vermarkten und möglichst wenig Strom ins Netz einzuspeisen. Voraussetzung für einen Betrieb nach dem Stromverbrauch ist ein Wärmespeicher (Pufferspeicher). Größere Anlagen können sogar zum stromseitigen Lastmanagement beitragen und die Wirtschaftlichkeit eines BHKW massiv erhöhen. Die Verluste des Pufferspeichers werden mehr als ausgeglichen.

6.3.2 Optimierung der Betriebsführung

Die Optimierung der Betriebsführung nutzen vor allem Contractoren und Anbieter von kompletten Betriebskonzepten (Beispiele in Kap. 6.3.3). Aber auch für alle anderen BHKW-Anwender ist die Optimierung und damit ein möglichst wirtschaftlicher Betrieb von Interesse. Um eine Optimierung zu finden, muss der BHKW-Anwender die schwierige Frage beantworten, zu welchen Tages- und Jahresstunden er wie viel Strombedarf mit BHKW-Strom abdeckt und insbesondere, welche Stromleistung er mit dem BHKW abfahren kann, um nicht nur Kilowattstunden, sondern auch Stromkosten effektiv und zuverlässig zu sparen. Das erfordert schon in der Planung eine Simulationsrechnung auf der Basis von Stundenwerten.

Ein weiteres Problem kommt von der rechtlichen Seite. Eigenstrom kann zwar problemlos vom Stromerzeuger selbst genutzt werden, aber die Lieferung an Mieter, also direkter Stromverkauf an Verbraucher, erfordert einen beachtlichen vertraglichen Aufwand und erfordert letztendlich auch die Zustimmung der Mieter. Dennoch haben in jüngster Zeit private Objektversorger und engagierte Wohnungseigentümer bewiesen, dass die Strom- und Wärmeversorgung aus BHKW rechtlich durch die Bundesnetzagentur abgesichert und auch wirtschaftlich ist. Der Einsatz von BHKW hat sich also gerade in einem der größten Wärmeverbrauchssektoren des Landes – dem Wohnungsbau und wohnähnlichen Nutzungen – als rechtlich abgesicherter, technisch einfacher, zum Schutz der Umwelt als hoch effektiver und zudem noch rentabler Weg für BHKW-Betreiber und Energienutzer erwiesen. Voraussetzung ist ein Grundkonsens der Partner, sich auf die Versorgung aus einem BHKW vertraglich zu verständigen. Erste

standardisierte Vertragsmodelle sind von Contractoren verfügbar [27, 28]. Auch die Eigenversorgung kann stromoptimiert betrieben werden.

Die optimierte Betriebsweise orientiert sich an den heute üblichen starren Strompreisen und den Einspeisevergütungen mit dem Ziel, einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb zu führen. Unter die starren Strompreise fallen auch die klassischen Hoch- und Niedertarife (HT/NT). Im Zuge der Energiewende wird es zu zeitlich variablen und kostengerechteren Strompreisen für den Verbrauch und die Einspeisung kommen [10–14]. Eine Wirtschaftlichkeitsprognose für ein BHKW wird dann sehr unsicher, weil weder der Preis noch die Dauer im Voraus bekannt sind. Allerdings wird sich durch die immer besseren Wind- und Strahlungsprognosen neben dem Lastprofil auch ein zeitliches Preisprofil herausbilden. Die momentanen Preise werden dem BHKW-Betreiber durch noch zu entwickelnde Informations- und Kommunikationssysteme (IKT) übermittelt. Der BHKW-Betrieb wird damit durch die heute schon verfügbaren Regel-, Steuer und Speichersysteme wirtschaftlich optimiert. Dies kann zusätzlich noch auf das Nutzerverhalten ausgedehnt werden. Denn es ist heute keineswegs utopisch, über das Internet mittels Smartphone oder Tablet Stromverbraucher auf Grund von Preissignalen zu- oder abzuschalten.

6.3.3 Beispiele

Betriebskonzepte für KWK werden von großen Stromversorgern oder Energieanbietern angeboten, die sich mit ebenfalls großen BHKW-Herstellern zusammengeschlossen haben. Über die Zusammenschaltung vieler BHKW zu einem virtuellen Kraftwerk nutzen sie neben einem preisgünstigen Einkauf der BHKW und des Erdgases die Vermarktungsmöglichkeiten des KWK-Stroms. Es werden sowohl Contracting-Modelle als auch Betriebskonzepte angeboten, die eine Eigenversorgung mit weitgehender Nutzung des KWK-Stroms für die Eigennutzung und andere Hausbewohner im Objekt vorsehen. Der BHKW-Anwender sollte vor einer Entscheidung die klassische Alternative Strombezug und Heizkessel an Hand verschiedener Angebote gegenrechnen.

Lichtblick – Das ZuhauseKraftwerk

Lichtblick und VW entwickelten seit Mitte 2009 fünf Jahre lang gemeinsam das sogenannte ZuhauseKraftwerk, ein Mini-BHKW mit 19 kW_{el} und 36 kW_{th}. VW kann grundsätzlich Stückzahlen in Millionenhöhe produzieren und Lichtblick als Strom- und Gasanbieter liefert das Knowhow für die Stromvermarktung. Das Konzept: Der Nutzer erwirbt das Mini-BHKW und kann dann je nach Kenntnissen und Eigeninitiative aus neun Service-Zusatzpaketen auswählen und einen für ihn optimierten Betrieb zusammenstellen:

- BHKW-Einbindung,
- Gaslieferung durch Lichtblick,
- Planung und Installation,
- Wartung,
- kaufmännische Abwicklung,
- Messstellenbetrieb,
- Fördermittel,
- Finanzierung,
- Strom für weitere Nutzer.

Das Mini-BHKW war besonders für Mehrfamilienhäuser, Industrie- und Gewerbebetriebe und öffentliche Gebäude geeignet, die einen Wärmebedarf von über 120 000 kWh/a und einen Gasanschluss haben. Die Investition von 56 700 Euro sollte sich nach rd. 5 Jahren amortisieren. Die detaillierte Vergleichsrechnung mit einer herkömmlichen Strom- und Wärmeversorgung ist in Kap. 5.4 dargestellt.

Ende Mai 2014 wurde verkündet, dass Lichtblick künftig keine BHKW von Volkswagen mehr anbietet. Grund waren wohl unterschiedliche Wirtschaftlichkeits- und Verkaufserwartungen der Partner. Bisher konnten etwa 1 500 Mini-Kraftwerke im Markt platziert werden [29]. Lichtblick wird weiterhin sein Schwarmkonzept für BHKW in Zusammenarbeit mit der Fa. Senertec anbieten. Senertec hat das VW-BHKW als größten »Dachs« in modifizierter Form in sein Programm aufgenommen.

RWE – Energiewende für Zuhause

Angespornt durch das anfänglich große Interesse am ZuhauseKraftwerk hat auch RWE Ende 2011 den Einstieg in den Contractingmarkt für Mikro-BHKW gewagt. Mit dem HomePower Mikro-KWK-System ist RWE eine Zusammenarbeit mit Vaillant Deutschland eingegangen. Das BHKW (4,7 kW_{el}, 12,5 kW_{th}) liefert Vaillant und RWE mit einer ControlBox, die das intelligente Energiemanagement für den Kunden übernimmt. Die Anlage wird nach dem Strom- und Wärmebedarf des Kunden gesteuert. Außerdem ist sie bereits dafür ausgelegt, künftig überschüssigen Ökostrom aus dem Netz in Form von Wärme zu speichern und zu nutzen. Stromspitzen, die nicht aus der Mikro-KWK-Anlage gedeckt werden können, werden durch den Bezug von Ökostrom ergänzt. Die Anlage eignet sich typischerweise für Kunden mit einem Wärmebedarf ab 60 000 kWh/a. Kunden erwerben die Anlage komplett.

Das Mikro-KWK-System sollte auch als Teil eines virtuellen Kraftwerks zu einer höheren Stabilität des Stromnetzes beitragen. Das BHKW schaltet sich bei einem Überangebot an regenerativem Strom ab und speichert den überschüssigen Strom mit Hilfe eines Ökoheizstabs in Form von Wärme. Auf diese Weise wird das Netz entlastet und ein Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien geleistet. Zudem kann Strom nach Bedarf erzeugt und ins Netz abgegeben werden. Die Investition in Höhe von ca. 40 000 Euro beinhaltet ein Mikro-KWK-Modul, einen Multifunktionsspeicher für Heizung und Warmwasser, einen Spitzenlast-Brennwertkessel sowie die komplette Installation. Der Kunde übergibt den Betrieb des Systems an RWE. Der Kunde erhält im Gegenzug Strom und Wärme zu attraktiven Konditionen. Während der Vertragslaufzeit von 10 Jahren werden die Kosten für Wartung, Service und die Instandhaltung aller Anlagenkomponenten übernommen.

Im April 2014 wurde auch diese Kooperation beendet. RWE will sich künftig auf das erfolgreiche Contracting im größeren Leistungsbereich konzentrieren. Die Fortführung des Mikro-KWK-Konzepts erfolgt mit dem »Dachs« der Fa. Senertec.

RWE – Siemens – Virtuelles Kraftwerk

In Kooperation mit Siemens betreibt RWE seit 2008 ein Pilotprojekt auf der Basis eines Virtuellen Kraftwerks, das aus Windenergieanlagen, BHKW, Photovoltaikanlagen, Kleinwasserkraftwerken und Biogasanlagen sowie auch von abschaltbaren Lasten von mindestens 300 kW_{el} getragen wird. Die einzelnen Lasten werden gebündelt und an der Strombörse EEX bzw. am Regenergiemarkt vermarktet. In die Vermarktung fließen auch immer mehr elektrische Verbrauchersysteme wie Wärmepumpen ein, die als abschaltbare Lasten Bestandteil des virtuellen Kraftwerks sind.

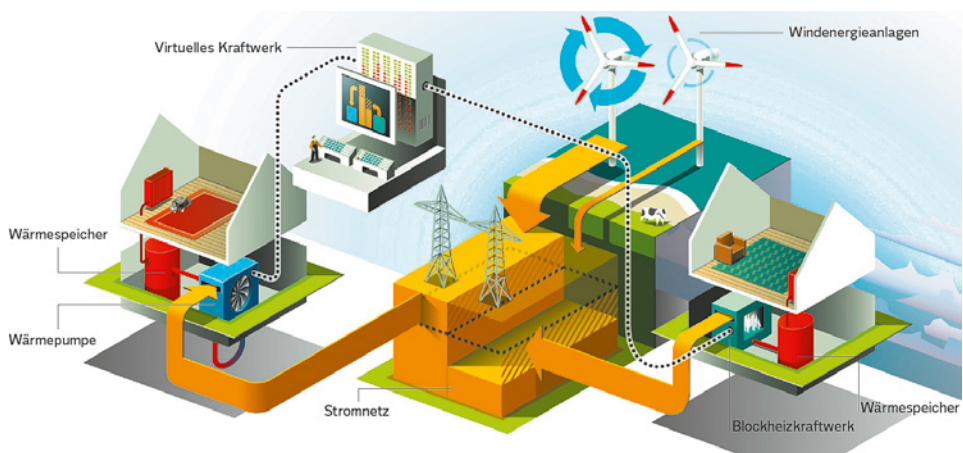
Seit Anfang Februar 2012 wird der Strom aus Anlagen dieses virtuellen Kraftwerks von RWE im Rahmen der Direktvermarktung von EEG-Anlagen vermarktet. Grundlage für dieses Produkt ist die Novellierung des EEG. Das seit dem 1. Januar 2012 darin geregelte Marktprämienmodell schafft einen Anreiz, Strom aus EEG-Anlagen direkt an den Energiemärkten zu verkaufen. Ziel der koordinierten Nutzung von dezentralen Erzeugungsanlagen ist dabei neben den wirtschaftlichen Vorteilen vor allem ein Beitrag zur besseren Marktintegration von dezentralen Erzeugungsanlagen.

Das virtuelle Kraftwerk stellt auch Systemdienstleistungen im Übertragungsnetz bereit. Dazu zählt z.B. die Regelleistung im Bereich der sogenannten Minutenreserve. Dabei aggregiert das virtuelle Kraftwerk elektrische Leistung aus einer Vielzahl von Anlagen und stellt diese Leistungsvorhaltung dem Übertragungsnetzbetreiber zur Verfügung. Im Abruffall steuert das virtuelle Kraftwerk dann den sofortigen Einsatz der angeschlossenen Anlagen, so dass ein Beitrag zur Netzstabilität geleistet wird. Erfahrungsberichte oder die Konditionen für die Teilnahme am virtuellen Kraftwerk liegen nicht vor.

Vattenfall – Virtuelles Kraftwerk

Das Energieversorgungsunternehmen Vattenfall betreibt ein virtuelles Kraftwerk, das eine bessere Integration erneuerbarer Energien in die Energieversorgung über den Weg der Speicherung und der Steuerbarkeit erlaubt. Die Speicherung von regenerativ erzeugter Energie erfolgt in erster Linie in Form von Wärme. Im Frühjahr 2013 sind rund 150 000 Wohneinheiten an das Virtuelle Kraftwerk angeschlossen. Das virtuelle Kraftwerk hat eine Kapazität für bis zu 25 000 dezentralen Versorgungseinheiten (Abb. 78).

Über eine Wärmeleitwarte in Berlin werden die einzelnen Systeme des virtuellen Kraftwerks durch das von Vattenfall entwickelte Standard VHP-Ready-System gesteuert. Es werden aber auch »nicht-VHP-Ready«-Anlagen integriert. Hinsichtlich der Anlagengröße nimmt Vattenfall keine Beschränkung vor. Größere Einheiten im MW-Bereich werden genauso integriert wie kleine BHKW und Wärmepumpen, wobei wegen der Wirtschaftlichkeit eher Anlagen ab 100 kW_{el} interessant sind.



■ **Abb. 78:** Im Virtuellen Kraftwerk werden dezentrale Anlagen wie BHKW und Wärmepumpen ins Stromnetz über eine intelligente Steuerung eingebunden, um die schwankende Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien auszugleichen.

Die Integration von BHKW in das Virtuelle Kraftwerk ist auch möglich, wenn die Anlagen nicht von Vattenfall und nicht in Hamburg oder Berlin betrieben werden. Dann bleibt der Anlageneigentümer weiterhin Betreiber und Vattenfall kümmert sich ausschließlich um die Strom- und auf Wunsch auch um die Regelleistungsvermarktung.

Erfolgt die Wärmeversorgung aus einem BHKW von Vattenfall, so kann der Kunde entscheiden, ob er neben der Wärme auch den günstigen und lokal erzeugten Strom aus dem BHKW abnehmen möchte. Durch das Entfallen der üblichen Strombestandteile, wie z. B. Stromsteuer und Nutzungsentgelte des örtlichen Netzbetreibers, kann dieser günstiger von Vattenfall angeboten werden. Alternativ kann Vattenfall den Strom vermarkten und darüber einen Vorteil beim Wärmepreis anbieten.

Außer den dargestellten Betriebskonzepten zum koordinierten Betrieb von Erzeugungs- und Verbrauchssystemen gibt es noch viele weitere Aktivitäten von regionalen Stadtwerken, privaten Anbietern von virtuellen Kraftwerken und Stromhändlern [8, 25, 28]. Sie alle bieten dem BHKW-Betreiber höhere Erlöse als die Netzeinspeisung, die durch den Baseload-Preis an der Strombörse EEX gesetzlich geregelt ist (Abb. 13).

6.4 Vermarktungsmodelle

Die Betriebskonzepte zielen darauf ab, möglichst viel KWK-Strom zu erzeugen. In einem zweiten Schritt muss dieser Strom auch vermarktet werden und zwar mit möglichst hohen Erlösen, um die Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Dafür bieten sich für einen KWK-Betreiber in aufsteigender Wertigkeit an:

- Netzeinspeisung nach dem KWK-Gesetz oder dem EEG,
- Stromabgabe an einen Fremdversorger,
- Teilnahme an einem virtuellen Kraftwerk,
- Verkauf am Regelleistungsmarkt,
- Stromverkauf an Dritte außerhalb des Objektes nach dem KWK-Gesetz,
- Stromverkauf an Nutzer des Objekts, wo die KWK-Anlage steht,
- Deckung des Strom-Eigenbedarfs.

6.4.1 Netzeinspeisung

Die Netzeinspeisung nach dem KWK-Gesetz ist die technisch einfachste und am besten kalkulierbare Vergütung für den KWK-Strom. Die Vergütungen aus Zuschlagszahlungen (Abb. 12) und »üblichem Preis« (Abb. 13) liegen je nach Anlagengröße zwischen 6 und 9 Cent/kWh. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bei kleinen BHKW kaum darstellbar (Kap. 5.4.1), sehr wohl jedoch ab einer BHKW-Größe von ca. 100 kW.

Die Netzeinspeisung nach dem EEG z. B. für Holzvergaser-BHKW oder Biogasanlagen richten sich nach festen, für 20 Jahre garantierten Vergütungssätzen gemäß Abb. 14. In den meisten Fällen kann trotz der Einschränkungen seit 2014 ein wirtschaftlicher Betrieb prognostiziert werden.

Das EEG kennt im Gegensatz zum KWK-Gesetz den Begriff der Direktvermarktung. An Stelle der festen Vergütungen erhält der Biogas-Anlagenbetreiber eine Markt-, Management- und

eine Flexibilitätsprämie. Mit der Direktvermarktung kann man einen um 1 bis 3 Cent/kWh_{el} höheren Marktpreis als bei den festen Vergütungssätzen erzielen. Wem der Aufwand für die Direktvermarktung zu hoch ist, kann sich auch an einen Stromhändler wenden, der einen festen Aufschlag von 1 Cent/kWh_{el} auf die Einspeisevergütung gewährt. Bei KWK-Anlagen bezahlt der Stromhändler an Stelle des »üblichen Preises« einen um etwa 1 Cent/kWh_{el} höheren Preis. Der KWK-Zuschlag und der Preis für die vermiedene Netznutzung bleiben gleich [8].

6.4.2 Stromabgabe an einen Fremdversorger (Contractor)

Ein Contractor wird hinzu gezogen, wenn der Aufwand zu hoch und die Fachkenntnisse rund um die KWK nicht vorhanden sind. Der Contractor investiert nur in eine KWK-Anlage, wenn er auch deren Betrieb übernehmen kann. Er wird alle Möglichkeiten ausschöpfen, den Strom möglichst für sich gewinnbringend zu vermarkten. Selten wird er über seine Stromvermarktung sprechen. Wie weit der Strom- und Wärmekunde an den wirtschaftlichen Vorteilen des Contractors beteiligt wird, hängt natürlich im Einzelfall von den vertraglichen Bedingungen ab. Die riesige Spanne von möglichen Strom- und/oder Wärmepreisen, die ein Contractor seinen Abnehmern anbieten kann, ist zu Beginn des Kapitels 6 dargestellt.

6.4.3 Teilnahme an einem virtuellen Kraftwerk

In Kapitel 6.3.3 sind in den Beispielen Stromversorger oder Energieanbieter genannt, die als Basis ihres Geschäftes ein virtuelles Kraftwerk betreiben und den Strom vermarkten. Die KWK-Anlage wird ferngesteuert und im Gegenzug erhält der Kunde ein Angebot für die Strom- und/oder Wärmeversorgung, die günstiger ist als eine Netzeinspeisung ist. Damit partizipiert der Kunde an den besseren Vermarktungsmöglichkeiten des KWK-Stroms aus einem virtuellen Kraftwerk, ohne sich mit den komplizierten Vorgängen an der EEX-Strombörse und dem Regelleistungsmarkt beschäftigen zu müssen.

Neben den genannten Betriebskonzepten der großen Energieversorger und Contractoren gibt es auch Betreiber, die einzelne KWK-Anlagen ab einer Größe von z. B. 200 kW_{el} in ihr virtuelles Kraftwerk aufnehmen. Bedingung ist die Möglichkeit, die Anlage fernzusteuern. Bei Biogasanlagen werden die höheren Erlöse durch die Direktvermarktung gegenüber den festen Einspeisevergütungen genutzt. Wie viel davon beim KWK-Anlagenbetreiber als finanzieller Vorteil ankommt, muss im Einzelfall geprüft werden [25].

6.4.4 Verkauf am Regelleistungsmarkt

Lastschwankungen im Stromnetz werden durch die Regelernergie – auch Regelleistung – ausgeglichen. Die erforderliche Regelernergie ist durch den Ausbau der erneuerbaren Energien immer größer geworden. Heute liegt sie bei 4,5 bis 6 GW. KWK-Anlagen sind geeignet, die »Minutenreserve« der Regelernergie bereitzustellen. Wird Regelernergie angefordert, spricht man von positiver Regelernergie. Der Ausgleich von erhöhtem Angebot oder zurückgehendem Stromverbrauch erfordert eine negative Regelernergie. Last muss aus dem Netz genommen werden.

Die geforderte Kapazität an Regelernergie von 4,5 bis 6 GW wird von den vier Übertragungsnetzbetreibern (ÜBN), die für die Netzfrequenzhaltung und die Lieferung der Regelernergie zuständig sind, am Regelernergiemarkt öffentlich über eine Internetplattform ausgeschrieben.

Die Minutenreserve wird werktäglich ausgeschrieben. Den Großteil der Regelernergie stellen die großen ÜBN über oftmals angeschlossene Stromkonzerne selbst bereit. Den Betreibern von kleineren KWK-Anlagen kommt jedoch eine größere Bedeutung zu. Momentan greifen die ÜBN in der für KWK-Anlagen interessanten Minutenreserve auf 36 zugelassene Lieferanten von Regelernergie zurück.

Allein für die Bereitschaft, im Bedarfsfall einzuspringen, bekommen die Anlagenbetreiber eine Vergütung (Bereitschaftsvergütung) – den sogenannten Leistungspreis. Zum tatsächlichen Einsatz kommen die Anlagen nur selten. Wird die Regelernergie doch einmal abgerufen, bekommt der Betreiber einen zusätzlichen Arbeitspreis für die Regelernergie. Die erzielten Arbeitspreise auf dem Regelergiemarkt schwanken sehr stark, sind aber im Allgemeinen vorteilhaft für die Anlagenbetreiber, da sie für gewöhnlich um ein vielfaches über dem Preis für Normalstrom an der EEX-Börse und um das Doppelte über der EEG-Einspeisevergütung liegen.

Für die Teilnahme am Regelergiemarkt sind erhebliche Markteintrittshürden zu überwinden. Zunächst verpflichtet sich der Betreiber, seinen Strom im Rahmen der Direktvermarktung abzusetzen. Er muss an der Strombörse (EPEX) zugelassen sein und er muss einen eigenen Bilanzkreis managen und täglich Einspeiseprognosen seiner Anlage für den nächsten Tag erstellen. Der Anlagenbetreiber kann aber auch einen Direktvermarkter beauftragen, der sämtliche administrative Aufgaben übernimmt.

Die wesentlichste Hürde für die Teilnahme am Regelergiemarkt stellt die Mindestleistung von 5 MW für die Minutenreserve dar. Es besteht jedoch die Möglichkeit, sich einem virtuellen Kraftwerke anzuschließen. Viele kleine aber auch große Stromerzeuger haben zusammen mehr als 5 MW. Dann können sie als großes »Kraftwerk« Regelernergie anbieten.

6.4.5 Stromverkauf an Dritte

Außer der gesetzlich festgelegten Einspeisevergütung (»üblicher Preis«) ist im § 4 (3) des KWK-Gesetzes auch der Stromverkauf an Dritte vorgesehen:

»Weist der Betreiber der KWK-Anlage dem Netzbetreiber einen Dritten nach, der bereit ist, den eingespeisten KWK-Strom zu kaufen, ist der Netzbetreiber verpflichtet, den KWK-Strom vom Betreiber der KWK-Anlage zu dem vom Dritten angebotenen Strompreis abzunehmen. Der Dritte ist verpflichtet, den KWK-Strom zum Preis seines Angebotes an den Betreiber der KWK-Anlage vom Netzbetreiber abzunehmen.«

Die Interessenslage des BHKW-Betreibers und des über das öffentliche Netz verbundene Dritten ist klar: Der Dritte will einen niedrigeren Strompreis und der BHKW-Betreiber will mehr als bei einer Netzeinspeisung Erlösen. Der BHKW-Betreiber und sein Freund (Dritter) werden sich z. B. bei einem Preis von 7 Cent/kWh handelseinig.

Der BHKW-Betreiber bekommt die 7 Cent/kWh plus den KWK-Zuschlag von 5,3 Cent/kWh plus die gesetzlich nicht garantierte vermiedene Netznutzung von ca. 0,3 Cent/kWh. Macht zusammen 12,6 Cent/kWh. Das ist um ca. 4 Cent/kWh mehr als er für die Netzeinspeisung bekommen würde.

Der Freund als Endverbraucher muss aber außer dem Preis von 7 Cent/kWh noch die Netznutzung (7 Cent/kWh), die Konzessionsabgabe (2 Cent/kWh) und die Umlagen (7 Cent/kWh)

bezahlen. Macht zusammen netto 23 Cent/kWh. Das sind kaum 2 Cent/kWh weniger als bei einem günstigen Stromanbieter.

Obwohl in diesem Beispiel der BHKW-Betreiber und der Freund einen wirtschaftlichen Vorteil haben, sind die technischen und finanziellen Hürden, die genommen werden müssen enorm hoch. Der Freund, welcher den Strom aufnehmen möchte, muss seine Strombezüge und -einspeisungen über einen Bilanzkreis abrechnen. Hierfür müssen vorab (viertelstündliche) Bezugsfahrpläne erstellt werden. Bei Haushaltsverbrauchern genügen evtl. auch die minuten-genauen Lastprofile nach VDI 4655. Dennoch bedeutet dies sowohl einen mess- und regelungstechnischen als auch einen administrativen Aufwand, der meist nur von Stromhändlern, Stromanbietern oder größeren Endverbrauchern realisiert werden kann.

Wegen der schmalen Gewinne beim Stromverkauf an Dritte, machen sich manche »Dritte« selbst zum Eigenstromversorger. Statt den Strom zu einem festen Preis je kWh vom Eigentümer des BHKW zu kaufen, lassen sie ihren Strom im Auftrag erzeugen und kaufen nur die Dienstleistung »Energieumwandlung« oder erwerben selbst die Erzeugungsanlage. Diese Modelle nennt man »Lohnverstromung« oder »Erzeuger-GbR«. Inzwischen haben sich Dienstleister auf die Abwicklung ganzer Stromvermarktungsprojekte, der Ausarbeitung von Stromlieferverträgen oder der Gründung einer GbR oder Bürgerenergiegenossenschaft spezialisiert [8, 28, 29].

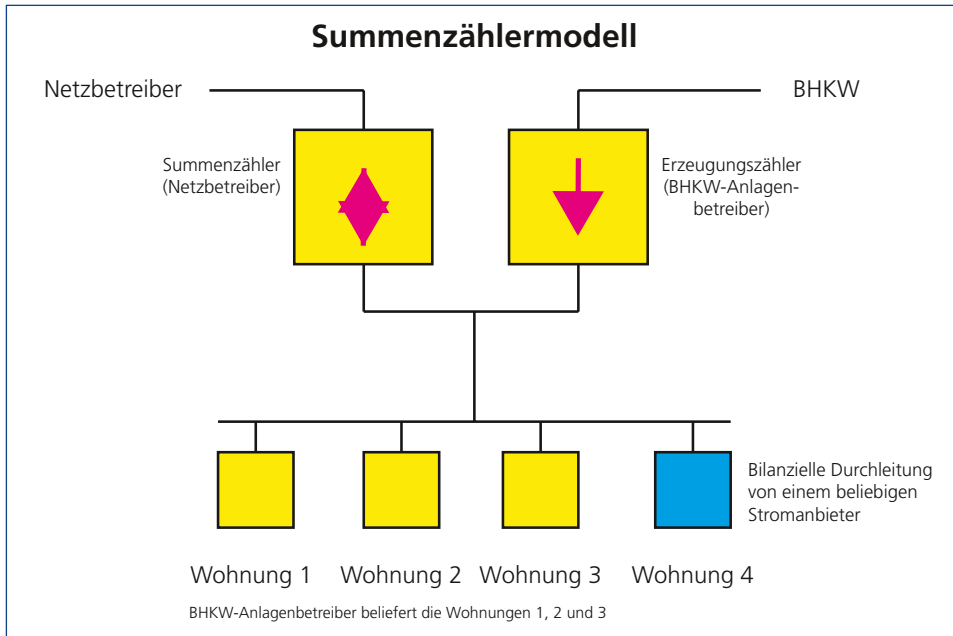
Bei der Lohnverstromung vereinbaren die Partner, welche Dienstleistungen im »Lohn« des BHKW-Betreibers enthalten sind. Als günstig hat sich erwiesen, wenn der BHKW-Betreiber mit der Beschaffung des Gases, des Zusatz- und Reservestroms sowie mit der Überwachung, Wartung und Betreuung des BHKW beauftragt wird.

Bei Großverbrauchern der energieintensiven Branchen ist es auch üblich einfach ein Kraftwerk zu mieten. Dadurch fällt der Betrieb unter das Eigenstrom-Privileg und es fällt nur die Hälfte der EEG-Umlage an.

Das GbR-Modell (Gesellschaft bürgerlichen Rechts) eignet sich vor allem bei Wohnungseigentümergeinschaften. Die Eigentümer schließen sich zu einer Betreibergesellschaft zusammen und beziehen den zusammen erzeugten Strom. Je nach Vertragsgestaltung dieser Verträge können auch Mieter in die GbR aufgenommen werden. Außer einer GbR mit Selbstversorgung der einzelnen Gesellschafter kommen auch andere Gesellschaftsformen wie die GmbH in Kombination mit der Lohnverstromung in Betracht, damit eine geringere EEG-umlagepflichtige Lieferung von Strom durch die GmbH an ihre Gesellschafter oder die Mieter entsteht.

6.4.6 Stromverkauf im »Objekt« aus einer Kundenanlage

Die Stromvermarktung im Objekt mit gleichzeitiger Wärmelieferung gemäß Abb. 78 ergibt für die Beteiligten eine besonders wirtschaftliche Lösung. Für Strom nach dem Summenzähler in der eigenen Kundenanlage fallen keine Kosten für die Nutzung des öffentlichen Netzes, keine Stromsteuer und wenn, nur geringe oder gar keine Umlagen an. Aus der eigenen Kundenanlage können auch Letztverbraucher versorgt werden, die nicht in dem Gebäude mit der Erzeugungsanlage wohnen, sondern wie Nachbarn über ein eigenes Erdkabel angeschlossen sind. Erst wenn öffentlicher Grund überquert wird, ist eine Abstimmung mit der Stadt oder der Gemeinde erforderlich.



■ **Abb. 79:** Summenzählermodell

Die Kundenanlage des BHKW-Betreibers kann sich unter Ausschluss des örtlichen Netzbetreibers über mehrere Gebäude, ganze Siedlungs- und Industriegebiete mit eigener Hochspannungsleitung erstrecken, wie die Bundesnetzagentur feststellte (Az. BK6-10-208). Die Stromvermarktung erfolgt über einen Summenzähler, der Bezug aus und Einspeisung ins öffentliche Netz ermittelt. Mit einem weiteren Zähler wird der BHKW-Strom gemessen. Er stellt den größten Teil des verkauften Stroms dar. Der Stromverbrauch der einzelnen Abnehmer wird über Unterzähler abgerechnet (Abb. 79). Für Verbraucher, die keinen BHKW-Strom beziehen möchten, wird der Strom aus dem Netz ohne extra Leitung bilanziell durchgeleitet.

Diese Art der Abrechnung mit einem Summenzähler und mehreren Unterzähler wurde in einem jahrelangen Prozess erstritten. Heute ist diese Lösung weitgehend standardisiert, aber sie kommt nur sehr selten zum Einsatz, obwohl laut Energiewirtschaftsgesetz (§ 20 Abs. 1d) darauf ein Rechtsanspruch besteht.

Aus der Sicht eines Stromversorgers ist es wesentlich einträglicher z. B. 12 Haushaltskunden in einem Objekt zu versorgen als nur die Kundenanlage des BHKW-Betreibers, der einen Großteil des Stroms selbst erzeugt und verkauft.

6.4.7 Deckung des Strom-Eigenbedarfs

Wie im vorigen Kapitel wird nicht der gesamte BHKW-Strom ins Netz eingespeist, sondern nur der, der nicht selbst verbraucht wird. Der Eigenbedarf ergibt sich aus Abb. 79 als Differenz zwischen Erzeugung und Einspeisung. Der Wert des Strom-Eigenbedarfs richtet sich nach dem Strompreis des BHKW-Betreibers, den er zahlen muss, wenn er den Strom regulär bezieht. Der KWZ-Zuschlag wird auch für den Eigenbedarf gezahlt.

6.5 Ausblick

6.5.1 Zukünftiger Strom- und Wärmemarkt

Der Umbruch in der Energiewirtschaft, was die Strom- und Wärmeversorgung betrifft, wird mit der »Energiewende« nur unzureichend gekennzeichnet. Sie zielt in erster Linie auf die Art der Versorgung, nämlich »regenerativ« ab. Ebenso wichtig sind aber auch der Verbrauch und die Möglichkeiten ihn durch Sparmaßnahmen zu senken. Nicht zuletzt muss auch ein Konsens zwischen Ökonomie und einer nachhaltigen Energieversorgung gefunden werden. Folgende Entwicklungen zeichnen sich ab:

Wärme

- der Wärmebedarf von neuen Gebäuden wird weiter sinken und gefördert werden,
- Bestandsgebäude werden zunehmend energetisch saniert und gefördert,
- Wärmespeicher erhöhen nicht nur bei der KWK die Möglichkeiten einer effizienteren Versorgung,
- Übergang zu regenerativen Systemen.

Strom

- Strom selbst und regenerativ zu erzeugen wird immer attraktiver,
- die Hemmnisse, den eigenen Strom zu vermarkten nehmen ab,
- die Elektromobilität und Wärmepumpen werden als zusätzliche Stromverbraucher dazukommen,
- variable Strompreise und Einspeisevergütungen werden Verbrauch und Erzeugung flexibler machen.

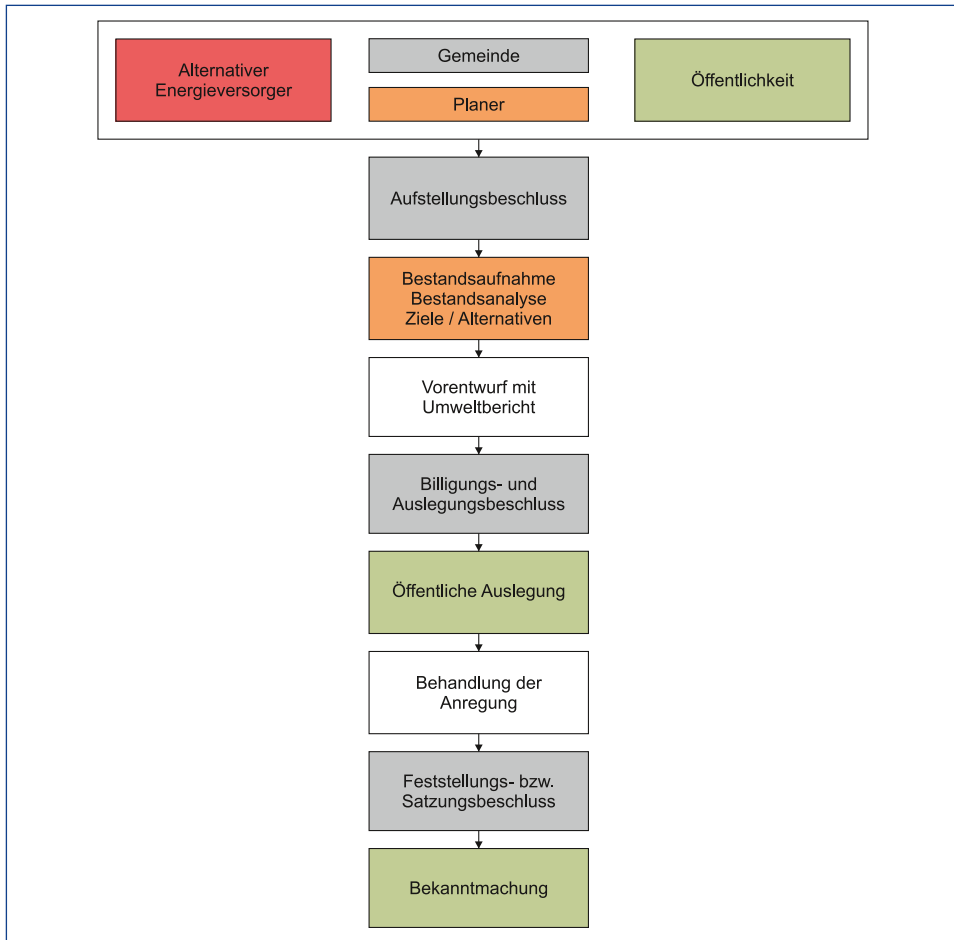
Strom/Wärme

- durch ein dezentrales Energiemanagementsystem wachsen der Strom- und Wärmeverbrauch immer mehr zusammen und werden insgesamt effizienter [30],
- Strom- und Wärmespeicher erlauben den Verbrauch und die Erzeugung besser aufeinander abzustimmen und hinsichtlich variabler Preise zu optimieren.

6.5.2 Rolle der Kommunen

Die KWK kann aus technischer Sicht auch in Zukunft bestens auf die genannten Veränderungen auf dem Strom- und Wärmemarkt angepasst werden. Allerdings müssen die bisherigen zentralen Organisationsformen der Stromerzeugung dem Angebot der regenerativen und dezentralen Energie angepasst werden. Dies führt unweigerlich zu den vor Ort betroffenen Bürgern, ihren politischen Vertretungen, den kommunalen Verwaltungen und den evtl. vorhandenen Gemeinde- und Stadtwerken. Sie zusammen müssen die Aufgabe einer zukünftigen 100%igen regenerativen Strom- und Wärmeversorgung bewältigen, die gemeinhin als Energiewende bezeichnet wird.

Das Zukunftsprojekt Energiewende ging vom Bürger aus. Seit der Jahrtausendwende haben inzwischen bald 2 Mio. Menschen, Mittelständler und Stadtwerke in EEG- und effiziente KWK-Anlagen sowie in den Wärme- und Umweltschutz investiert. Trotz der bisher erreichten



■ **Abb. 80:** Ablaufschema einer alternativen Strom- und Wärmeversorgung

Erfolge auf dem Stromsektor ist die Energiewende auf dem Wärmesektor noch lange nicht vollzogen. Auf dem Gebiet der KWK steckt sie sogar noch in den Kinderschuhen.

Die Kommunen können bereits bei der Bauleitplanung einen großen Einfluss auf die Strom- und Wärmeversorgung eines Neubaugebietes nehmen. Wieweit sie diese Möglichkeit im Sinne einer kostengünstigen und nachhaltigen Versorgung des Bürgers unterstützen oder sich aktiv einbringen, hängt weitgehend vom persönlichen Engagement der Beteiligten ab.

In zunehmenden Maß entwickeln Kommunen u. a. KWK-Projekte mit oder ohne Nahwärme und beteiligen die Bürger, um die regionale Wirtschaft zu stärken und den Bürgern vor Ort eine preisgünstige und nachhaltige Strom- und Wärmeversorgung zu bieten. Die meisten Kommunen bringen dieses Engagement aber nicht auf und stellen wie üblich Strom vom örtlichen Netzbetreiber und wenn vorhanden evtl. einen Erdgasanschluss zur Verfügung.

Dieser Bestandteil der »Energie-Daseinsvorsorge« ist aber nicht zeitgemäß und nicht im Sinne eines aufgeschlossenen Energie-Bürgers, der nicht nur Energie verbraucht (Minus-Energie-

Bürger) sondern auch Energie erzeugt (Plus-Energie-Bürger), also nach Kap. 1.2.2 zu einem Prosumer wird. Es erfordert viel Engagement der Kommunen und des Planers, um den Wünschen dieser Bürger nach energetischer Unabhängigkeit gerecht zu werden und den verwaltungstechnischen Prozess vom Flächennutzungsplan bis zur Bekanntmachung der Bauleitplanung zu unterbrechen und eine kostengünstigere Strom- und Wärmeversorgung unter Bürgerbeteiligung zu schaffen. Ein mögliches Ablaufschema ist in der Abb. 80 dargestellt.

Vorbildhaft und vielfach prämiert sind Bioenergiedörfer wie z.B. Wettesingen, Furth oder Westendorf. Erfolgversprechend ist auch die Gründung von Energiegenossenschaften, die Energieprojekte vor Ort umsetzen und auch deren Anlagenbetrieb übernehmen. Ende 2013 gab es bereits 888 Energiegenossenschaften mit einem Kapital von über 1 Mrd. Euro.

Als Beispiel für eine Bürgerbeteiligung soll die als »Energie-Kommune« ausgezeichnete Stadt Jena genannt werden. Die Stadt Jena hat sich mit den Bürgern und den umliegenden Gemeinden entschlossen, die regenerative Energie-Zukunft gemeinsam zu gestalten. Über eine Energiegenossenschaft können sich die Bürger auch an den Jenaer Stadtwerken beteiligen. Sie können sich für regenerative Energieprojekte einsetzen und auf die Ausrichtung der Stadtwerkspolitik Einfluss nehmen, um die Energiewende vor Ort zu gestalten.

Die Bürgerbeteiligung wird in Zukunft der Knackpunkt bei der Genehmigung von Großprojekten sein. Die Kommunen werden sich nicht aus ihrer Verantwortung gegenüber dem Bürger stehlen können. Sie müssen sich vielmehr für eine nachhaltige Strom- und Wärmeversorgung in Bürgerhand engagieren. Für die Aufteilung der finanziellen Nutzen und Lasten zwischen Bürgern, Kommune und Versorgern muss im Einzelfall eine partnerschaftliche und faire Lösung gefunden werden. Der mündige Bürger ist heute bereit sich auch finanziell für lokale Energieprojekte zu engagieren, wenn sich auch für ihn ein Vorteil ergibt.

Eine beispielhafte Organisationsform für eine BHKW-Nahwärme ist in der Abb. 81 dargestellt, bei der die Stadtwerke und die Bürgergenossenschaft einen Anteil von je 35 % und die Kommunen je 10 % übernehmen. Bei kleineren Projekten kann auch die Bürgergenossenschaft die Geschäftsführung übernehmen. Dann ist auch eine stärkere Beteiligung der Bürger möglich. Die großen Player auf den Energiemärkten verlieren mit ihren Großprojekten dagegen zunehmend das Vertrauen der Bürger.

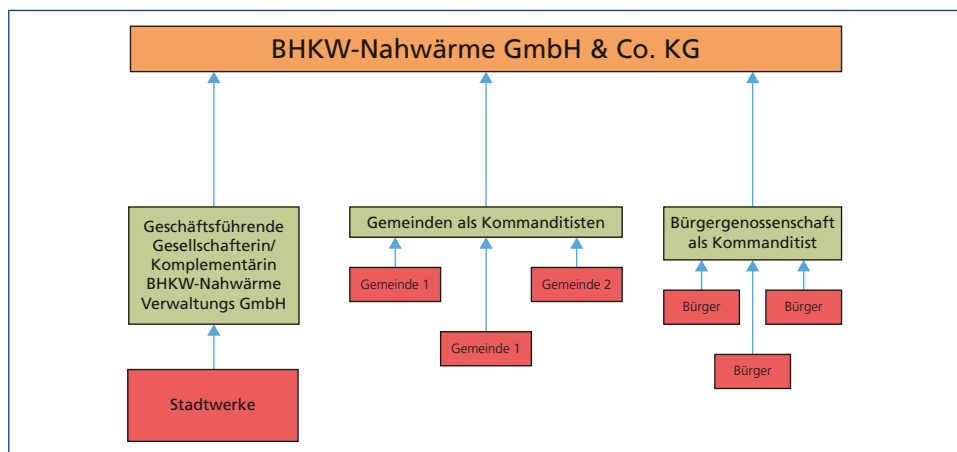


Abb. 81: Modell für eine Bürgerbeteiligung

7 Anmeldung, Genehmigung, Anträge

7.1 Vor Inbetriebnahme

Für BHKW bis 50 kW_{el} sind keine Genehmigungen im Sinne des Immissionsschutzrechts und auch keine Baugenehmigungen erforderlich. Allerdings müssen diese Anlagen die Vorgaben der TA Luft (Kap. 1.3.7) einhalten.

Für die Errichtung eines BHKW über 50 kW_{el} ist i. d. R. ein Genehmigungsverfahren nach dem Baurecht durchzuführen. Das Baurecht liegt grundsätzlich in der Zuständigkeit der jeweiligen Bundesländer, die auf Gesetzesebene spezifische Landesbauordnungen erlassen haben. Darüber hinaus regeln die zuständigen Länderbehörden oftmals in Ausführungsrichtlinien (Verordnungen, Erlasse o. ä.), bis zu welcher Größe BHKW von der Baugenehmigungspflicht freigestellt sind. Bei größeren BHKW-Anlagen wird ohnehin ein Planungsbüro oder ein BHKW-Anbieter eingeschaltet. Sie besorgen die für den Bauantrag erforderlichen Unterlagen und bereiten alles weitestgehend unterschriftsreif vor.

Bei kleineren BHKW müssen vor Inbetriebnahme nur folgende Schritte durchgeführt werden:

- Das BHKW muss beim Netzbetreiber mit einem Formblatt angemeldet werden.
- Das BHKW muss beim Erdgasversorger mit einem Formblatt angemeldet werden.
- Das BHKW muss beim Kaminkehrer mit einem Formblatt angemeldet werden.
- Abschluss eines Einspeisevertrages mit dem Netzbetreiber.

Im Einspeisevertrag sollte die Anpassung der Vergütung für eingespeisten Strom gemäß § 4, Absatz 3, Satz 2 und 3 (nicht Satz 1!) des KWK-Gesetz vertraglich vereinbart werden. Jeweils zum Quartalsende muss der Zählerstand des Einspeisezählers und des KWK-Stromzählers dem Netzbetreiber gemeldet werden. Danach wird die Einspeisevergütung viermal pro Jahr berechnet. Am Jahresende erfolgt dann die Endabrechnung an Hand der gemeldeten Zählerstände. Die Anschlusskosten der KWK-Anlage inkl. Zähler müssen vom Anlagenbetreiber übernommen werden.

7.2 Nach Inbetriebnahme

Nach der Inbetriebnahme müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

Das BHKW muss beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA.de) gemeldet werden. Wenn das BHKW kleiner als 10 kW_{el} ist, genügt eine Meldung über die Inanspruchnahme der Typenzulassung.

Jährlich muss ein Antrag auf Steuerentlastung für die Stromerzeugung und die gekoppelte Erzeugung von Kraft und Wärme gemäß § 53 Energiesteuer-Gesetz gestellt werden. Alle BHKW ab einem Jahresnutzungsgrad von 70 % werden von der Energiesteuer (früher Mineralölsteuer) befreit. Bei Bezug muss die Energiesteuer z. B. für Erdgas (0,55 Cent/kWh) bezahlt werden, kann aber auf Antrag bei den Hauptzollämtern (Kap. 10.4) zurückerstattet werden. Der ermäßigte Steuersatz für das produzierende Gewerbe liegt bei 60 % entsprechend 0,33 Cent/kWh.

Gemäß KWK-Gesetz muss jährlich die in KWK erzeugte Strommenge bis zum 31.03. des Folgejahres an das BAFA gemeldet werden. Nach dem KWK-Gesetz wird ein Zuschlag für den BHKW-Strom von 5,4 Cent/kWh (Abb. 12) bezahlt.

Zur Vergütung des »üblichen Preises«, der sich am durchschnittlichen Preis für Baseload-Strom des vorhergehenden Quartals an der Leipziger Strombörse EEX bemisst (Abb. 13), sowie zum KWK-Zuschlag (Abb. 12) kommen noch die vermiedenen Netznutzungskosten für den eingespeisten KWK-Strom hinzu. Dieser liegt zwar meistens unter 1 Cent/kWh, sollte aber trotzdem nicht verschenkt werden. Die Abrechnung erfolgt über den Netzbetreiber.

Die Vergütungen für KWK-Anlagen, bei denen erneuerbare Energien eingesetzt werden, gehen aus Abb. 14 hervor. Antrag und Abrechnung erfolgen über den Netzbetreiber.

7.3 Versicherungen

BHKW können durch höhere Gewalt (Blitzeinschlag etc.), sonstige äußere Einwirkungen (Überschwemmung im Keller o. ä.) oder durch Schäden an der Maschine ganz oder nur teilweise zerstört bzw. stark beschädigt werden. Zur Abdeckung solcher »materiellen Schäden« gibt es Maschinenbruchversicherungen. Hier sollte beachtet werden, dass BHKW – wie andere Maschinen auch – dem üblichen Verschleiß unterliegen und Versicherer oftmals nur den Restwert bezahlen.

Hat der BHKW-Betreiber z. B. einen Liefervertrag über Strom und/oder Wärme mit Dritten abgeschlossen, so können ihm bei einem Stillstand – z. B. durch einen Maschinenschaden – weitere »finanzielle Schäden« aufgrund nicht eingehaltener Vertragsverpflichtungen in der Form von Schadensersatzansprüchen des/der Dritten entstehen. Ein weiterer Schaden entsteht dem Betreiber, wenn er aufgrund des BHKW-Ausfalls eine Leistungsbezugsspitze beim Zusatzstrombedarf vom EVU hat und dadurch einen höheren Leistungspreis bezahlen muss. Zur Abdeckung solcher Risiken kann der Betreiber z. B. eine Betriebsunterbrechungsversicherung abschließen. Einige Versicherer bieten diese Versicherung allerdings nur als Zusatz zu einer Maschinenbruchversicherung an.

Bei den beiden o. g. Versicherungen sollte der Betreiber in jedem Fall die Kosten und den Nutzen der jeweiligen Versicherung gegeneinander abwägen. Schäden an der Maschine und die Betriebsunterbrechung können (ganz oder teilweise) bereits durch einen Wartungsvertrag (Kap. 4.6) hinreichend abgesichert sein, so dass eine separate Versicherung u. U. nicht erforderlich ist. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die o. g. Versicherungen eher bei »größeren« BHKW wirtschaftlich vertretbar sind.

Eine Haftpflichtversicherung deckt die Risiken von Personen- oder Sachschäden Dritter durch den Betrieb der Anlage ab. Da ein BHKW mit brennbaren oder explosiven Stoffen (Gas) arbeitet, ist der Abschluss einer solchen Versicherung dringend anzuraten. Die Beiträge hierfür sind zumeist relativ gering. Bei Unternehmen beträgt die Prämie i. d. R. ca. 2,5 Promille der Jahreslohnsumme. Ist bereits eine Haftpflichtversicherung vorhanden, so sollten die Ansprüche aus dieser auf den Betrieb des BHKW ausgedehnt werden.

Haftpflichtversicherungen schließen i. d. R. Ansprüche wegen Schäden durch Umwelteinwirkung auf Boden, Luft oder Wasser und alle sich daraus ergebenden Schäden aus. Als ein relevanter umweltgefährdender Schadstoff ist in BHKW mit Verbrennungsmotoren Motoröl

vorhanden; bei Diesel-BHKW kommt zusätzlich der Brennstoff dazu. Gelangen diese Stoffe trotz vorhandener Auffangwannen in den Boden oder in das Grundwasser, können z. T. beträchtliche (Umwelt-) Schäden entstehen. Der Abschluss einer Umwelthaftpflichtversicherung sollte deshalb in jedem Fall in Betracht gezogen werden. Die Versicherungsbeiträge für Klein- gebinde (bis ca. 200 Liter) wie z. B. für Schmieröl sind mit ca. 0,50 bis 1 Euro pro Liter und Jahr relativ gering. Die Prämie für den Heizöltank eines BHKW mit 2000 Litern kann dagegen ca. 150 Euro pro Jahr betragen.

Soll eine der o. g. Versicherungen abgeschlossen werden, so empfiehlt es sich, Angebote mehrerer Versicherer einzuholen.

■ **Abb. 82:** Ansicht einer erdgasbetriebenen BHKW-Anlage von COMUNA-metall im Südbad Bremen mit einer Leistung von 50 kW_{el} bzw. 92 kW_{th}



8 Planungsschritte

Dank der fortgeschrittenen Standardisierung und Konfektionierung von BHKW-Anlagen bis ca. 100 kW_{el} kann die Planung in der Regel auf die Dimensionierung und Einpassung in das zu versorgende Objekt begrenzt werden. Die BHKW-Anlagen selbst werden als voll funktionsfähige Anlagen einschließlich Regel-, Steuer- und Überwachungstechnik angeboten. Die Komponenten sind aufeinander abgestimmt. Der Hersteller leistet für das Modul die volle Garantie über 12 oder 24 Monate, seine Referenzen können schnell geprüft werden.

Das gilt verstärkt für solche BHKW, deren Hersteller auch die komplette Vollwartung übernimmt. Damit ist der Betreiber von der Sorge um Qualität, Lebensdauer und Wartungsfreundlichkeit von Anlagenteilen weitgehend befreit – je nach Wartungsvertrag auch von der Sorge um die Zuverlässigkeit des BHKW.

Eine umfassende Planung, wie sie z. B. die VDI 3985 empfiehlt, mag für Groß-BHKW im MW-Bereich gerechtfertigt sein. Bei kleineren BHKW stünde der Aufwand einer Planung nach VDI 3985 aber in keinem Verhältnis zu den möglicherweise genaueren Ergebnissen. Für Ein- und Mehrfamilienhäuser bis zu 40 Wohneinheiten ist die VDI 4655 eine geeignete Planungsbasis für BHKW bis zu 70 kW Brennstoffleistung (Kap. 3.1).

Die Auslegung und Auswahl eines BHKW kann auch direkt vom BHKW-Anbieter im Rahmen seines Dienstleistungsangebotes verlangt werden. Der Anbieter wird dazu die örtliche Situation für die Aufstellung und die Einbindung beurteilen müssen. In dieser Projektphase kann man den Anbieter auch bitten, im Rahmen seines Angebots, die Laufzeit des angebotenen BHKW zu prognostizieren. Im Auftragsfall hätte er dann die korrekte Funktion des BHKW an dem von ihm beurteilten Aufstellungsplatz mit der vorhandenen Einbindungssituation sowie eine Mindestlaufzeit bei etwa unverändertem Energiebedarf zu garantieren.

Ein ganz anderer Weg ist möglich, wenn zwar der Nutzen eines BHKW in einem bestimmten Objekt bekannt ist, aber das Fachwissen zur Realisierung fehlt oder die Finanzierung ungeklärt ist. Das sind gerade im Bereich der Kommunen und der öffentlich-rechtlichen Einrichtungen verbreitete Hemmnisse. In solchen Fällen kann ein Contracting-Modell möglicherweise eine Alternative bieten (Kap. 6.2). Die Bezahlung des BHKW erfolgt in der Regel aus den Energiekosten-Ersparnissen, die mit dem BHKW erwirtschaftet werden. Eine eigene Finanzierung ist nicht erforderlich. Anbieter solcher Modelle planen normalerweise selbst, so dass der Anwender keinen eigenen Planer braucht. Allerdings kann auch in diesem Fall die Orientierung über die Dimension und Ausnutzung eines BHKW hilfreich sein.

Obwohl die BHKW-Technik erprobt und bewährt ist, empfiehlt es sich, vor jeder Beauftragung Referenzen der Anbieter zu überprüfen. Unabhängig vom gewählten Planungsweg zum BHKW sollte der Anwender immer fordern, dass

- sowohl Planer als auch BHKW-Lieferanten im Rahmen ihrer Angebote einfach prüfbare Referenzen vorlegen,
- sein BHKW 3000 bis 7000 Stunden im Jahr erreichen sollte – es sei denn, es gibt klare Gründe für eine Abweichung nach unten,
- er die größtmögliche Anlage erhält (sowohl wegen der Kostendegression der Anlagen als auch wegen des Nutzens für die Umwelt), im Zweifel ist jedoch die kleinere zu wählen,
- maximal zwei Module vorgesehen werden,

- die Prognose der Laufzeit des BHKW auf Basis von Stundenwerten (oder noch feiner) sowohl für Wärme als auch für Strom ermittelt wird, wie es die VDI 4655 vorsieht,
- bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung die nach Einbau eines BHKW zu erwartende Struktur der Stromkosten verwendet wird. Keinesfalls darf mit durchschnittlichen Strompreisen gerechnet werden,
- die Möglichkeiten einer Investitionsförderung ausgeschöpft werden,
- der Zustand der Heizungsanlage (in erster Linie Temperaturen und Hydraulik) darauf geprüft wird, den prognostizierten BHKW-Betrieb im vorhandenen Heizungssystem zu erreichen. Andernfalls wäre eine Ertüchtigung der Heizungsanlage notwendig.

Diese objektbezogenen Planungsschritte müssen noch ergänzt werden, wenn ein BHKW mehrere Gebäude über eine Nahwärmeleitung versorgen soll:

- möglichst genaue Ermittlung der Investitionen für die Nahwärmeleitung, weil sie mit der angesetzten Lebensdauer und dem Zins den entscheidende Kostenfaktor des Gesamtsystems ausmachen,
- es muss unbedingt in einer Sensitivitätsanalyse dargestellt werden, welchen riesigen Einfluss der Zins, die Strompreissteigerung und der Betrachtungszeitraum/Lebensdauer der Anlagenteile auf die Wirtschaftlichkeit haben.

8.1 BHKW-Größe

In Kap. 3.1 wurde gezeigt, dass es für nahezu jede Objektgröße auch das passende BHKW gibt. Die Ermittlung der BHKW-Größe geht ebenfalls aus dem Kap. 3.1 hervor. Nach der EU Richtlinie 2002/91/EG muss jedes Gebäude mit über 1 000 m² Nutzfläche in der Planungsphase auf den möglichen Einsatz der KWK überprüft werden. Einzelne Anbieter von BHKW unterstützen den Anwender, indem sie ihm entsprechende Berechnungen im Rahmen eines Richtpreisangebots vorlegen. Das kann bei der Abschätzung der Ausnutzung für verschiedene BHKW-Größen besonders hilfreich sein. Auch an dieser Stelle gilt: verschiedene Angebote einholen.

8.2 Pflichtenheft für den Objekt-Anwender

Im Vorfeld einer Planung sollte der Anwender definieren, ob die Wärme- und Stromversorgung seines Objektes für ein BHKW günstiger ist als die Wärmeversorgung aus einem Kessel und der Strombezug. Dazu seien folgende Stichworte gegeben:

- Lastprofile nach Art des Versorgungsobjektes, z. B. Wohnobjekt, Altenheim, Schwimmbad, Krankenhaus,
- Jahresstromverbrauch; belegt durch die monatlichen Abrechnungen für Strom über ein Jahr für die betreffende Liegenschaft,
- Jahreswärmeverbrauch; belegt durch die monatlichen Abrechnungen für Brennstoff oder Wärmeverbrauch über ein Jahr für die betreffende Liegenschaft,
- installierte Heizkessel; Typenschilder oder Schornsteinfegerprotokoll,
- Platz im Heizungsraum (Grundriss-Skizze),

- Eigenstromversorgung; höchstens 10 % des BHKW-Stroms in das Netz einspeisen; Zusatzstrombezug nicht unter ca. 20 bis 30 % des Referenzstromverbrauchs, weil die Wirtschaftlichkeit sich schnell verschlechtern kann,
- Anträge und Verträge mit dem Netzbetreiber, der BAFA und einem Zusatzstromanbieter,
- Klärung über mögliche zusätzliche Abnehmer des BHKW-Stroms,
- Sonderfall einer Direktvermarktung (Kap. 6.4),
- Optimierung der Betriebsweise bei Einsatz eines Wärme- und/oder eines Stromspeichers,
- Anpassung der Betriebsweise bei sich ändernden Rahmenbedingungen wie Strompreise oder Einspeisevergütungen,
- Einbindung mittels Rücklauf temperaturanhebung (einfachste Methode),
- Vollwartungsvertrag; ermöglicht einfache Funktionalausschreibung,
- automatische Störmeldung an Kundendienst; wichtig, wenn Strom-Leistungspreis gesenkt werden soll,
- Eingriff von außen auf den Betrieb und die Beseitigung von Störungen des BHKW,
- Ein-Modul-Anlage in Verbindung mit schnellem Kundendienst (max. 2 bis 3 Kalendertage bei Störung) und BHKW-Fabrikat ist mit guten Referenzen in vielen Fällen die preisgünstigste Lösung oder Zwei-Modul-Anlage,
- Betreiber- oder Contracting-Modell, eventuell unter Einbeziehung der Kesselanlage,
- Dimensionierung nach Richtwerten; Begrenzung der BHKW-Größe durch Eigenstromanteil,
- Fördermöglichkeiten für verschiedene BHKW-Größen.

Gute Herstellerangebote können oft eine eigene Planung für BHKW ersetzen.

8.3 Ausschreibung und Lieferumfang

Für BHKW bis etwa 100 kW_{el} sind zusätzliche Merkmale für eine einwandfreie Funktion nicht erforderlich, so dass nur wenige Variationen bei der Ausstattung des Moduls möglich sind. Daher sollte eine Funktionalausschreibung genügen. Soll gleichzeitig ein Vollwartungsvertrag abgeschlossen werden, hat die Ausschreibung parallel zu erfolgen.

Der Lieferumfang des BHKW kann knapp festgelegt werden, z. B. als »vollautomatische, anschlussfertige, innerhalb der vorhandenen oder geplanten Heizungsanlage voll funktions- und genehmigungsfähige BHKW-Anlage mit allen erforderlichen Regel-, Steuer und Überwachungseinrichtungen ausgestattet und eingebaut unter Einhaltung der anzuwendenden Normen und Richtlinien«.

Empfohlen wird, wegen der unten genannten Gründe gleich die »notwendige Einbindung in die vorhandenen Heizungs- und Stromversorgungsanlagen sowie in das Gebäude« in den Lieferumfang aufzunehmen. Letzteres ist notwendig, z. B. zur Klärung der Kaminfrage bzw. der Abgasableitung, für Durchbrüche oder Kernbohrungen; aber auch, um nicht dem Anbieter das Risiko der Körperschallübertragung zu nehmen.

Zur Ausstattung sind konkrete Festlegungen zu treffen: Zu Schalldämmung (Luft-, Körper-, Abgasschall¹⁾), Abgasableitung, Steuerungsumfang (besonders auch das Zusammenspiel mit

¹ Werden die bestehenden Immissionsrichtlinien in Bezug auf Lärm (TA Lärm) an dem spezifizierten Aufstellungsplatz mit den dort vorhandenen Nachbarräumen eingehalten, sollten sich Spezifikationen an die Konstruktion der Schallschutzeinrichtungen erübrigen. Immissionswert bei Wohnnutzung innerhalb von Gebäuden ist 25 dB nachts.

der Heizungssteuerung; es sollte z. B. genügen zu fordern: Steuerung/Regelung für Rücklauf Temperaturerhöhung einschließlich aller erforderlichen steuerungs-/regelungstechnischen Elemente), DFÜ etc. Manche Hersteller übergeben eine Liste der möglichen Optionen, in der der Anwender nur seine Wünsche ankreuzen muss. Bei der Festlegung der Ausstattung geht es, abgesehen von dem Komfort für eine Überwachungsanlage, eigentlich nur um das »Ob«, denn das »Wie« ist vom Hersteller vorgegeben. Dies ist etwa mit den Zusatzausstattungen beim Neukauf eines PKW zu vergleichen.

Die Spezifikation der BHKW-Einbindung kann erheblichen Aufwand verursachen, wenn man sich an den hierzulande verbreiteten Leistungsverzeichnissen orientiert. Zudem schafft man sich zahlreiche Schnittstellen, eine Menge Arbeit bei der Bauüberwachung und wird trotz dieses Aufwands bei Mängeln seine Ansprüche doch nur schwer durchsetzen können. Der sinnvollere und wesentlich vorteilhaftere Weg führt direkt zum BHKW-Anbieter. Er verfügt normalerweise ohnehin über einen Standard-Leistungskatalog, den er nach einem Ortstermin schnell und einfach an die jeweiligen Erfordernisse anpassen kann. Wird die Einbindung dann in den BHKW-Auftrag eingeschlossen, verlangt man eine einwandfreie BHKW-Funktion unter den örtlich vorliegenden Bedingungen sowie eine Garantie zur Mindestlaufzeit. Dann sollten der Aufwand minimal und die Gewährleistungsansprüche problemlos durchsetzbar sein. Ansonsten wird nach dem Stand der Technik, nach einschlägigen Normen und Richtlinien gebaut, die allen Fachbetrieben ohnehin bekannt sein sollten.

Wird die BHKW-Anlage ohne Planer gebaut, könnte auch die Ausarbeitung des Bauantrags, wo er noch erforderlich ist, vom Hersteller durchgeführt werden. Denn die meisten Unterlagen im Bauantrag stammen ohnehin vom Hersteller. Eine Ausnahme ist nur der amtliche Lageplan vom Katasteramt.

8.4 Beteiligung des Handwerks

Grundsätzlich sind Einbindungsarbeiten für BHKW ganz normale Arbeiten aus dem Heizungsbau und dem Elektrohandwerk. Daher können die Einbindearbeiten ohne weiteres an örtliche Handwerksbetriebe vergeben werden. Werden einzelne Objekte durch eine Nahwärmeleitung verbunden, kommen auch Tiefbauarbeiten hinzu. Auch diese Arbeiten können im Rahmen einer Bürger-Energiegenossenschaft auch von beteiligten Landwirten oder Handwerkern zu Selbstkosten sehr günstig erbracht werden.

Dennoch sollte man diese Einbindungsarbeiten im Objekt zumindest bei BHKW bis etwa 100 kW_{el} von den Modullieferanten durchführen lassen, weil:

- Man sich als Anwender oder Planer viel Diskussions-, Ausschreibungs- und Koordinationsaufwand sparen kann.
- Der BHKW-Anbieter so gezwungen ist, sich mit dem Zusammenspiel von BHKW und Heizung intensiv zu beschäftigen.
- Der Modullieferant im Rahmen seiner Bauüberwachung das eine oder andere an der Heizungsanlage einstellen könnte, wenn er damit den BHKW-Betrieb verbessern kann.
- Dann die Gewährleistungen sowohl für das BHKW als auch für das Zusammenspiel mit der Heizungsanlage in einer Hand liegen.

In der Regel suchen sich die Hersteller für die Bauausführung örtliche Handwerker oder beauftragen eine vor Ort gegründete Bürgervereinigung. Hier kann und sollte der Anwender auch Vorschläge machen.

8.5 Pflichtenheft für den Projektbeauftragten

Der Projektbeauftragte kann ein Unternehmen, eine Kommune oder auch eine objektbezogene Gesellschaft sein. Unerlässlich für den Erfolg eines KWK-Projektes mit angeschlossener Nahwärme sind:

- die Ermittlung der Charakteristik des Energiebedarfs in Form von Tages-, Wochen- und Jahresgängen in mindestens stundenweiser Auflösung (Wärme und Strom). In der Regel genügt das Beiziehen von Angaben in Normen, Richtlinien – vor allem VDI 4655 – oder guter Literatur,
- die Erstellung einer hinreichend genauen Jahresdauerlinie für die Gesamtheit der versorgten Objekte,
- die Überprüfung bzw. Auslegung der BHKW-Größe und der zugehörigen Ausnutzung durch Vergleich mehrerer Varianten auch unter Einbeziehung von Wärme- und Stromspeichern,
- die Zusammenstellung und ggf. Aufbereitung der relevanten Brennstoffkosten in der notwendigen Detaillierung (keine Durchschnittspreise!) und Festlegung einer Bandbreite für die zukünftigen Preissteigerungen,
- die Zusammenstellung der Stromkosten und der Einspeisevergütungen und Festlegung einer Bandbreite für die zukünftigen prozentualen Veränderungen,
- ein Wartungskonzept und zugehörige Wartungskosten,
- die Zusammenstellung der möglichen Eigenleistungen der betroffenen Bürger,
- die sorgfältige Einpassung in die örtlich vorhandene Situation, sowohl räumlich (Optimierung der Nahwärmeleitung) als auch verfahrenstechnisch (Platz für BHKW und Schaltschrank, Zugang, Abgas, Vor-/Rücklauf, Pumpe, Gas, Strom, Regelung/Steuerung, Internet/Smartphone, Zuluft, Kühlluft, Lärm),
- eine klare Aussage, dass die vorgeschlagene BHKW-Anlage mit dem evtl. vorhandenen Nahwärmenetz unter den gegebenen Bedingungen in dem zu versorgenden Objekt (Verfahrensparameter) wie prognostiziert arbeiten wird, insbesondere dass die Jahreslaufzeit und eine Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Die Aussagekraft hängt jedoch wesentlich von der Güte der Datenbasis und den angenommenen zukünftigen Veränderungen ab.
- ein preiswertes und doch flexibles Regelungs-/Steuerungs-/Betriebskonzept mit möglichst wenig Schnittstellen zur Heizung, aber zusätzlich eine »Stromschnittstelle« zum örtlichen Netzbetreiber oder zu einem virtuellen Kraftwerk sowie
- eine Wirtschaftlichkeitsprognose für jede Variante.

Die aufgeführten Leistungen sollte der Projektverantwortliche selbst erarbeiten. Dann sollten Angebote eingeholt werden, die die Eigenleistungen berücksichtigen. Stimmen die Angebote mit den positiven anfänglichen Prognosen überein, können Aufträge erteilt werden.

9 Neue Forschungstrends: KWK-Projekte der Förderinitiative EnEff:Wärme

Die KWK als Teilsystem der Strom- und Wärmeversorgung ist komplex und beschränkt sich nicht nur auf die KWK-Techniken, die Kombinationen von Technologien wie z.B. die KWKK, Speicher oder die Elektromobilität, sondern umfasst auch die Betriebsweisen und die von der Politik vorgegebenen Rahmenbedingungen, Investitionszuschüsse und Zulagen.

Die KWK ist weiterhin in das Marktgeschehen für Brennstoffe, Wärme und Strom eingebunden, Märkte die krisenanfällig und von politischen Entscheidungen abhängig sind. Die weltweite Klimapolitik kann sich lokal zu Gunsten, aber auch negativ z.B. beim Einsatz von Erdgas auswirken. Nicht zuletzt spielt auch das Verhalten der Bürger eine entscheidende Rolle, das keineswegs nur rational und ökonomisch gesteuert ist, sondern auch Emotionen mit dem Energiekonsum weckt, die noch verstärkt werden, wenn es um eine eigene Stromerzeugung geht. Es ist daher kaum möglich, das Verhalten von Verbrauchern oder der zukünftigen Prosumer abzuschätzen oder gar zu erforschen, wenn man ihnen z.B. variable Strompreise und Einspeisevergütungen anbietet oder einen Strommarktzugang ermöglicht.

Der zusätzliche Einsatz von Wärme- und Stromspeichern sowie neue Stromverbraucher wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten am Markt zu agieren und evtl. neue Geschäftsmodelle wie z.B. ein Handel mit gespeicherter Energie.

Allein diese Aspekte zeigen: Die KWK ist mit ihrem Umfeld ein hochkomplexes System, das derzeit einem starken Wandel unterliegt. Mit den politischen Rahmenvorgaben zum Ausbau der erneuerbaren Energien sowie dem nationalen Ausstieg aus der Kernenergie ist der Trend zu erkennen, die Energieversorgung in Deutschland in Zukunft dezentraler auszurichten. Dadurch gerät die KWK und speziell die Mini- und Mikro-KWK-Technologie in den Fokus einer verstärkten Markteinführung und speziell der Forschungsförderung. Aus ihrer Sicht können jedoch nur Teilaspekte und deren ökologische und ökonomischen Rückwirkungen auf das Gesamtsystem »Energieversorgung« untersucht werden.

Die Forschungsinitiative »Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze« (EnEff:Wärme) des BMWi trägt diesen neuen Anforderungen Rechnung. Mit ihr werden neue Netzkonzepte erforscht und die dazu nötigen Technologien und Planungsinstrumente entwickelt. Sie sollen die Wärmeversorgung energetisch, wirtschaftlich und ökologisch deutlich verbessern. Dazu wurden seit 2007 zahlreiche Forschungsprojekte gestartet. Nachfolgend werden die Projekte beschrieben, die für die KWK relevant sind. Sie werden den Themenbereichen »Anlagentechnik«, »Kombination von Technologien«, und »Dienstleistungs-, Betriebs- und Marktkonzepte sowie Informationstechniken« zugeordnet.

9.1 Anlagentechnik

Weiterentwicklung alternativer Motorkonzepte [31]

Es gibt intensive Bestrebungen, den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren zu steigern und diese mit biogen erzeugten Kraftstoffen zu betreiben. Ein solcher Kraftstoff ist Biogas. Die bei der Verbrennung entstehenden aggressiven Produkte von Schwefelwasserstoff gelangen bei konventionellen Biogas-Motoren über das Blow-By-Gas in das Schmieröl und lassen dieses

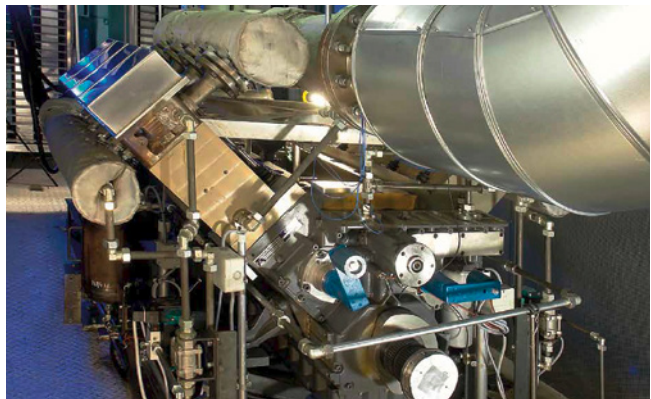
sehr schnell altern. Dies bedingt häufige Ölwechsel, um Motorschäden zu vermeiden. Kleine KWK-Anlagen mit wenigen kW_{el} weisen gegenüber Motoren im MW-Bereich nur mäßige Wirkungsgrade auf. Weiterhin sind sie nicht in der Lage, reines Pflanzenöl zu verbrennen. Ein mögliches Anwendungsfeld, nämlich der Einsatz in landwirtschaftlichen Betrieben, ist somit derzeit nicht erschließbar. Mögliche Ansätze zur Nutzung dieser Potenziale bieten der Gegenkolbenmotor sowie der Kurbelschlaufenmotor.

Im Rahmen des EnEff:Wärme-Projekts untersucht die TU Braunschweig zwei Motorkonzepte, die als Prototypen verfügbar sind. Das erste basiert auf der bereits erprobten Gegenkolbentechnologie, die sich in der Vergangenheit durch hohe Wirkungsgrade und einen relativ einfachen Aufbau auszeichnete. Der vorhandene Prototyp weist neuartige Konstruktionsmerkmale auf, die einen gegenüber herkömmlichen Gegenkolbenmotoren gesteigerten Wirkungsgrad sowie eine verbesserte Pflanzenöltauglichkeit erwarten lassen. Das zweite Konzept basiert auf der Kurbelschlaufentechnologie der Fa. Ficht. Aufgrund des Kurbelschlaufen-Prinzips sind Kurbeltrieb und Zylinder getrennt. Ein Blow-By-Gas im üblichen Sinne gibt es daher nicht. Dies ermöglicht bei Einsatz aggressiver Gase eine Reduzierung der Ölalterung. Beide Konzepte kommen auf den Prüfstand hinsichtlich Leistung, Kraftstoffverbrauch, Emissionen etc., um mit Messdaten ihre Konkurrenzfähigkeit – vor allem hinsichtlich des Wirkungsgrads – festzustellen. Ziel ist die Entwicklung und Erprobung eines neuen Prototyps des Gegenkolbenmotors.

ORC-Dampfexpansionsmotor nutzt Abwärme zur effizienten Verstromung [32]

Die Fa. DeVeTec hat einen neuen Dampfexpansionsmotor – integriert in ein ORC-System – entwickelt, der es erlaubt, aus Abwärme direkt verwertbaren Strom zu erzeugen. Im Forschungsprojekt ORCent wird der DeVeTec-ORC-Dampfexpansionsmotor mit verschiedenen Abwärmequellen aus der Industrie und in Kombination mit Abwärme aus erneuerbaren Energien erprobt. Dabei lässt sich der Motor selbst weiter optimieren. Parallel werden an einem ORC-Medienprüfstand neue organische Fluide des Partners Evonik Industries auf ihre Eignung für den Einsatz mit dem Dampfmotor untersucht und ein Wärmetauscher für stark schadstoffbelastete Abgase vom Verbundpartner Schott AG konzipiert und getestet. Somit erweitert das Projekt das Spektrum verfügbarer Wärmetauscher zur Stromerzeugung aus industrieller Abwärme.

■ **Abb. 83:** ORC-Dampfexpansionsmotor mit Messtechnik



9.2 Kombination von Technologien

Thermische Speicher für die Flexibilisierung von KWK-Anlagen [33]

Eine größere Flexibilisierung von KWK-Anlagen lässt sich durch die Integration thermischer Speicher in Fernwärmenetze erreichen, weil dadurch eine zeitliche Entkopplung der Lieferung von Strom und Wärme ermöglicht wird. In diesem Forschungsprojekt wird untersucht, unter welchen Randbedingungen die Investition in den Bau eines Speichers wirtschaftlich ist und welche Verbesserungen sich aus umweltpolitischer Sicht ergeben. Das Projekt wird an der TU Berlin in Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig, der Hochschule Hannover sowie mit Beratung durch Industriepartner durchgeführt.

Ziel des Projekts ist es, die Vorteile von thermischen Speichern als Erweiterungsmaßnahmen in Fernwärmesystemen zu ermitteln. Hierfür wird ein mathematisches Modell entwickelt, das das Verhalten verschiedener KWK-Anlagen, von Heißwassererzeugern und elektrischer Wärmebereitstellung durch Heizstäbe oder Wärmepumpen in Zusammenhang mit Wärmespeichern abbildet. Damit können die marktgetriebenen Einflüsse der einzelnen Erweiterungstechnologien und deren Kombination auf das Energiesystem ermittelt werden. Auf dieser Grundlage wird untersucht, wie sich die Erweiterungsmaßnahmen auf die Bereitstellung von Regelenergie auswirken und wie robust die Ergebnisse in Bezug auf eine potenzielle Liberalisierung der Fernwärmenetze z. B. für BHKW-Anlagen sind. Abschließend werden die einzelnen Ergebnisse auf das Energiesystem Deutschland projiziert, um quantitative Aussagen zu folgenden Punkten zu treffen:

- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen,
- Flexibilisierung des bestehenden Heizkraftwerkparks,
- Bereitstellung von Regelenergie,
- Systemintegration von erneuerbaren Energien,
- Erhöhung der gesamten Energieeffizienz und
- Primärenergieeinsparung und somit Reduktion von CO₂-Emissionen.

Kostengünstiger Fernwärmetransport für den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung [34]

Die Kosten der Fernwärme frei Verbraucher werden durch die Kostenanteile der Erzeugung, der Wärmeverteilung und der Wärmeübergabe beim Kunden dominiert. Die Kosten des Wärmetransports, dort wo er heute realisiert ist, weisen hierin einen vergleichsweise niedrigen Anteil auf. Andererseits bietet der Wärmetransport die Möglichkeit, Wärme aus besonders effizienten und kostengünstigen KWK-Großanlagen auch in weiter entfernten Gebieten für die Fern- und Nahwärmeversorgung bereit zu stellen. Damit kann der Aktionsradius der Fernwärme, die in Großanlagen bekanntlich mit wesentlich niedrigeren spezifischen Investitionen und geringeren Betriebskosten erzeugt wird, erweitert werden.

Zielsetzung des Projekts der MVV Mannheim und Partnern ist es, KWK-Wärme aus besonders effektiven Großanlagen über Transportleitungen dort nutzbar zu machen und die Baukosten für Fernwärmetransportleitungen durch planerische, konstruktive und bautechnische Weiterentwicklungen zu senken. Angestrebt wird dabei eine Senkung der Baukosten für Fernwärmetransportleitungen um 10 bis 15 %. Bezüglich Leitungstechnik wird die Einführung der sog. Kaltverlegung von Kunststoff-Mantelrohren (KMR) auch für Großleitungen untersucht,

■ **Abb. 84:** Festpunktbrücke DN 600 für die Realisierung der Kaltverlegung vor dem Einbau



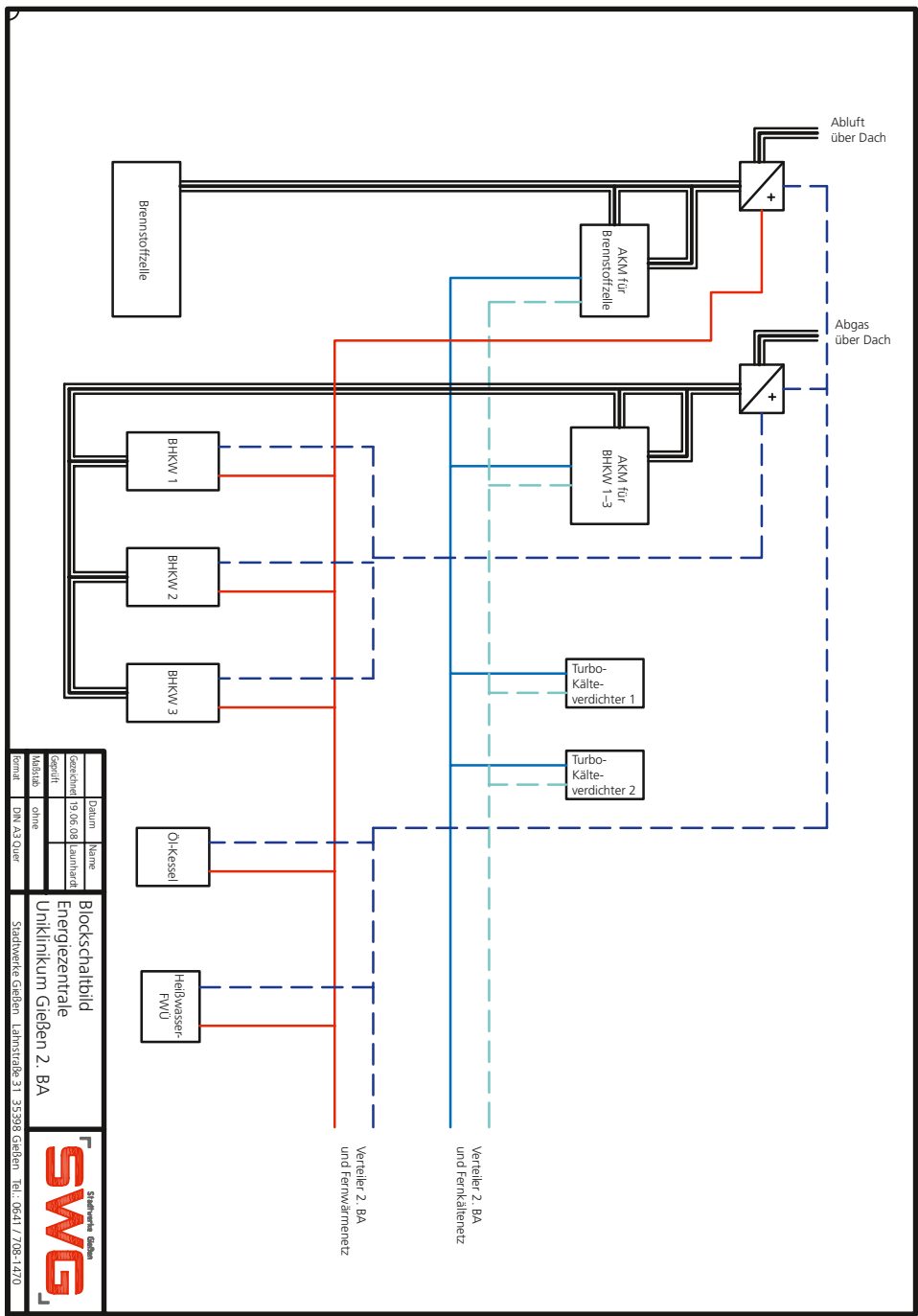
im Tiefbau wird angestrebt, das Aushubmaterial wieder zu verwenden und nach Aufbereitung zu Vergussmassen in fließfähiger Form wieder einzubauen. Die Umsetzung der technischen Lösungen wurde in Feldversuchen an der Fernwärmetrasse Mannheim-Speyer und der Fernwärme-Querverbindung Lindenhof durchgeführt.

Energiezentrale Universitätsklinikum Gießen [35]

Der Betrieb eines Krankenhauses stellt hohe Anforderungen an die energetische Versorgungssicherheit, da der Ausfall von notwendigen Energieströmen weitreichende Konsequenzen zur Folge haben kann. In Gießen ergibt die Nutzung der Abwärme aus dem Abgas und dem Kühlwasser der eingesetzten Gasmotoren, die Einbindung der Hochtemperaturwärme einer Brennstoffzellenanlage sowie die Kälteerzeugung mit Hilfe von Absorptions- und Kompressionskältemaschinen eine breit gefächerte Wärmeenergiebereitstellung mittels Kraft-Wärme-Kopplung. Die Vielfalt der einzelnen Gewerke sowie die Sicherstellung von Redundanz mit Hilfe eines Ölkessels, der im Notfall zeitnah zugeschaltet werden kann, garantiert eine optimale Versorgungssicherheit des Universitätsklinikums.

Durch die geplante Anlage ist es möglich, Strom und Erdgas in erheblichem Umfang einzusparen und damit auch den Ausstoß an Treibhausgasen entscheidend zu reduzieren. Beim Vergleich mit herkömmlicher Technik, d. h. Wärmebereitstellung mittels Gaskessel und Strombezug aus dem öffentlichen Netz reduziert sich der Endenergieeinsatz von 23 826 MWh auf 4 364 MWh, wobei entsprechende Stromgutschriften berücksichtigt sind.

Der Betrieb von drei BHKW-Modulen, der Absorptionskältemaschine, zweier Kompressionskältemaschinen und einer Fernwärmeübergabestation netzparallel im Kälte- und Fernwärmenetz wurde im ersten vollständigen Betriebsjahr getestet. Die Wärmeversorgung parallel mit den bestehenden Erzeugern wurde optimiert und dauerhaft funktionell eingestellt. Das erste, vollständige Betriebsjahr hat die Annahmen weitgehend bestätigt. Der Gesamtnutzungsgrad liegt bei über 89 %.



■ **Abb. 85:** Blockschaltbild Energiezentrale Uniklinikum Gießen

Marktfähigkeit hocheffizienter KWK-Anlagen – LowEx Fernwärme [36]

Die Energieversorgung Halle GmbH (EVH) betreibt ein ausgedehntes Fernwärmenetz mit einer maximalen Last von derzeit ca. 250 MW. Die Wärmeeinspeisung erfolgt zu 93,4 % durch die GuD-Anlagen in KWK. Mit dem Demonstrationsprojekt soll die sinnvolle, gemeinsame Nutzung von KWK und Solarthermie in einem Anlagenkonzept gezeigt werden, weil bisher die Solarthermie im Versorgungsbereich von KWK-Anlagen zu einer Verdrängung der Wärmenutzung aus KWK-Anlagen führte. Mit Hilfe einer umfassenden Einsatzoptimierung (Abb. 86) werden wirtschaftlich optimale Fahrweisen verschiedener Anlagendimensionierungen untersucht.

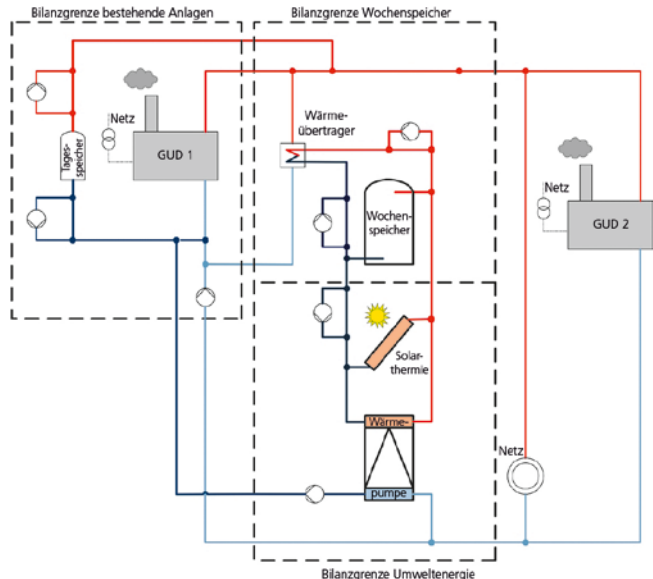
Zentrales Element ist die Entwicklung und Erprobung von Simulationswerkzeugen sowie die Erstellung eines Betriebsführungs-Optimierungstools. Die Realisierung einer ersten Ausbaustufe (Großspeicher, Abb. 87) im Versorgungsbereich der EVH erlaubt über ein umfassendes Monitoring der TU Dresden die Validierung.

Die zu entwickelnde Groß-Solaranlage wäre der erste Einsatzfall der Solarthermie für die Nutzung im direkten Fernwärme-Erzeugerbereich in der MWpeak-Klasse. Der geplante Einsatz des Wärmeträgers Wasser ohne Zusatz von Frostschutzmitteln führt zu einer signifikanten Endenergieeinsparung durch Senkung des Hilfsenergiebedarfs. Der geplante Mittelfrist-Wärmespeicher von ca. 50 000 m³ Volumen stellt eine Grundsatzlösung im Bereich Wärmeversorgung dar. Eine Anwendung kann die Nutzung von »Überschuss«-Strom aus Windenergieanlagen in »off peak« Zeiten für den Antrieb von Wärmepumpen sein, deren Wärmeerzeugung in Mittelfristspeichern für eine spätere Nutzung akkumuliert wird.

Feldversuch ORC-Prozesse [37]

Ziel dieses Projekts am Fraunhofer-Institut UMSICHT ist es, aus ungenutzter Abgas- und Kühlwasserwärme von Motoren-BHKW mittels ORC-Prozessen 20 bis 120 kW_{el} zusätzlichen Strom zu gewinnen und die Energiebilanz der Motoren zu verbessern. Angestrebt werden Wirkungsgrade der Abwärme-Verstromung bis 18 % netto. Die Gesamtwirkungsgrade der

■ **Abb. 86:** Anlagenschema für Betriebsführungs-Optimierung



Motorenanlage Motor+ORC = MuD (Motoren- und Dampfkraftanlage) können bei Motoren zwischen 500 und 1500 kW_{el} 45–48 % erreichen und perspektivisch diesen Zielwert noch etwas überschreiten.

An vielen BHKW-Standorten im Bereich der erneuerbaren Energien (Biogas, Pflanzenöl, Klärgas, Deponiegas [Abb. 88], Grubengas) wird BHKW-Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Verfolgt werden zwei Nutzungskonzepte der Motorabwärme, Hochtemperatur-(HT) und Niedertemperatur-(NT) ORC-Prozesse. NT-ORC-Prozesse haben nur einen bescheidenen Wirkungsgrad bis etwa 8 %. Hochtemperatur-ORC-Prozesse können nur die Abgaswärme des Motors nutzen, dies allerdings mit Nettowirkungsgraden bis 18 %. Die Abwärme des HT-ORC kann mit Vorlauftemperaturen bis 85 °C bereitgestellt werden und bleibt für andere Heizzwecke nutzbar. Dies ist mit NT-ORC-Prozessen nicht möglich. Das Vorhaben hat sich in seiner ersten Phase daher auf HT-ORC-Module konzentriert und es wurde nur ein NT-ORC gebaut (Abb. 89).

Die technischen Resultate und Betriebserfahrungen sind ermutigend. Für die Hochtemperatur-ORC-Prozesse wurden Nettowirkungsgrade der Abwärme-Verstromung bis 20 % erzielt. Die Verfügbarkeit der Prozesse erreicht Werte bis 99 % der Motorenlauftzeit.



■ **Abb. 87:** Tagesspeicher der LowEx-Wärmeversorgung in Halle



■ **Abb. 88:** ORC an einem Deponiegas-Biogasmotor am Standort Deponie Altenberge



■ **Abb. 89:** Verdampfer-ORC-Prozess mit Abgaswärmezufuhr aus einem Gasmotor

9.3 Dienstleistungs-, Betriebs- und Marktkonzepte sowie Kommunikations- und Informationstechniken

Entwicklung innovativer Abwärme-Verbundsysteme für kleinteilige Gewerbegebiete (Heatloop) [38]

Die Nutzung von Abwärme, die bei fast allen industriellen Prozessen anfällt, ist eine gute Möglichkeit Energiekosten zu reduzieren. Für große Industriebetriebe mit hoher nutzbarer Abwärme gibt es bereits zahlreiche Beispiele für lokale Wärmeverbünde. Für kleinteiligere Gewerbegebiete mit unterschiedlichen Branchen und Betriebsgrößen sind lokale Wärmenetze bisher noch nicht erprobt. Das Projekt von Fraunhofer UMSICHT und Ruhr-Universität Bochum untersucht zwei Gewerbegebiete in Bochum mit dem Ziel, einen verlässlichen Wärmeverbund aufzubauen, diesen mit einem geeigneten Geschäftsmodell wirtschaftlich zu betreiben und eine Übertragbarkeit des Konzepts sicherzustellen.

Intelligente Vernetzung von Stadtinfrastrukturen – Smart Power Hamburg [39]

Ziel des Projekts ist die Entwicklung innovativer Energieeffizienzdienstleistungen. Dazu entsteht ein aus Stadtinfrastruktur geprägtes Smart Grid (Intelligenter Energieverbund) und eine Plattform zum Austausch von Leistungen zwischen Erzeugern und Verbrauchern im Verbundsystem. Zukünftige Stadtentwicklungsprojekte können zur ihrer Effizienzsteigerung Energiedienstleistungen einkaufen oder Anderen ihrer Fähigkeiten anbieten.

Strom und Wärme für öffentliche Liegenschaften, Gewerbe und Industrie soll über die KWK bereitgestellt werden. Liegenschaften werden zusätzlich mit Lastmanagementanlagen ausgerüstet. Neue Wärmespeicher werden erschlossen. Die Verbraucher werden zusammen mit den potentiellen Energiespeichern und den KWK-Systemen auf ein flexibles Leitsystem aufgeschaltet. Parallel wird eine umfassende Softwarelösung (Plattform) entwickelt, die die zu erarbeitenden Betriebskonzepte und Geschäftsmodelle umsetzt. Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Betriebskonzepte und Geschäftsmodelle bilden rechtlich-regulatorische Vorgaben sowie technische Einschränkungen. Grundlage zur Bewertung bildet die Analyse der Systeme und des Verbundes durch die Modellbildung und Simulation.

Smart Energy Management – Intelligentes Energiemanagement von Strom, Gas, Wärme und Kälte [40]

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines aktiven Last- und Erzeugungsmanagements elektrischer und thermischer Energieformen mit dem Fokus auf dezentraler Erzeugung, vor allem auch thermischer anlagen- und bautechnischer Speicher im urbanen Raum. Neben der Wärmeversorgung einzelner Gebäude wird die liegenschaftsübergreifende Anbindung an Nahwärmenetze betrachtet. Neben den thermischen und hydraulischen Analysen wird für ein ausgewähltes Versorgungsgebiet ein elektrisches Netz modelliert und die Auswirkungen der entwickelten Regelungs- und Optimierungsstrategien diskutiert. Darüber hinaus sollen im Zusammenhang mit dem Einsatz von kleinen, dezentralen KWK-Systemen Aussagen hinsichtlich der elektrischen Frequenzstabilität sowie der Spannungsqualität in einem modellierten elektrischen Netz generiert werden.

■ **Abb. 90:** Mikro-KWK-System am Prüfstand



Optimierung des Betriebs von Mikro-KWK-Systemen [41]

Mini-KWK-Anlagen im Leistungsbereich von etwa 5 bis 10 kW elektrisch und 10 bis 25 kW thermisch sind seit einigen Jahren am Markt verfügbar. Mikro-KWK-Anlagen mit rund 1 kW elektrischer und 1 bis 5 kW thermischer Leistung sind derzeit in der Markteinführung. Sowohl Wärme als auch Strombedarf von Gebäuden und deren Nutzern unterliegen starken zeitlichen Schwankungen. Diese sind nur teilweise korreliert, so dass bei Einsatz von KWK-Systemen eine Entkopplung der Stromerzeugung vom Wärmebedarf des Versorgungsobjekts wünschenswert ist. Die Schlüsselkomponente hierfür ist der thermische Energiespeicher. In einem bereits abgeschlossenen Projekt wurde deshalb ein innovatives Wärmespeichermanagement entwickelt. Dieses erlaubt mit geringem Aufwand, den Zustand des Wärmespeichers zu bestimmen. Dadurch ist eine bessere Planbarkeit des Anlagenbetriebs gewährleistet.

Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt neben der wirtschaftlichen Auslegung des Gesamtsystems vor allem in der Optimierung des Betriebs des KWK-Moduls und der Bewirtschaftung des Wärmespeichers. Denn einer unabhängigen, stromgeführten Fahrweise ist durch die Größe des Wärmespeichers und den limitierten Wärmebedarf des Versorgungsobjekts Grenzen gesetzt. Ziel dieses Projekts ist es, Optimierungspotenziale zur Effizienzsteigerung von Mikro-KWK-Systemen aufzuzeigen und eine energiewirtschaftliche Bewertung durchzuführen. Dazu wurden mittels Prüfstands-Untersuchungen (Abb. 90) und Feldmessungen zahlreiche Messdaten gewonnen, mit denen das Betriebsverhalten und die Effizienz von Mikro-KWK-Systemen analysiert und bewertet werden können. Schließlich sollen Mikro-KWK-Systeme zukünftig aktiv am Smart Grid bzw. am Strommarkt teilnehmen können. Dazu werden sie informationstechnisch vernetzt und zu sogenannten virtuellen Kraftwerken zusammengefasst.

Auch ist der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen zur kurzfristigen Lieferung von elektrischer Regelleistung wünschenswert, weil sie einen Beitrag zur Netzstabilität und somit zur Versorgungssicherheit leistet.

Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie [42]

Das Forschungsprojekt umfasst die messtechnische Analyse von Mini- und Mikro KWK Systemen, numerische Untersuchungen der Systeme im Verbund, eine Feldtestphase sowie die Erstellung und Optimierung eines übergeordneten Regelregimes mit Einbeziehung der

Eine weitere Zielsetzung der Forschungsprojekte ist die Netzintegration der KWK und zwar auf der Strom- und Wärmeseite. Auf der Stromseite werden viele kleine Anlagen über eine Kommunikationsschnittstelle zu einem virtuellen Kraftwerk zusammengeführt. Auf der Wärmeseite betritt man Neuland, wenn viele KWK-Anlagen an verschiedenen Stellen in ein Wärmenetz oder evtl. sogar in einen Wärmespeicher einspeisen. Die Ergebnisse sind jedoch vielversprechend.

Ein besonderes Merkmal der KWK in Verbindung mit Strom- und Wärmespeicher ist die zeitlich unabhängige Stromerzeugung und die Möglichkeit die Erzeugung dem Bedarf anzupassen. Diesen Vorteil der KWK noch besser zu nutzen und durch neue Betriebs- und Betreibermodelle zu optimieren, ist die Zielsetzung einiger der oben genannten Forschungsvorhaben.

Die wachsende Zahl von Prosumern – Bürger die sowohl Stromerzeuger als auch Stromverbraucher sind – sind gefangen in einem starren Verbraucherpreis und -Vergütungssystem, das es gilt gerecht, kostenorientiert und verbraucherfreundlich umzugestalten. Dies kann nur durch variable Strompreise und Einspeisevergütungen erfolgen. Dieses Thema behandeln einige Forschungsprojekte. Die unterschiedlichsten Reaktionen der Prosumer auf Preissignale wurden betrachtet. Es hat sich nicht nur das Verhalten hinsichtlich ihres zeitlichen Stromverbrauchs geändert, sondern der Stromverbrauch selbst ist durch den bewussteren Umgang und durch die Marktanreize zurückgegangen.

Aus den KWK-nahen Forschungsprojekten ergeben sich daher Trends zu

- regenerativen KWK-Systemen vor allem mit Abwärme, Abfällen und regenerativen Sondergasen,
- Netzintegration durch virtuelle Kraftwerke,
- ökonomischer Betriebsoptimierung einzelner KWK-Anlagen mit Speicher,
- variablen Strompreisen und Einspeisevergütungen und Zugang zu den verschiedenen Märkten wie z. B. dem Regelenergiemarkt.

9.5 Ausblick

Die bisherigen Forschungsergebnisse sind vielversprechend und könnten der KWK zu einem Aufschwung verhelfen, wenn die Forschungstrends konsequent in die Praxis umgesetzt werden. Die Initiative zu breiter Anwendung wird weder vom einzelnen KWK-Betreiber noch von den großen Versorgern der Energiewirtschaft ausgehen. Gefragt sind neben kommunalen Versorgern und Unternehmen vor allem regionale Bürger-Initiativen und -Zusammenschlüsse wie z. B. die Bürger-Energiegenossenschaften, die auch KWK-Projekte umsetzen und finanziell tragen – allerdings auch den Nutzen daraus ziehen sollen. Den Kommunen mit oder ohne Stadt- oder Gemeindewerke kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Mit einer Beteiligung an regionalen Energieprojekten übernehmen sie einen aktiven Part bei der Umsetzung und erleichtern dadurch die Akzeptanz in der Bevölkerung.

Bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen muss die Politik die nötigen Rahmenbedingungen schaffen. Dies geschah in den letzten Jahren durch das EEG und das KWK-Gesetz. Der Ausbau der KWK kam dadurch aber nicht entscheidend voran. Die geplante EEG-Umlage auf die Eigenstromerzeugung ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Politik das Ausbauziel der KWK nicht ernsthaft genug verfolgt. Gefragt sind ein gesetzlicher Rahmen für ein Strommarktdesign, das die oben genannten Forschungstrends umsetzt und dadurch die Marktmacht des Prosumers stärkt.

10 Serviceteil

10.1 Förderung

Vor der Auftragsvergabe sollten die verschiedenen Finanzierungshilfen ausgeschöpft (KfW-Programm 151, 430) und Fördermittel beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, Kap. 1.4) für Mini KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} beantragt werden. Die dazu notwendigen Daten kommen vom Lieferanten bzw. vom Hersteller des BHKW. Die Antragsformulare können unter www.bafa.de und kfw-foerderbank.de abgerufen werden.

10.2 Baugenehmigung

Eine Baugenehmigung für ein BHKW wird in den einzelnen Bundesländern sehr unterschiedlich gehandhabt. Zum Beispiel ist in Niedersachsen eine Baugenehmigung nur für BHKW mit einer elektrischen Leistung größer als 50 kW erforderlich. Die unterschiedliche Vorgehensweise kann den Landesbauordnungen entnommen werden.

10.3 Zulassung und Meldung nach dem KWK-Gesetz

Das BAFA erteilt als zuständige Stelle auf Antrag die Zulassungen für KWK-Anlagen. Für serienmäßig hergestellte kleine KWK-Anlagen bis 2 MW_{el} sind dem BAFA neben dem Inbetriebnahme-Protokoll geeignete Unterlagen des Herstellers vorzulegen, aus denen die thermische und elektrische Leistung sowie die Stromkennzahl hervorgehen. Für KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 10 kW erteilt das BAFA in Form einer Allgemeinverfügung die Genehmigung.

Für den Strom aus einer KWK-Anlage werden Zuschläge bezahlt (Abb. 12). Die Strommenge muss dann bis zum 31.03. des Folgejahres ebenfalls beim BAFA gemeldet werden. Das BAFA verzichtet auf alle Jahresmitteilungen für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 10 kW_{el}. Die Zulagen werden dann für den ganzen Förderzeitpunkt einmalig ausbezahlt.

10.4 Energiesteuerentlastung

Falls Heizöle, Erdgas und andere Heizstoffe in KWK-Anlagen mit einem Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % eingesetzt werden, so sind diese energiesteuerfrei, bzw. die beim Kauf enthaltene Energiesteuer – früher Mineralölsteuer – wird auf Antrag zurückerstattet. Die Antragsformulare nach § 53 EnergieStG sind bei den Hauptzollämtern verfügbar.

10.5 Stromlieferung

Der Betreiber einer KWK-Anlage ist verpflichtet, die Aufnahme der Stromversorgung, z. B. von Mietern, der Bundesnetzagentur in Bonn anzuzeigen (sog. Anzeige der Energiebelieferung nach § 5 EnWG). Das Formblatt kann bei der Bundesnetzagentur (bundesnetzagentur.de) abgerufen werden kann.

10.6 Anmeldung beim örtlichen Stromversorger (Netzbetreiber)

Bevor das BHKW an das örtliche Stromverteilnetz angeschlossen werden kann, muss eine Anmeldung des BHKW beim örtlichen Stromversorger erfolgen. Dabei ist die Zulassung der BAFA hilfreich. Man erhält Formulare zum Abschluss eines Netzanchluss- und eines Anschlussnutzungsvertrags. Die Formulare sind je nach Unternehmen unterschiedlich.

Versorgt der BHKW-Betreiber seine eigenen Stromabnehmer, muss er für den Zusatzstrom aus dem öffentlichen Netz einen gesonderten Stromliefervertrag abschließen. Dieser Stromversorger muss nicht der örtliche, sondern kann auch ein bundesweit tätiger Ökostromlieferant sein.

10.7 Ausschreibungsbeispiel für ein Energieliefer-Contracting

Die Wärme- und Stromversorgung von Liegenschaften muss nicht in eigener Regie organisiert werden. Es kann sich im Rahmen eines Energieliefer-Contractings auch eine externe Vergabe anbieten. Damit wird das eigene Investitions-Budget entlastet und eine moderne und energieeffiziente Technik genutzt. Der beauftragte Contractor übernimmt die Modernisierung, die Finanzierung, die Instandhaltung und den Betrieb der Heizzentrale und liefert dem Bedarfsprofil der Liegenschaft entsprechend gegen Entgelt Wärme und Strom aus einem Blockheizkraftwerk. Hierzu seien nur zwei Internetadressen genannt (www.hessenenergie.net, www.berliner-impulse.de). Dort liegen entsprechende Ausschreibungsunterlagen bereit. Diese können mit den eigenen Objektdaten versehen und an interessierte Contractoren (siehe unter www.vfw.de) zur Angebotsabgabe verschickt werden.

11 Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis

11.1 Zitierte Literatur

- [1] EntschlieÙung des Europäischen Parlaments vom 12. September 2013 zur Strom- und Wärme-erzeugung in kleinem und kleinstem Maßstab (2012/2930(RSP))
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=TA&reference=P7-TA-2013-0374&language=DE&ring=B7-2013-0388>
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin (Hrsg.): Entwurf eines Gesetzes zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften des Energiewirtschaftsrechts. Referentenentwurf. Stand: 31. März 2014.
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf
- [3] <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform.html>
- [4] Vogtmann, M. (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS). Landesverband Franken e.V., Nürnberg): PV-Eigenstromnutzung in Gewerbe und Kommunen. In: C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing (Hrsg.): Bauen und Sanieren für die Zukunft – nachhaltig und energieeffizient. Straubing, 31. März 2014. 21. C.A.R.M.E.N-Forum. S. 59–82
<http://www.carmen-ev.de/infothek/presse/aktuell/877-21-c-a-r-m-e-n-forum>
- [5] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme(ISE), Freiburg im Breisgau (Hrsg.): Stromgestehungs-kosten Erneuerbare Energien. November 2013. 48 S.
<http://www.ise-fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf>
- [6] Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, Berlin (Hrsg.): Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinshaftswerk für die Zukunft. 30. Mai 2011. 48 S.
http://www.bmbf.de/pubRD/2011_05_30_abschlussbericht_ethikkommission_property_publicationFile.pdf
- [7] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG) 2002. Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 19. März 2002 (BGBl. I S. 1092), das zuletzt durch Artikel 4 Absatz 77 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.
- [8] <http://www.buzzn.net/> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [9] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002.
- [10] FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg): Das Stromnetz wird zum Marktplatz. BINE Projektinfo 06/2011
- [11] FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg): Blockheizkraftwerke intelligent steuern. BINE Projektinfo 08/2013
- [12] FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg): Das Stromnetz wird interaktiv. BINE Projektinfo 07/2011
- [13] FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg): Landkreis Harz erprobt Stromversorgung der Zukunft. BINE Projektinfo 13/2012

- [14] FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.): Ländliches Stromnetz smart geregelt. BINE Projektinfo 12/2012
- [15] <http://www.bioenergie-doefer.de> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [16] Hochleistungskeramik pusht Mikrogasturbinen. Effiziente Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung. Kraft-Wärme-Kopplung als Zukunft. Neue Serie Teil XVII: Mit Contracting ökologische und ökonomische Potentiale freisetzen. In Heizungsjournal. (2013), H. 11, S. 44–46.
- [17] Turbinenkonzept: Kompaktes Design für dezentrale Gasturbinen. <http://kraftwerkforschung.info/turbinenkonzept-kompaktes-design-fuer-dezentrale-gasturbinen/page/0/>
- [18] Energiespeicher – Forschungsinitiative der Bundesregierung <http://forschung-energiespeicher.info>
- [19] GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme <http://www.iinas.org/gemis-de.html>
- [20] Umweltbundesamt (UBA), Berlin; Öko-Institut e.V., Freiburg i.Br. (Hrsg.): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas). Stand: Dez. 2013.
- [21] Burkhardt, J.; Feck, N.; Große-Böckmann, Th. u. a.: CO₂-Emissionen der Stromerzeugung: Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken. In: BWK. Das Energie-Fachmagazin. Bd. 59 (2007), Nr. 10, S. 44–51
- [22] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef (Hrsg.): DWA-M 115-1 Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers, Teil 1: Rechtsgrundlagen. 02/13 DWA-M 115-2 Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers, Teil 2: Anforderungen. 02/13 ATV-DVWK-M 115-3 Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers, Teil 3: Praxis der Indirekteinleiterüberwachung. 08/04 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef (Hrsg.): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 252. August 2012
- [23] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Bonn (Hrsg.): Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung. Arbeitsblatt G 262. Ausgabe 09/2011
- [24] Genaue Zinssätze unter: www.kfw-foerderbank.de
- [25] <http://www.next-kraftwerke.de/> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [26] <http://www.bundesnetzagentur.de> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [27] <http://www.energieagentur-lippe.de> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [28] <http://www.energy-consulting-meyer.de> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [29] <http://www.lichtblick.de/privatkunden/bhkw/> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [30] <http://www.connected-living.org/projekte/shape/projektbeschreibung/> (Link aufgerufen am 28.07.2014)
- [31] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/weiterentwicklung-alternativer-motorkonzepte/>

- [32] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/orc-dampfexpansionsmotor-nutzt-abwaerme-zur-effizienten-verstromung/>
- [33] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/thermische-speicher-fuer-die-flexibilisierung-von-kwk-anlagen/>
- [34] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/kostengunstiger-fernwaermetransport-fuer-den-ausbau-der-kraft-waerme-kopplung/>
- [35] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/energiezentrale-universitaetsklinikum-giessen/>
- [36] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/marktfaehigkeit-hocheffizienter-kwk-anlagen-lowex-fernwaerme/>
- [37] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/feldversuch-orc-prozesse/>
- [38] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/entwicklung-innovativer-abwaermeverbundsysteme-fuer-kleinteilige-gewerbegebiete/>
- [39] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/intelligente-vernetzung-von-stadtinfrastrukturen-smart-power-hamburg/>
- [40] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/smart-energy-management-intelligentes-energiemanagement-von-strom-gas-waerme-und-kaelte/>
- [41] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/optimierung-des-betriebs-von-mikro-kwk-systemen/>
- [42] BINE Information EnEff:Stadt: <http://www.eneff-stadt.info/de/neue-technologien/projekt/details/virtuelles-kraftwerk-auf-basis-der-mini-und-mikro-kwk-technologie/>

11.2 Abbildungsverzeichnis

Alle hier nicht aufgeführten Abbildungen stammen vom Autor, W. Suttor, oder den Autoren der vorherigen Auflagen.

- Abb. 1 Energie-ImpulsE. Zeitschrift des Berliner ImpulsE Programms. (2004), H. 4.
- Abb. 4 Pellet-Holzvergaser mit Stirlingmotor: ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs-GmbH, Niederkappel (Österreich)
Biogasanlage in Werlte: Fa. Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, Göttingen
Pflanzenöl BHKW: MANN Naturenergie GmbH & Co. KG, Langenbach
PEM-Hausenergiezentrale: BAXI INNOTECH GmbH, Hamburg
- Abb. 5 Association for the Study of Peak Oil and Gas – ASPO Deutschland e. V., Ottobrunn
(mit Wikipedia-Creative-Commons-Lizenz)
- Abb. 7 Daten: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (Hrsg.): Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte. Fachserie 17, Reihe 2.
Die Umrechnung des Index auf absolute Preise erfolgt nach: Schiffer, H.-W.: Deutscher Energiemarkt 2001. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen. (2002), H. 3, S. 160–174

- Abb. 8 nach [5]
- Abb. 9 Datenmaterial: Eurostat: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- Abb. 13 Datenmaterial: <http://www.eex.de>
- Abb. 18, 75 Lichtblick SE, Hamburg
- Abb. 19 RWE Deutschland AG, Essen
- Abb. 20 Mini-KWK-Konferenz des Bundesverbandes Kraft-Wärme-Kopplung am 21.11.2013
- Abb. 23 [33] Autor und SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Schweinfurt
- Abb. 25 Suttor, K.-H.; Suttor, W.: Die KWK-Fibel. Gräfelting: Resch, 1993. ISBN 3878261161, S. 23
- Abb. 26 KAWASAKI Gas Turbine Europe GmbH, Bad Homburg
- Abb. 27 Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG, Mainz (Hrsg.): Technische Information »Kraftwerk 3«. Sept. 2002
- Abb. 28 Schmack Biogas Komponenten GmbH, Kirchweidach
- Abb. 29, 30, 51, 61 Köhler & Ziegler Anlagentechnik, Lollar
- Abb. 31, 32 OTAG Vertriebs GmbH + Co. KG, Olsberg
- Abb. 34 Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien (Österreich) (Hrsg.): Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung. Cogeneration (CHP) a Technology Portrait. 2010. 176 S. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 34/2010, S. 57
- Abb. 35, 36 AEM Aktives Energiemanagement GmbH, Heek, jetzt: 2G Energy AG, Heek
- Abb. 37 BAXI INNOTECH GmbH, Hamburg
- Abb. 38 Sulzer Hexis AG, Winterthur (Schweiz)
- Abb. 39 InvenSor GmbH, Berlin
- Abb. 40 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin (Hrsg.): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013. Grafiken und Tabellen. Stand: Februar 2014. Unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
- Abb. 43 Daten aus GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme)
- Abb. 46 VDMA Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt/Main
- Abb. 47, 57, 66, 68 Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE), Kaiserslautern (Hrsg.): Blockheizkraftwerke Kenndaten 2011
- Abb. 50, 52 Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE), Kaiserslautern (Hrsg.): BHKW-Grundlagen. 1999. S. 16, S. 19

- Abb. 58 EAW Energieanlagenbau GmbH, Westenfeld
- Abb. 59 Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE), Garching
- Abb. 62, 63 Solar Consulting GmbH, Agentur für nachhaltige Kommunikation, Freiburg
- Abb. 72 Spanner Re² (Renewable Energy Experts) GmbH, Neufahrn i. NB
- Abb. 76, 77 Grundlage: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin (Hrsg.): Energie dreifach nutzen. Strom, Wärme und Klimaschutz. Ein Leitfaden für kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Mini-KWK). Juli 2008 mit Anpassungen durch den Autor
- Abb. 78 Vattenfall Europe Wärme AG, Berlin
- Abb. 82 Jürgen Escher, COMUNA-metall Vorrichtungs- und Maschinenbau GmbH, Enger
- Abb. 83 DeVeTec GmbH, Saarbrücken
- Abb. 84 MVV Energie AG, Mannheim
- Abb. 85 Stadtwerke Gießen AG
- Abb. 86, 87 Energieversorgung Halle (EVH) GmbH
- Abb. 88, 89 Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen
- Abb. 90 Technische Universität München. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
- Abb. 91 TU Dresden. Institut für Energietechnik. Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

12 Forschungsvorhaben der Bundesregierung

Im Folgenden werden Forschungsvorhaben zum Thema »Blockheizkraftwerke« vorgestellt, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert werden.

Einen umfassenden Überblick über die Projekte der Energieforschung finden Sie auch in der Datenbank »Förderkatalog« im Internet unter www.foerderkatalog.de.

Die Sortierung der Projekte erfolgt nach dem Förderkennzeichen (FKZ).

12.1 Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben

EnEff:Wärme – ORCent – Dampfexpansionsmotor für die Nutzung niedertemperierter Wärmeströme – Phase 2: Feldtest.

DeVeTec GmbH

FKZ 0327436D, Laufzeit 01.11.2009 – 28.04.2014

EnEff:Wärme – Untersuchung und Weiterentwicklung alternativer Motorkonzepte.

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Institut für Verbrennungskraftmaschinen

FKZ 0327436G, Laufzeit 01.07.2010 – 30.11.2014

EnEff:Wärme – ORC-Prozesse zur Abwärmenutzung an BHKW-Motoren – Phase 2.

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen

FKZ 0327436H, Laufzeit 01.02.2013 – 31.01.2016

Verbundprojekt: Emulsionen in Nahwärmesystemen.

Emulsionen aus Paraffinen und Wasser für Anwendungen in Versorgungssystemen der Gebäudetechnik – Teilprojekt Wärmenetze.

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen

FKZ 0327471A, Laufzeit 01.07.2009 – 30.11.2013

Emulsionen aus Paraffinen und Wasser für Anwendungen in Versorgungssystemen der Gebäudetechnik – Teilprojekt TGA.

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. E.ON Energy Research Center – Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate

FKZ 0327471B, Laufzeit 01.07.2009 – 30.11.2013

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – Absorptionskälteanlage für Niedertemperatur-Fernwärme. Entwicklung einer Pilotanlage.

Technische Universität Ilmenau. Fakultät für Maschinenbau – Fachgebiet Thermo- und Magnetofluid-dynamik

FKZ 0327496A, Laufzeit 01.04.2009 – 30.09.2013

Bau einer Pilotanlage.

TWA Wärmeeinrichtungen Thüringen GmbH & Co. KG, Bad Blankenburg

FKZ 0327496B, Laufzeit 01.04.2009 – 30.09.2013

EnEff:Wärme – Kostengünstiger Fernwärmetransport für den effektiven Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.

MVV Energie AG, Mannheim. Konzernabt. Technologie und Innovation

FKZ 0327870A, Laufzeit 01.12.2009 – 30.06.2014

EnEff:Wärme – Errichtung und Betrieb einer integrierten Energiezentrale am Universitätsklinikum Gießen-Marburg am Standort Gießen.

Energiezentrale Universitätsklinikum Gießen

FKZ 0327874A, Laufzeit 01.01.2010 – 31.12.2014

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – Smart Power Hamburg.

Erstellung des Betriebskonzeptes und Pilotphase.

Hamburg Energie GmbH, Hamburg

FKZ 03ET1002A, Laufzeit 01.01.2011 – 31.12.2015

Grundlagenuntersuchungen zu Betriebskonzepten.

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Fakultät Technik und Informatik (TI). Competence Center Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (CC4E)

FKZ 03ET1002B, Laufzeit 01.01.2011 – 31.12.2015

Beiträge der RWTH Aachen zu Betriebsstrategien (TP1, TP6, TP8).

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fakultät 6 – Elektrotechnik und Informationstechnik. Institut für Hochspannungstechnik

FKZ 03ET1002C, Laufzeit 01.01.2011 – 31.12.2015

EnEff:Wärme – LowEx-FW-Systeme – Breitenanwendung von Niedertemperatursystemen für eine nachhaltige Wärmeversorgung.

SWM Services GmbH, München

FKZ 03ET1005A, Laufzeit 01.01.2011 – 30.06.2014

Verbundprojekt: Dezentrale Einspeisung in Nah- und Fernwärmesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Solarthermie.

AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Frankfurt am Main

FKZ 03ET1039A, Laufzeit 01.06.2011 – 31.05.2014

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Energietechnik – Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

FKZ 03ET1039B, Laufzeit 01.09.2011 – 31.08.2014

Steinbeis Forschungs- und Innovationszentren GmbH. Solites Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart

FKZ 03ET1039C, Laufzeit 01.01.2012 – 31.12.2014

EnEff:Wärme – »Energieeffizientes Duisburg« – ein Modell für die ressourcen- und klimaschonende Wärmeversorgung von Ballungsräumen.

Stadtwerke Duisburg AG, Duisburg

FKZ 03ET1040A, Laufzeit 01.01.2012 – 31.01.2014

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – Thermische/elektrische KWK-Vernetzung.

Regionales, virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie, intelligente Vernetzung von thermischen und elektrischen Verbrauchersystemen.

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Energietechnik. Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

FKZ 03ET1042A, Laufzeit 01.11.2011 – 31.10.2014

Optimierung von Mikro-KWK-Systemen: Mit methodischen und experimentellen Ansätzen sollen Auslegung und Betrieb von Mikro-KWK-Systemen optimiert werden.

Technische Universität München. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

FKZ 03ET1042B, Laufzeit 01.11.2011 – 30.04.2015

Simulation und automatisierungstechnische Optimierung eines virtuellen Kraftwerks auf Basis der KWK-Technologie.

Technische Universität Bergakademie Freiberg. Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik. Institut für Automatisierungstechnik

FKZ 03ET1042C, Laufzeit 01.11.2011 – 31.10.2014

EnEff:Wärme – Dezentrale Stromversorgungskonzepte.

Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e. V., München

FKZ 03ET1042D, Laufzeit 01.12.2011 – 31.03.2015

Simulationsbasierte Optimierung energieeffizienter Wärmenetze mit Umsetzung in EnEff:Stadt Ludwigsburg.

Hochschule für Technik Stuttgart. Fachbereich Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft
FKZ 03ET1057A, Laufzeit 01.10.2011 – 30.09.2014

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – ResoFreeze – Neuartiges Anlagenkonzept zur Kältelieferung im Bereich unter 0°C mittels Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK).

Phase 1: Entwicklung eines demonstrationstauglichen Funktionsmusters.

Makatec GmbH, Bondorf

FKZ 03ET1121A, Laufzeit 01.10.2012 – 09.12.2013

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Energietechnik. Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

FKZ 03ET1121B, Laufzeit 01.10.2012 – 30.09.2014

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – HEATLOOP – Entwicklung und Implementierung innovativer Abwärmeverbundsysteme in industriellen Gewerbegebieten.

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen

FKZ 03ET1142A, Laufzeit 01.11.2012 – 31.10.2014

Ruhr-Universität Bochum. Fakultät für Maschinenbau. Institut für Energietechnik. Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE)

FKZ 03ET1142B, Laufzeit 01.11.2012 – 31.10.2014

Stadtwerke Bochum Holding GmbH, Bochum

FKZ 03ET1142C, Laufzeit 01.11.2012 – 31.10.2014

EnEff:Wärme – Integrales Energie- und Wärmekonzept für Jena 2050.

Stadtwerke Energie Jena-Pöbneck GmbH. Projektleitung Energie- und Wärmekonzept

FKZ 03ET1146A, Laufzeit 01.11.2012 – 30.04.2015

Verbundprojekt: Cluster »HighTech-LowEx Energieeffizienz Berlin-Adlershof 2020«.

Teilvorhaben EnEff:Wärme – Wärmeversorgung »Wohnen am Campus« aus einem Rücklauf-Niedertemperaturnetz mit Einbindung von regenerativen Energien. Umsetzung.

BTB Blockheizkraftwerks-, Träger- und Betreibergesellschaft mbH, Berlin

FKZ 03ET1155A, Laufzeit 01.01.2013 – 31.08.2015

Teilvorhaben EnEff:Wärme – Wärmeversorgung »Wohnen am Campus« aus einem Rücklauf-Niedertemperaturnetz mit Einbindung von regenerativen Energien. Monitoring.

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Energietechnik. Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

FKZ 03ET1155B, Laufzeit 01.01.2013 – 31.08.2015

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – Nahwärme und -kälte aus Abwasser zur Versorgung eines Niedrigstenergiestadtquartiers, modellhafte Umsetzung im Neckarpark, Stuttgart.

Teilvorhaben A: Konzeption und bauliche Umsetzung.

Landeshauptstadt Stuttgart. Amt für Umweltschutz

FKZ 03ET1156A, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2017

Teilvorhaben: Wissenschaftliche Begleitung und Monitoring.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart

FKZ 03ET1156B, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2017

Verbundprojekt: EnEff:Wärme – Feldtest Absorptionskältetechnik für KWKK-Systeme,

Schwerpunkte: Koordination, Monitoring, Optimierung, Begleitforschung.

Technische Universität Berlin. Institut für Energietechnik. Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagen-technik. Sekr. KT2

FKZ 03ET1171A, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2018

Schwerpunkte: Modelle, Simulationen, Wechselwirkungen mit Nah- und Fernwärmenetzen.

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Energietechnik. Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

FKZ **03ET1171B**, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2018

Schwerpunkte: Betriebskonzepte, Regelwerke.

AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Frankfurt am Main

FKZ **03ET1171C**, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2018

Schwerpunkte: Planungskonzepte, Richtlinien.

Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung (BTGA) e. V., Bonn

FKZ **03ET1171D**, Laufzeit 01.05.2013 – 30.04.2018

EnEff:Wärme – Der Beitrag thermischer Speicher zur Steigerung der Energieeffizienz, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit der Fernwärme- und Stromerzeugung in KWK-Anlagen.

Technische Universität Berlin. Fakultät III – Prozesswissenschaften. Institut für Energietechnik – Fachgebiet Energietechnik und Umweltschutz

FKZ **03ET1188A**, Laufzeit 01.07.2013 – 30.06.2016

12.2 Forschungsberichte

Forschungsberichte aus dem naturwissenschaftlich-technischen Bereich werden zentral von der Technischen Informationsbibliothek (TIB) in Hannover gesammelt und können dort ausgeliehen werden.

Viele Forschungsberichte stehen als PDF-Dokumente zum Download zur Verfügung. Sie können im OPAC der UB/TIB Hannover recherchiert werden unter

www.tib.uni-hannover.de/

Die Bestelladresse für Forschungsberichte lautet:

Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), Postfach 60 80, 30060 Hannover

Wärmeversorgung in kleinteiligen Strukturen. »Wohnen am Campus« – Berlin-Adlershof. Abschlussbericht.

Blockheizkraftwerks-Träger- und Betreibergesellschaft (BTB) mbH, Berlin

Juni 2013. 161 S., FKZ [03ET1038B](#)

Verbundprojekt: Entwicklung von PEM-Brennstoffzellensystemen mit Hochtemperaturmembranen.

DBi Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig; Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik; Technische Universität Bergakademie Freiberg; inhouse engineering GmbH, Berlin

[2009]. 39 S., FKZ [0327141H](#), [2009]. 105 S., FKZ [0327141I](#), [2009]. 49 S., FKZ [0327141J](#), [2009]. 69 S., FKZ [0327141K](#)

Entwicklung einer Hausenergiezentrale auf Basis einer PEM-Brennstoffzelle.

BAXI INNOTECH GmbH, Hamburg

[2010]. 39 S., FKZ [0327143D](#)

Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Monitorings von einer stationären Brennstoffzelle. Schlussbericht.

Badenova WärmePlus GmbH & Co. KG, Freiburg (Auftraggeber); Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg. Abt. Thermische Anlagen und Gebäudetechnik. Gruppe Solares Bauen (Auftragnehmer)

Febr. 2011. 53 S., FKZ [0327143V](#)

Einbindung von Brennstoffzellen-Heizgeräten in das prototypische dezentrale Energiemanagement System der EWE Aktiengesellschaft.

EWE AG, Oldenburg. Abt. Vertrieb Energiedienstleistungen

2010. 28 S., FKZ [0327143W](#)

Implementierung eines BAXI Brennstoffzellen-Heizgerätes zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung einer Gasdruckregel- und Messanlage.

Stadtwerke Homburg GmbH
[2009]. 61 S., FKZ [0327143Z](#)

ORC-Pilotanlage. Forschungskurzbericht.

DeVeTec GmbH, Saarbrücken
[2009]. 60 S., FKZ [0327436A](#)

Entwicklungs-Demonstrationsprojekt mit Feldversuch »ORC-Prozesse zur Abwärmenutzung an BHKW-Motoren«. Abschlussbericht.

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen
2013. 218 S., FKZ [0327436C](#), Signatur: F13B1825

Forschungsvorhaben Fernwärmemodellstadt Ulm. EnEff:Wärme – Exergetische Optimierung der Fernwärmeversorgung Ulm.

Fernwärme Ulm GmbH
Okt. 2012. 114 S., FKZ [0327447A](#)

Verbundprojekt Eneff:Wärme – Absorptionskälteanlage für Niedertemperaturfernwärme. Entwicklung einer Pilotanlage. Abschlussbericht.

Universität Ilmenau. Institut für Thermo- und Fluidodynamik
[2014]. FKZ [0327496A](#)
TWA Wärmeanlagenbau Thüringen GmbH & Co. KG, Bad Blankenburg
[2013]. 12 S., FKZ [0327496B](#)

Entwicklung und Betrieb einer Brennstoffzelle in einer Kläranlage in Stuttgart.

Landeshauptstadt Stuttgart. Amt für Umweltschutz
2011. 34 S., FKZ [0327738](#)

Entwicklung eines 1 kW SOFC Brennstoffzellen-Heizgerätes (Kraft-Wärme-Kopplung) auf Basis einer SOFC Kernkomponente, die in mikroKWK Systemen und mobilen Bordstromversorgungen (APU) eingesetzt werden kann. Öffentlicher Abschlussbericht.

Vaillant GmbH, Remscheid
Juli 2010. 29 S., FKZ [0327750](#)

Entwicklung und Betrieb einer Brennstoffzelle im Klärwerk Moosburg.

Kläranlage Moosburg GmbH
[2010]. 23 S., FKZ [0327757](#)

Einsatz einer Karbonat-Brennstoffzelle zur Energieversorgung einer Braustätte mit direkter Nutzung von eigenem Biogas.

Privatbrauerei Erdinger Weißbräu Werner Brombach GmbH, Erding
2013. 16 S., FKZ [0327815](#)

Eneff:Stadt – Chancen und Risiken von KWK im Rahmen des IEKP. Teilprojekt: Flex – Flexible Betriebsweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

Stadtwerke München; EWE AG, Oldenburg (Auftraggeber); Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e. V., München (Auftragnehmer)
Nov. 2012. 169 S., FKZ [0327832A](#)

Eneff:Stadt – Verbundprojekt Netze. Teilprojekt: Smart Energy Management. Intelligentes Energiemanagement von Strom – Gas – Wärme – Kälte. Abschlussbericht.

Technische Universität Dresden. Institut für Energietechnik
Dez. 2012. 372 S., FKZ [0327832C](#)

13 Weiterführende Literatur

Dieses Literaturverzeichnis weist auf deutschsprachige Publikationen hin, die im Buchhandel oder bei den angegebenen Bezugsadressen erhältlich sind. Die Titel können in öffentlichen Bibliotheken, Fach- und Universitätsbibliotheken ausgeliehen werden. Das Verzeichnis ist alphabetisch nach Autoren oder Herausgebern sortiert.

13.1 Kraft-Wärme-Kopplung, Blockheizkraftwerke, Mini-Blockheizkraftwerke

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V., Berlin (Hrsg.); Stadt Frankfurt. Energiereferat (Hrsg.):

BHKW-Kenndaten 2011. Module, Anbieter, Kosten.

2011. 64 S.

Die vorliegende Broschüre ist eine Aktualisierung der vorherigen Version »BHKW-Kenndaten 2005«. An der Erhebung von technischen Daten und Richtpreisen haben sich über 40 Anbieter mit Angaben zu mehr als 800 auf dem Markt angebotenen BHKW-Anlagen mit Verbrennungsmotor als Antriebsaggregat beteiligt.

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V., Berlin (Hrsg.):

Das KWK-Gesetz 2012. Grundlagen, Förderung, praktische Hinweise.

2012. 28 S.

Das KWK-Gesetz stellt ein wesentliches Instrument zur Erreichung der anvisierten Effizienz- und Klimaschutzziele der Bundesregierung dar und gilt als Weichenstellung zum beschleunigten Ausbau dieser effizienten Technologie. Vorrangiges Ziel ist es, den KWK-Anteil an der Stromproduktion auf 25 % bis zum Jahr 2020 zu erhöhen. Die Broschüre der ASUE zum KWK-Gesetz 2012 stellt die Neuerungen im Gesetz dar.

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V., Berlin (Hrsg.):

Einbindung von kleinen und mittleren Blockheizkraftwerken / KWK-Anlagen. Hydraulik – Elektrik – Regelung.

2007. 28 S.

Blockheizkraftwerke bzw. Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind eine effiziente Technik, um Objekte sowohl mit Wärme als auch mit elektrischem Strom zu versorgen. Bei der Integration in die Energieversorgung, z. B. zur Beheizung von Gebäuden oder zur Brauchwassererwärmung, sind einige Punkte zu beachten, um einen sicheren und möglichst sparsamen Betrieb zu gewährleisten. In der Broschüre werden Beispiele vorgestellt, wie BHKW und KWK-Anlagen in Kombination mit einem Pufferspeicher oder unterschiedlichen Kesseln geplant werden können. Weiterhin werden Beispiele der elektrischen Einbindung vorgestellt. Die Broschüre richtet sich in erster Linie an Planer, Energieberater, Installateure, Energieversorgungsunternehmen und Betreiber.

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V., Berlin (Hrsg):

Virtuelle Kraftwerke.

Nov. 2010. 32 S.

Bachor, A.; Kirchner, A.:

Praxishandbuch Kraft-Wärme-Kopplung. Planung und Dimensionierung von Mini- und Mikro-KWK-Anlagen.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin (Hrsg.)

Berlin: Beuth Verl., 2015. ISBN 978-3-410-24352-6, 48,00 Euro

Der Titel erscheint laut Verlag im Februar 2015.

Brautsch, M.; Lechner, R.:

Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen. Abschlussbericht.

Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2013. 245 S., ISBN 978-3-8167-8932-1, 50,00 Euro

Forschungsinitiative Zukunft Bau. Bd. 2840

Vertrieb: Fraunhofer IRB Verlag, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Tel: 0711 970-2500

irb@irb.fraunhofer.de, www.baufachinformation.de/

Unter dem Druck steigender Energiekosten wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche technische Innovationen zur Verbesserung der Effizienz von Blockheizkraftwerken (BHKW) entwickelt. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von BHKW-Anlagen von bis zu 20 Jahren sind viele Bestandsanlagen jedoch noch auf einem vergleichsweise alten technischen Stand und nutzen ihr Effizienzpotenzial nicht voll aus. Hinzu kommt, dass aufgrund von Nutzungsänderungen oder Erweiterungen bestehender Gebäude und veränderter wirtschaftlicher und gesetzlicher Rahmenbedingungen die ursprünglichen Erwartungen an Effizienz und Wirtschaftlichkeit nicht mehr erfüllt werden. Ziel des Vorhabens war es daher, aufbauend auf den realen Betriebsdaten 18 typischer BHKW-Anlagen, fallspezifisch Modellkonfigurationen zur Verbesserung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit herauszuarbeiten.

Broekmans, V.; Krämer, L.-M.:

Beitrag von zentralen und dezentralen KWK-Anlagen zur Netzstützung. Kurzstudie. Untersuchung im Auftrag des Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V. (B.KWK).

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung (B.KWK) e. V., Berlin (Hrsg).

Mai 2014. 39 S.

<http://www.bkwk.de/infothek/>

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung (B.KWK) e. V., Berlin (Hrsg):

Kraft-Wärme-Kopplung. Chance für Wirtschaft und Umwelt. 17. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V. Nürnberg, 15.–17. Januar 2008.

2013. 28 S., 1,50 Euro (Schutzgebühr)

Vertrieb: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung (B.KWK) e. V., Markgrafenstraße 56, 10117 Berlin, Tel.: 030 27019281-0, info@bkwk.de

Die Broschüre gibt einen kompakten Überblick über die Technik und Einsatzmöglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung. Verschiedene Anwendungsbeispiele runden die Informationen ab.

Energiewirtschaftsgesetz, Energiesicherungsgesetz, Erneuerbare-Energien-Gesetz, Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, Energieleitungsausbaugesetz, Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz, Anreizregulierungsverordnung, Systemstabilitätsverordnung. Textausgabe.

München: Deutscher Taschenbuchverl., 2013. 1.692 S., 11., überarb. Aufl., ISBN 9783423057530, 34,90 Euro

dtv Taschenbücher. Bd. 5753

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB), Stuttgart (Hrsg.):

Blockheizkraftwerke als Kleinkraftwerke.

Blockheizkraftwerke in der Energieversorgung.

2014 (aktuelle Zusammenstellung)

IRB-Literaturdokumentationen

<http://www.baufachinformation.de/literaturdokumentationen/suche/Blockheizkraftwerke>

IRB-Literaturdokumentationen (Fachbibliografien) bieten einen schnellen und umfassenden Überblick über die Fachliteratur zu vielen Themen aus allen Bereichen des Planens und Bauens. Sie enthalten Hinweise – meist mit kurzer Inhaltsangabe – auf Literatur aus Zeitschriften, Fachbüchern, Forschungsberichten etc. Von den darin enthaltenen einzelnen Veröffentlichungshinweisen gelangt man direkt zur Volltextbestellung.

Holland, S.:

Energieeffiziente Betriebsführung von Blockheizkraftwerken. Ein Projektierungsbeispiel aus der betrieblichen Praxis.

Saarbrücken: AV Akademikerverl., 2013. 80 S., ISBN 978-3-639-48549-3, 35,90 Euro

Jungbluth, C. H.:

Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem.

Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.)

2007. XI, 197 S., ISBN 978-3-89336-469-5

Schriften des Forschungszentrums Jülich. Energietechnik. Bd. 59

Kind, J.:

Photovoltaikanlage und Blockheizkraftwerk. Förderung sichern. Einnahmen erzielen. Steuern sparen. Umwelt entlasten.

Mannheim: Verl. Akademische Arbeitsgemeinschaft, 2013. 8., überarb. Aufl., ISBN 9783868174434, 13,99 Euro

Die Broschüre liefert alle Informationen, die bei der Entscheidung für eine Photovoltaikanlage oder ein Blockheizkraftwerk wichtig sind. Neben den bautechnischen Voraussetzungen der Immobilie und Informationen zur Planung geht der Ratgeber auch auf steuerliche Folgen ein.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart (Hrsg.):

KWK – Gute Beispiele in der Praxis.

Febr. 2012. 36 S.

Die Broschüre zeigt die Anwendung von KWK-Anlagen in verschiedenen Leistungsklassen und unterschiedlichen Objekten auf.

Schädlich, S.:

Kälte – Wärme – Klima Taschenbuch 2015.

Berlin: VDE Verl., Okt. 2014. ca. 320 S., ISBN 978-3-8007-3586-0, ca. 25,00 Euro

Auch im 48. Jahrgang beschäftigt sich das bekannte Nachschlagewerk mit den wichtigsten Arbeitsgrundlagen der Bereiche Kälte, Wärme und Klima. Neben Formeln, Stoffwerten und Umrechnungstabellen informiert das Taschenbuch über Veranstaltungen 2015 und Branchenadressen.

Schaumann, G.; Schmitz, K.-W. (Hrsg.):

Kraft-Wärme-Kopplung. Anlagenauswahl, Dimensionierung, Wirtschaftlichkeit, Emissionsbilanz.

Berlin: Springer Verl., 2010. XVI, 456 S., 4., bearb. u. erw. Aufl.

ISBN 978-3-642-01424-6, 127,99 Euro (Print)

ISBN 978-3-642-01425-3, 99,99 Euro (E-Book)

Mithilfe des Buches können die in Industriebetrieben, Gebäudekomplexen und Energieversorgungsunternehmen eingesetzten KWKK-Anlagen in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht beurteilt werden. Mit Beispielen wird die Vorgehensweise bei der Anlagenauslegung, der wirtschaftlichen Bewertung und der Aufstellung von Emissionsbilanzen erläutert. Es finden sich u. a. Arbeitshilfen für die Planung von Blockheizkraftwerken, Gasturbinen-Heizkraftwerken, Dampfturbinen-Heizkraftwerken sowie Wärmepumpen und Absorptions-/Adsorptionskälteanlagen. Weitere KWKK-Techniken, wie ORC-Anlagen, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen werden behandelt. Ebenso wird untersucht, wie regenerative Energien, z. B. Biomasse, mit KWKK effizienter genutzt werden können.

Steinborn, F.:

BHKW-Plan. Version <http://www.bhkw-plan.de/home/historie> 1.17.

MiniBHKW-Plan. Version 2.05

Vertrieb: Firma Steinborn innovative Gebäude-Energieversorgung, Rulfinger Str. 10, 70567 Stuttgart, Tel.: 0711 75864184, Fax: 0711 1202732

Neuerungen: Die Berechnung der Energieaufwandszahl wurde überarbeitet und neue Bewertung des BHKW-Stroms eingeführt. Der Berechnung nach EnEV 2014 für Energieaufwandszahl wurde eingeführt. Der Gebäudefilter für die EnEV integriert.

Thomas, B.:

Mini-Blockheizkraftwerke. Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten.

Würzburg: Vogel Industrie-Medien, 2011. 348 S., 2. Aufl., ISBN 978-3-8343-3211-0, 32,80 Euro

Mini-BHKWs sind ohne größeren baulichen Aufwand zu installieren und nahezu universell einsetzbar. Dargestellt werden Technologie und Leistungsfähigkeit der Mini BHKWs, aber auch die Erfordernisse für die Einbindung in die Hausinstallation und für den wirtschaftlichen Betrieb.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) – Gesellschaft Energie und Umwelt, Düsseldorf (Hrsg.):

Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen – Status und Perspektiven. VDI-Statusreport 2013.

Düsseldorf: VDI-Verl., 2013. 56 S., 25,00 Euro Schutzgebühr

Der VDI-Statusreport zeigt den Stand der Technik und die sich abzeichnenden Tendenzen auf. Des Weiteren gibt der Statusreport konkrete Hinweise für die Planung und Dimensionierung und die Betriebsweise dieser Systeme, die Abrechnung von Wärme- und Stromerzeugungskosten aus einer KWK-Anlage in einem Mehrfamilienhaus und stellt die gesetzlichen Rahmenbedingungen insbesondere hinsichtlich Förderung dieser Anlagen dar.

13.2 Stirling-Motoren

Schleder, F.:

Stirlingmotoren. Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung und Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren.

Würzburg: Vogel, 2011. 171 S., 4. Aufl., ISBN 978-3-8343-3195-3, 22,80 Euro

Dank seiner besonderen Eigenschaften für die Nutzung regenerativer Energien ist der Stirlingmotor heute gefragter denn je. Das Buch erläutert die technischen und thermodynamischen Grundlagen dieser Maschinen sowie verschiedene Verfahren zu deren Kreisprozessrechnung (Idealprozess und Schmidt-Analyse). Diese ergeben die Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion solcher Motoren. Die Ergebnisse der dargestellten Analyseverfahren werden anhand von Messergebnissen einer Versuchsmaschine bewertet und diskutiert. Das Buch geht auch auf die interessante Variante der Niedertemperatur-Stirlingmotoren ein.

Steimle, F.; Lamprichs, J.; Beck, P.:

Stirling-Maschinen-Technik. Grundlagen, Konzepte, Entwicklungen, Anwendungen.

Heidelberg: Müller, 2007. X, 457 S., 2., vollst. neu bearb. Aufl., ISBN 978-3-7880-7773-0, 69,00 Euro

Das Buch gibt einen Überblick über Stirling-Maschinen seit der Patentierung bis in die Gegenwart. Beginnend mit thermodynamischen Grundlagen zum Stirling-Prozess werden Maschinenkonzepte, Komponenten, Entwicklungen und Anwendungen von Stirling-Maschinen behandelt. Abschließend gewährt das Buch einen Ausblick in Entwicklungstrends und zukünftige Anwendungsbereiche.

Werdich, M.; Kübler, K.:

Stirling-Maschinen. Grundlagen, Technik, Anwendungen.

Staufen: Ökobuch, 2013. 125 S., 13., überarb. u. erw. Aufl., ISBN 978-3-936896-73-2, 15,95 Euro

Die Autoren geben einen Überblick über Grundlagen, Technik und Bauformen der Stirling-Maschinen. Sie gehen auf Vor- und Nachteile der verschiedenen Motorkonzepte ein, zeigen den Entwicklungsbedarf und informieren über die heute verfügbaren Maschinen. Eine einführende Information für Ingenieure, Studenten und technisch Interessierte, mit ausführlichem Hersteller- und Literaturverzeichnis.

13.3 Brennstoffzellen

Asmuth, P. C.:

Versorgungsstrukturen für elektrische Energie und Wärme mit Brennstoffzellen.

Berlin: Pro Business, 2007. 143 S., 1. Aufl., ISBN 978-3-939533-92-4, 19,00 Euro, (zugl. Dissertation Bergische Universität Wuppertal)

Lieferbar als Book on demand

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen zur wirtschaftlich optimalen Planung von Versorgungsstrukturen für elektrische Energie und Wärme mit Brennstoffzellen unter Berücksichtigung der für die Planung elektrischer Netze relevanten Randbedingungen durchgeführt. Als Ergebnis dieser Arbeit stehen Planungsgrundsätze für Versorgungsstrukturen mit vorwiegend dezentraler Erzeugung in Form von Brennstoffzellen zur Verfügung, welche für die versorgungstechnische Erschließung von Neubaugebieten sowie für die Entwicklung von Zielstrukturen im Rahmen der Grundsatzplanung von Bedeutung sind.

Lehmann, J.; Luschinetz, T.:

Wasserstoff und Brennstoffzellen. Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff.

Berlin: Springer Verl., 2014. VIII, 141 S.

ISBN 978-3-642-34667-5, 14,99 Euro (Print)

ISBN 978-3-642-34668-2 [Preis unbekannt] (E-Book)

Technik im Fokus

In dem kompakten Einführungsband erläutern die Autoren die Technik, das Funktionsprinzip und den Betrieb von Brennstoffzellen. Am Beispiel von E-Bike, PKW, Schiff und Flugzeug werden die Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen vorgestellt.

Kurzweil, P.:

Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen.

Berlin: Springer, 2013. S. 2., überarb. u. aktualisierte Aufl.

ISBN 978-3-658-00084-4, 54,99 Euro (Print)

ISBN 978-3-658-00085-1, 42,99 Euro (E-Book)

Dieses Fach- und Lehrbuch behandelt die Grundlagen der Brennstoffzellen. Dabei werden die chemischen Grundlagen in leicht verständlicher Form dargestellt. Einen Schwerpunkt des Buchs bilden die verschiedenen Brennstoffzellentypen und deren technische Anwendung. Im Kapitel »Gaserzeugung« werden konventionelle und alternative Methoden und Konzepte behandelt. Eine aktuelle Marktübersicht von Anbietern gibt zuverlässige Informationen zu diesem Thema. Die überarbeitete und aktualisierte zweite Auflage berücksichtigt zahlreiche konstruktive Ergänzungsvorschläge aus Leserzuschriften. Dabei wurden die Grundlagen ausführlicher behandelt und durch Rechenbeispiele ergänzt. In der Marginalspalte findet der Leser praxisnahe Zusatzinformationen und die Tabellen bringen Bezüge zur aktuellen Forschung.

Winkler, W.:

Brennstoffzellenanlagen.

Berlin: Springer, 2013. XIV, 374 S.

ISBN 978-3-662-06170-1, 139,99 Euro (Print)

ISBN 978-3-662-06169-5, 109,99 Euro (E-Book)

VDI-Buch

In diesem Buch werden die Grundlagen zur Brennstoffzelle und ihrer Prozessintegration vermittelt. Mit den Ansätzen zur Prozessbeurteilung, konstruktiven Durchführbarkeit und wirtschaftlichen Bewertung sowie der Beschreibung veröffentlichter Konzepte und Betriebsergebnisse bietet der Autor einen Leitfaden für eigene Problemlösungsansätze und Entscheidungen. Ingenieure, die thermodynamische und verfahrenstechnische Probleme zu lösen haben, sowie Studierende und das technische Management werden dieses Buch besonders schätzen.

13.4 Zeitschriften

BWK Das Energie-Fachmagazin (Brennstoff, Wärme, Kraft)

Düsseldorf: Springer-VDI-Verl.

<http://www.technikwissen.de/bwk/>

Liefert jährlich eine umfassende Dokumentation über Veröffentlichungen zu BHKW.

E&M (Energie & Management)

Herrsching: Energie & Management-Verlagsgesellschaft mbH

<http://www.energie-und-management.de>

Stellt regelmäßig BHKW-Anlagen vor; informiert über neue Organisationsformen (z. B. Contracting).

Energiedepesche

Bund der Energieverbraucher e. V., Unkel (Hrsg.)

<http://www.energiedepesche.de>

Vierteljährlich erscheinende Zeitschrift mit Informationen für Energieverbraucher.

Energie Spektrum

Gilching: Henrich Publikationen GmbH

<http://www.energie-spektrum.de>

Energiewirtschaftliche Tagesfragen

Essen: ETV GmbH

<http://www.et-energie-online.de>

Veröffentlicht häufiger Anbieterübersichten und Richtpreise.

HLH Lüftung/Klima – Heizung/Sanitär – Gebäudetechnik

Düsseldorf: Springer-VDI-Verl.

<http://www.technikwissen.de/hlh/>

HZwei – Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen

Oberkrämer: Hydrogeit Verlag

http://www.hzwei.info/startseite_hzwei_magazin.phtml

Sonne Wind & Wärme

Bielefeld: BVA Bielefelder Verl. GmbH & Co. KG Richard Kaselowsky

<http://www.sonnwindwaerme.de>

Mehrmals im Jahr Schwerpunkt BHKW.

13.5 Internet

| Name | Internet |
|--|---|
| AGFW – Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e. V. – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt | http://www.agfw.de |
| ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., Berlin | http://www.asue.de |
| BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Berlin | http://www.bdew.de/ |

| Name | Internet |
|--|--|
| BHKW-Consult Markus Gailfuß | http://www.bhkw-consult.de/ |
| BHKW-Infozentrum GbR, Rastatt | http://www.bhkw-infozentrum.de |
| BINE Informationsdienst, Bonn | http://www.bine.info http://www.energiefoerderung.info |
| Bund der Energieverbraucher, Unkel | http://www.energienetz.de |
| Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Eschborn | http://www.bafa.de |
| Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Energieforschung und Innovation | http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energieforschung.html |
| Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Forschungsinitiative Eneff:Wärme | http://www.eneff-waerme.info/ |
| Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V., Berlin | http://www.bkww.de |
| C.A.R.M.E.N. Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e. V., Straubing | http://www.carmen-ev.de |
| <i>Contracting, Ausschreibung:</i> hessenENERGIE GmbH, Wiesbaden Berliner Impulse, Berlin | http://www.hessenenergie.net http://www.berliner-impulse.de/impulse-angebote/best.html |
| Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e. V., Gülzow | http://www.fnr.de |
| <i>Informationen über kleine und Mini-BHKW für den Betreiber und das Handwerk:</i> Steinborn innovative Gebäude-Energieversorgung, Stuttgart | http://www.ihr-bhkw-berater.de/ |
| Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR), Münster | http://www.iwr.de/bhkw |
| KfW Förderbank, Frankfurt | http://www.kfw-foerderbank.de |
| VDMA Verband Deutscher Maschinen- und anlagenbau e. V., Frankfurt | http://www.vdma.org |
| Verband für Wärmelieferung (VfW) e. V., Hannover | http://www.energiecontracting.de |
| VIK – Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirt- schaft e. V., Essen | http://www.vik-online.de |
| VKU – Verband kommunaler Unternehmen e. V., Berlin | http://www.vku.de |

13.6 BINE Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Dabei geht es um neue Materialien, Systeme und Komponenten, um innovative Konzepte und Methoden. Die drei Broschürenreihen mit Ergebnissen und Erfahrungen aus Forschungsprojekten (Projektinfo, Themeninfo und basisEnergie) richten sich an potenzielle Anwender, also an Entwickler, Planer, Berater, Investoren, Energieversorger und Nutzer. Zum Thema »Blockheizkraftwerke« sind u. a. folgende Titel erschienen, die kostenfrei angefordert werden können und auch als download unter www.bine.info zur Verfügung stehen.

- Wie Fernwärme erneuerbar wird (BINE-Projektinfo 09/2014)
- Energie aus Abwasser versorgt Stadtquartier (BINE-Projektinfo 09/2014)
- Langlebiger Dieselmotor mit elektronischer Steuerung (BINE-Projektinfo 06/2014)
- Blockheizkraftwerke intelligent steuern (BINE-Projektinfo 08/2013)
- Neue Wege in der Hausenergieversorgung (BINE-Projektinfo 05/2012)
- Landkreis Harz erprobt Stromversorgung der Zukunft (BINE-Projektinfo 13/2012)
- Ländliches Stromnetz smart geregelt (BINE-Projektinfo 12/2012)
- Bordstromversorgung mit Brennstoffzellen (BINE-Projektinfo 10/2011)
- Das Stromnetz wird interaktiv (BINE-Projektinfo 07/2011)
- Das Stromnetz wird zum Marktplatz (BINE-Projektinfo 06/2011)

Über aktuelle Förderprogramme für Blockheizkraftwerke und alle übrigen neuen Energietechniken informiert der »Förderkompass Energie – eine BINE-Datenbank«

Für Anfragen von Privatpersonen bietet der BINE Informationsdienst die Informationen zu Förderprogrammen auch auf dem Webportal www.energiefoerderung.info an.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe GmbH und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

13.7 Forschungsportale des BMWi

EnEff heißt Forschung für Energieeffizienz. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert hierbei verschiedene Forschungsinitiativen, deren Forschungsergebnisse auf folgenden Portalen vorgestellt werden:

- Forschungsinitiative »EnEff:Stadt – Energieeffiziente Stadt« www.eneff-stadt.info
- Forschungsinitiative »EnEff:Wärme – Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze« www.eneff-waerme.info
- Forschungsinitiative »EnOB – Energieoptimiertes Bauen« www.enob.info
- Forschungsinitiative »EnEff:Industrie – Energieeffiziente Energieanwendungen in Industrie und Gewerbe« www.eneff-industrie.info
- Forschungsinitiative »Energiespeicher« von BMBF, BMU und BMWi www.forschung-energiespeicher.info
- Forschungsinitiative »Kraftwerkforschung – Forschung für neue Kraftwerksgenerationen« www.kraftwerkforschung.info
- Förderinitiative »Zukunftsfähige Stromnetze« www.forschung-stromnetze.info

14 Zum Autor



Dipl.-Ing. Wolfgang Suttor

(Jahrgang 1947) hat nach dem Studium der Elektrotechnik an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München gearbeitet. Er setzt sich seitdem als freier Berater für einen sparsamen, effizienten und nachhaltigen Energieeinsatz ein. Er ist Autor verschiedener Bücher, beim Bund der Energieverbraucher engagiert und war Herausgeber des Loseblattwerkes »Praxis Kraft-Wärme-Kopplung«.

Kontakt:

Wolfgang Suttor
Steinbach 2
84152 Mengkofen
Suttor@t-online.de



Wolfgang Suttor

Blockheizkraftwerke

Ein Leitfaden für den Anwender

8., überarbeitete Auflage

Blockheizkraftwerke nutzen die Energie besonders effizient, weil sie in einem Prozess Strom und Wärme erzeugen. Diese Form der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) hat in den letzten Jahren ihren Marktanteil vergrößern können. Neue gesetzliche Rahmenbedingungen und öffentliche Förderprogramme sollen dazu beitragen, diese Entwicklung weiter zu beschleunigen.

Das BINE-Fachbuch soll helfen, Hemmnisse bei der Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung zu überwinden und einen einfachen und kostengünstigen Zugang zum Stromnetz ermöglichen. Das Fachbuch stellt die neuen energiepolitischen Zielsetzungen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, BHKW-Technik und Betriebskonzepte vor. Es behandelt auch die Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen sowie Organisations-, Finanzierungs- und Genehmigungsfragen. Die Darstellung wird ergänzt durch aktuelle Forschungstrends im Bereich von KWK, Wärme- und Kältenetzen. Konzipiert ist das Buch als Leitfaden für Anwender in Wohnungswirtschaft, Bauwesen, Kommunen und Industrie.

Der Autor, Wolfgang Suttor, kann auf langjährige Erfahrungen als Ingenieur, Energieberater und Autor im Bereich der KWK-Technik zurückblicken. Er ist u. a. Herausgeber des Loseblattwerkes »Praxis Kraft-Wärme-Kopplung«.

ISBN 978-3-8167-9303-8



9 783816 793038