

BINE-Fachbuch

Blockheizkraftwerke

Ein Leitfaden für den Anwender

8., überarbeitete Auflage

Der Autor:

Wolfgang Suttor

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

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 richtungweisende 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 Vorrichtung- 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 9 70-25 00

Telefax +49 7 11 9 70-25 08

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

LESEPROBE

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

LESEPROBE

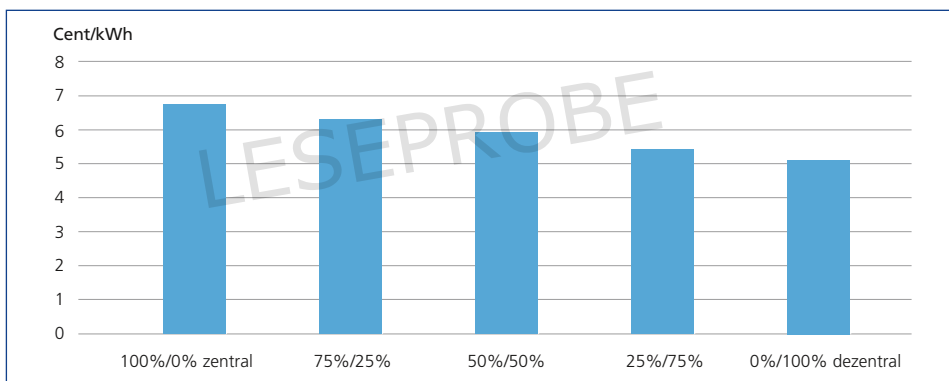
1 Energiepolitische Zielsetzung und Rahmenbedingungen

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 Fortschrittmotor 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-Kleinanlagen 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.

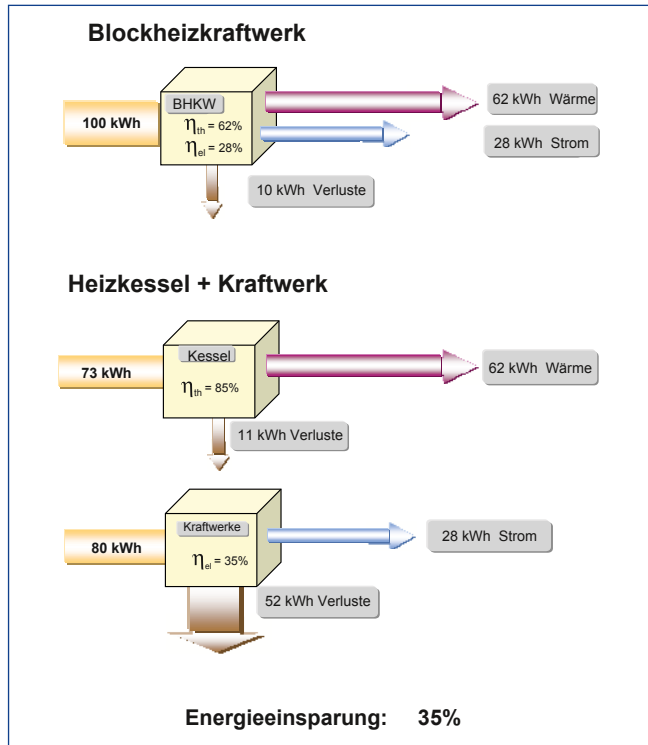
1.1 Energieeinsparung, Klimaschutz und Perspektiven

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.

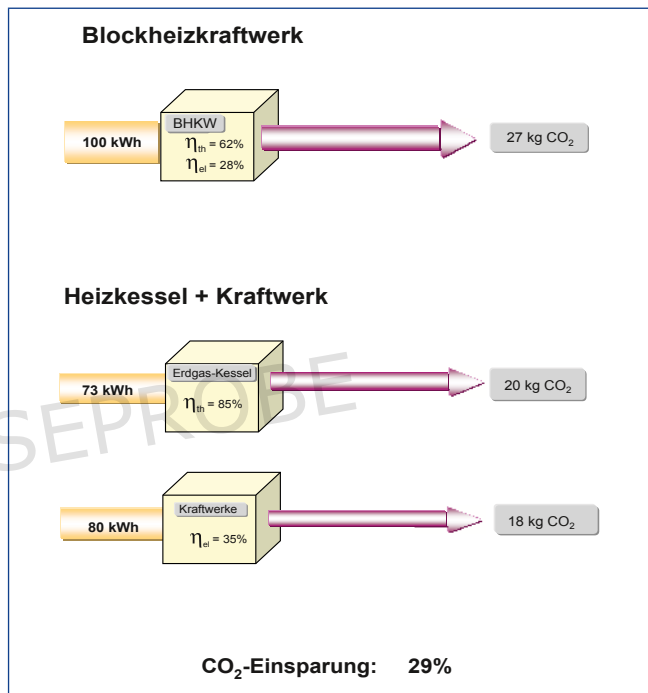
Die Energieeinsparung durch die KWK hängt selbstverständlich von der eingesetzten KWK-Technik (z. B. Motor-BHKW, Gasturbine) sowie von den Nutzungsgraden im Vergleich zur getrennten Bereitstellung von Strom und Wärme ab. Abb. 2 zeigt, dass selbst für ein Klein-BHKW mit einem vergleichsweise geringen 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 Brennwärmtauscher 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

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 1000 bis 1500 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 Rediteerwartungen 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 Wärmekoppelung 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.

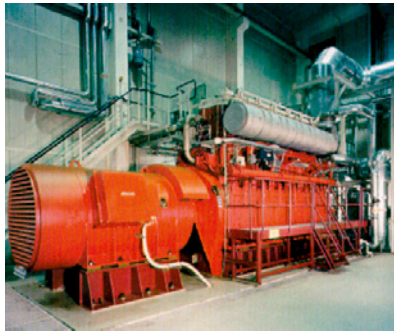
Die Entwicklung von Motor-Generator-Einheiten für die KWK zielte in den 1960er Jahren darauf, die genannten Bedingungen weitgehend zu erfüllen. Dies war die Geburtsstunde für die Blockheizkraftwerke (BHKW), die man heute als kompakte Energieerzeugungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad und immer kleineren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



Heizkraftwerk mit 17MW_{el}



BHKW mit 1 kW_{el}



BHKW Modul mit $2.300\text{ kW}_{\text{el}}$



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. 40000 BHKW und von jährlich knapp 700000 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.

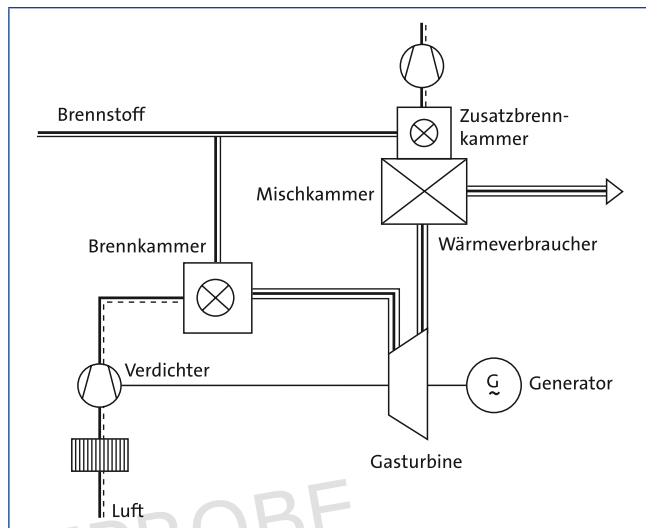
Um bei den gegenwärtig üblichen Rahmenbedingungen in die Nähe der Wirtschaftlichkeit zu kommen, beginnen solche Heizkraftanlagen bei elektrischen Leistungen von etwa 5 bis 10 MW und reichen bis in den Bereich von 100 bis 200 MW hinein. Bei größeren Leistungen nimmt der Anteil an Wärmenutzung mangels 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 Abhitzeessel 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 $2 \cdot 6,8 \text{ MW}_{\text{el}}$ und einer Satttdampfleistung von $2 \cdot 15 \text{ t/h}$

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.