

Bernd Thomas

# mini- blockheizkraftwerke



4



VOGEL

# Mini-Blockheizkraftwerke

Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas

# **Mini- Blockheizkraftwerke**

Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten

2., vollständig überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

Professor Dr.-Ing. BERND THOMAS

Jahrgang 1964

1983–1988 Studium Chemietechnik an der Universität Dortmund

1988–1992 Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Thermodynamik, Universität Dortmund; Dissertation «Entwicklung einer Freikolben-Vuilleumier-Kältemaschine» 1992–1997 Entwicklungsingenieur bei Viessmann Werke GmbH & Co., Allendorf (Eder); Arbeitsgebiet: Wärmepumpenentwicklung

1997 Berufung als Professor im FB Maschinenbau an die Hochschule Reutlingen;

Seit 2008 Leiter des Forschungsinstitutes der Hochschule Reutlingen „Reutlingen Research Institute (RRI)“

Lehrgebiete: Thermodynamik und Wärmeübertragung

Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten in folgenden Bereichen: Entwicklung von wärmetechnischen Berechnungsmodellen, Berechnung und Auslegung von Stirling-Maschinen

Experimentelle Untersuchungen von Wärmepumpen am Wärmepumpenprüfstand im Labor Prüfstandsuntersuchung von Mini-BHKW

---

Weitere Informationen:

[www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de)

---

ISBN 978-3-8343-3211-0

2. Auflage, 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt. Printed in Germany

Copyright 2007 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

# Vorwort

Das Streben nach stetigem Wachstum treibt von jeher die Industrialisierung voran – die einhergehende Belastung des globalen Ökosystems wird dabei zwar mittlerweile erkannt, aber noch nicht wirksam genug bekämpft. «Nachhaltigkeit» ist ein in den Industrienationen gern gehörter und gebrauchter Begriff; die in diesem Zusammenhang erforderlichen Maßnahmen werden aber nur zögerlich beschlossen und schleppend umgesetzt. Diese These lässt sich treffend mit folgendem Satz aus dem Werk des englischen Mathematikers, Philosophen und Schriftstellers BERTRAND RUSSELL zusammenfassen:

*«Die Frage heute ist, wie man die Menschheit überreden kann, in ihr eigenes Überleben einzuwilligen.»*

Die limitierte Verfügbarkeit fossiler Energieträger auf unserem Planeten ist spätestens seit der Ölkrise der 70er Jahre verstärkt ins Bewusstsein gerückt; dennoch erscheint es so, als ob die Menschheit – sich zwar stetig über die steigenden Energiepreise ereifernd – diesem Ende lethargisch und nahezu tatenlos entgegenseht. Dabei ist offensichtlich, dass die Entwicklung und Bereitstellung alternativer Technologien abgeschlossen sein muss, bevor die Quellen gänzlich erschöpft sind! In gleicher Form wird die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in unserer Atmosphäre hingenommen. Obwohl die Auswirkungen in Form der globalen Erwärmung mittlerweile unstrittig und die Prognosen für die zukünftige Entwicklung alarmierend sind [118], fehlen die Entscheidungen zu einem entschlossenen Gegensteuern. Dabei besteht auch hier akuter Handlungsbedarf, da selbst sofortige Änderungen aufgrund der Trägheit des globalen Ökosystems ihre Wirksamkeit erst in etwa 30 Jahren entfalten können.

Sicherlich ist der Aufbau einer Energieversorgung unabhängig von den begrenzten Ressourcen fossiler Energieträger und ohne schädigende Auswirkungen auf unser Ökosystem ambitioniert und nicht in einem Schritt oder durch eine Schlüsseltechnologie zu erreichen. Trotzdem muss eher heute wie morgen damit begonnen werden – nicht nur, um erste konkrete Maßnahmen zu ergreifen, sondern auch, um die Bevölkerung zu sensibilisieren und auf bevorstehende Änderungen im Anspruchsdenken und Konsumverhalten vorzubereiten. Dabei steht nach Ansicht der europäischen Experten die Erhöhung der Wirkungsgrade vorhandener Technologien und damit die Energieeinsparung an oberster Stelle [119]. Auf diese Weise kann zumindest die zeitliche Verfügbarkeit fossiler Energieträger verlängert und die mit deren Umsetzung verbundene Umweltbelastung in Grenzen gehalten werden.

An diesem Punkt setzt die Wärme-Kraft-Kopplung an, weil sie die eingesetzte Primärenergie durch die Nutzung der bei der Stromerzeugung anfal-

lenden Wärme in hohem Maße verwertet. Mit der Entwicklung von so genannten Mini-Blockheizkraftwerken ist diese Technologie auch in sehr kleinen Einheiten anwendbar. Der Vorteil liegt dabei auf der Hand: Die kleinen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen benötigen kein aufwendiges Wärmeverteilnetz, da die Wärme direkt vor Ort verbraucht wird. Sie sind somit ohne größeren baulichen Aufwand zu installieren und deshalb nahezu universell einsetzbar. So wird die Kraft-Wärme-Kopplung auch abseits der größeren Kraftwerke nutzbar, und der einhergehende Energieeinspareffekt lässt sich dementsprechend vervielfachen. Die Betreiber von Mini-Blockheizkraftwerken können außerdem einen geldwerten Vorteil erzielen, da parallel zur Erzeugung von Raumwärme elektrische Energie anfällt, die entweder selbst verbraucht oder gegen eine Vergütung in das Stromnetz eingespeist werden kann.

Insbesondere der zuletzt beschriebene Faktor hat in den letzten Jahren zu einem immensen Interesse an den Geräten geführt, das durch die steigenden Energiepreise und die Stromausfälle in der jüngsten Vergangenheit zusätzlich verstärkt wurde. Dieses Interesse war letztendlich die Motivation für das vorliegende Buch, das dazu dienen soll, die Technologie der Mini-Blockheizkraftwerke darzustellen und zu erläutern sowie die Leistungsfähigkeit, aber auch die Erfordernisse für einen wirtschaftlichen Betrieb der Geräte aufzuzeigen.

Zu diesem Zweck kann auf die Ergebnisse eines 18-monatigen Forschungsprojektes zurückgegriffen werden, in dem vier Mini-BHKW, darunter die drei bekanntesten und in Deutschland am meisten verkauften Geräte, auf einem eigens zu diesem Zweck errichteten Prüfstand getestet wurden. Konkret sind die DACHS HKA, das SOLO-Stirling-161-microKWK-Modul, das Mini-BHKW ecopower und ein Mini-BHKW aus Dänemark erprobt worden. Letzteres ist für den Einsatz von Biogas konzipiert; am Prüfstand wurde dieses BHKW aber ebenso wie die übrigen Geräte mit Erdgas betrieben. Ein Vergleichskriterium stellte dabei die Prüfung nach der Vergaberichtlinie für das Umweltzeichen «Der Blaue Engel» dar, die am Prüfstand durchgeführt werden konnte. Die Darstellung der Ergebnisse und Erfahrung aus den praktischen Untersuchungen nimmt einen breiten Raum in dem Buch ein und gibt einen umfassenden Einblick in das Verhalten der Geräte bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen.

Abgerundet wird das Buch durch eine einleitende Beschreibung der einsetzbaren Technologien – vom Otto-, Diesel- und Stirlingmotor über die Brennstoffzelle bis zur Mikrogasturbine und dem Dampfmotor – sowie eine Schilderung der Erfordernisse für Aufstellung und Einbindung von Mini-BHKW in die Hausinstallation. Am Ende sind einige Gedanken zur Wirtschaftlichkeit zusammengestellt, die Aufschluss über die Anforderungen an einen kostendeckenden Betrieb von Mini-BHKW geben.

Bei der Erstellung des Manuskripts wurde immer wieder auf die «interessierte Öffentlichkeit» fokussiert. Demzufolge sind die Inhalte nachvollziehbar und anwendungsorientiert formuliert; auf ausgeweitete Beschreibungen physikalisch-theoretischer Vorgänge ist nach Möglichkeit verzich-

tet worden. Dennoch lässt insbesondere die Diskussion der zahlreichen Messergebnisse einen tieferen Einblick in die Funktion und das Verhalten der Geräte zu.

Weiterführende Informationen, wie beispielsweise die konkreten, am Prüfstand erzielten Ergebnisse sind über das Portal des Vogel Buchverlags im Internet abrufbar. Zu diesem Zweck ist auf der 1. Seite des Inhaltsverzeichnisses ein InfoClick-Code eingedruckt, der den Zugang zu den Dokumenten ermöglicht. Das variable Medium Internet erlaubt zudem die laufende Aktualisierung der Informationen, so dass Inhalte auch noch zu späterer Zeit eingefügt und auf diese Weise verbreitet werden können.

Die Ausrichtung auf die praktischen Fragestellungen und Anwendungen wäre ohne die Mithilfe und tatkräftige Unterstützung der in diesem Bereich tätigen Unternehmen nicht möglich gewesen. Im Einzelnen möchte ich mich an dieser Stelle bei den Firmen SenerTec, SOLO Stirling, PowerPlus Technologies, Stirling Denmark, Sunpower Inc., Sunmachine, enerlyt Potsdam, WhisperTech, Viessmann Werke, IZES, Verdesis Suisse SA, OTAG und Fair-Energie für die Überlassung von Informationen und Bildmaterial danken. Darüber hinaus ist das gesamte Manuskript jeweils in Teilen von verschiedenen Firmenvertretern gegengelesen und auf die fachliche Richtigkeit geprüft worden. In diesem Zusammenhang möchte ich Dr. HANS-DETLEV KÜHL, Dr. BODO GROSS, BEAT NAEF, ALEXANDER STEPHAN, ALFRED BERNHARDT, RUDI ZILCH, EDGAR SCHMIEDER, HANS MEISSNER, DIRK STEINBERG, Prof. HENRIK CARLSEN und FRIEDHELM STEINBORN namentlich nennen und mich für ihre Mithilfe bedanken. Sollten dennoch Fehler oder Mängel bei der einen oder anderen Darstellung verblieben sein, so ist dafür allein der Autor verantwortlich.

Als weiteres Korrektiv hat mein Kollege an der Hochschule Reutlingen, Prof. MANUCHEHR PARVIZINIA, gewirkt, der das komplette Manuskript kritisch durchgesehen und neben formalen Fehlern auch immer wieder auf nicht genügend verständliche Passagen hingewiesen hat. Bei der Erstellung der zahlreichen Diagramme mit Messergebnissen sowie bei den Recherchen hat mir AGNES WYNDORPS sehr geholfen. Beiden sei für ihr Engagement an dieser Stelle herzlich gedankt.

Weiterer Dank gilt dem BMBF und dem Projektträger AiF, die durch die Finanzierung des Forschungsprojektes die Grundlage für dieses Buch geschaffen haben, sowie dem Vogel Buchverlag, mit dem ich zu jeder Zeit gut und professionell zusammenarbeiten konnte.

Meinen ganz besonderen Dank möchte ich meiner Frau Anke und unseren beiden Kindern aussprechen, die während der Erstellung des Manuskriptes Vieles alleine bewältigen mussten und mir auf diese Weise den nötigen Freiraum gegeben haben, um das Buch neben meiner beruflichen Tätigkeit fertigstellen zu können.

Reutlingen

Bernd Thomas



# Vorwort zur 2., vollständig überarbeiteten Auflage

Das Thema «Mini-Blockheizkraftwerke» ist nach wie vor aktuell, obwohl die in der ersten Auflage dieses Buches in Aussicht gestellte Verbreitung der Geräte nicht oder nur verzögert eingetreten ist. Dennoch sind die Probleme hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs und der Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre keinesfalls als gelöst anzusehen. Es ist vielmehr eine Stagnation in den Bemühungen nach einer Verminderung des Primärenergieverbrauchs und der Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu beobachten. Somit erschien es angebracht, das vorliegende Fachbuch zu überarbeiten und dem aktuellen Stand der Technik anzupassen sowie auf die geänderten energiepolitischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen Bezug zu nehmen. Konkret werden in der Neuauflage – ausgehend von den Untersuchungen am BHKW-Prüfstand der Hochschule Reutlingen mit dem Dampfmotor-BHKW lion® Powerblock der Firma OTAG und dem Motor-BHKW EC Power XRGI 15G-TO – zwei weitere Mini-Blockheizkraftwerke vorgestellt. Um den Umfang des Buches dadurch nicht zu unhandlich werden zu lassen, sind die Ausführungen zu den experimentellen Ergebnissen insgesamt reduziert worden. Dabei wurde auf die Darstellung und Diskussion der Messreihen mit wenig praktischer Relevanz verzichtet; die zugehörigen Daten sind aber noch im InfoClick enthalten und einsehbar.

Als weitere wichtige Ergänzung haben die Beschreibungen zur Berechnung des Primärenergiefaktors nach Energieeinsparverordnung (EnEV) und der Primärenergieeinsparung nach EU-Richtlinie in die 2. Auflage Eingang gefunden. Die entsprechenden Werte sind für die vorgestellten Mini-BHKW angegeben, und sie werden vergleichend gegenübergestellt und diskutiert.

Mit der Überarbeitung der übrigen Kapitel ist eine komplett aktualisierte Auflage des Buches entstanden, von der ich mir wünsche, dass sie zu einer ähnlichen Bereicherung des Informationsangebotes zum Thema beiträgt wie die Erstauflage. Bedanken möchte ich mich dabei beim Vogel Buchverlag für die bereitwillige Annahme der umfangreichen Ergänzungen und Korrekturen sowie für die Unterstützung bei der Umsetzung.

Reutlingen

Bernd Thomas

Weitere Titel für das Installateur- und Heizungsbauerhandwerk sind im Vogel Buchverlag erschienen:

Anette Becker	Lüftungsanlagen
Hadamovsky/Jonas	Solaranlagen
Hadamovsky/Jonas	Solarstrom/Solarthermie
Roland Nestler	Kalkulation und Angebot
Nestler/Becker/ Schenker/Tiator/ Reinhold	Prüfungsfragen Sanitär- und Heizungshandwerk
Christian Reinhold	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
Schenker/Tiator/ Nestler	Projektplanung
Maik Schenker	Sanitäranlagen
Bernd Thomas	Mini-Blockheizkraftwerke
Ingolf Tiator	Heizungsanlagen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>Vorwort zur 2., vollständig überarbeiteten Auflage</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Kraft-Wärme-Kopplung und Mini-Blockheizkraftwerke</b> ..	<b>15</b>
1.1 Aufbau von Mini-Blockheizkraftwerken .....	19
1.2 Kenngrößen zur Beschreibung von Leistung und Effizienz	21
1.2.1 Elektrische Leistung .....	21
1.2.2 Thermische Leistung .....	22
1.2.3 Brennstoffleistung .....	24
1.2.4 Wirkungsgrade .....	26
1.3 Energetische Analyse von Mini-Blockheizkraftwerken ..	28
<b>2 Technologieüberblick</b> .....	<b>41</b>
2.1 Motor-BHKW .....	41
2.2 Stirlingmotor-BHKW .....	53
2.3 Brennstoffzellen-BHKW .....	65
2.4 Mikrogasturbinen-BHKW .....	72
2.5 Dampfmotor-BHKW .....	79
<b>3 Aufstellung, Installation und Betriebsweise</b> .....	<b>85</b>
3.1 Genehmigungs- und Anmeldeverfahren .....	86
3.2 Aufstellungsort .....	89
3.3 Brennstoffversorgung .....	91
3.4 Abgasführung .....	92
3.5 Elektrischer Anschluss .....	94
3.6 Betriebsführung .....	99
3.6.1 Wärmegeführter Netzparallelbetrieb .....	100
3.6.2 Stromgeführter Netzparallelbetrieb .....	105
3.7 Hydraulischer Anschluss .....	106
3.8 Regelungs- und Steuerungstechnik .....	114
<b>4 Güte- und Effizienzkriterien für Mini-BHKW</b> .....	<b>117</b>
4.1 Das Umweltzeichen «Der Blaue Engel» .....	117
4.2 Der Primärenergiefaktor nach EnEV .....	120
4.3 Die Primärenergieeinsparung nach EU-Richtlinie .....	126
<b>5 Prüfstandsuntersuchungen</b> .....	<b>131</b>
5.1 Prüfstand .....	132
5.2 Messgeräte .....	137

5.3	Fehlerrechnung	142
5.4	Versuchsdurchführung	147
<b>6</b>	<b>Die DACHS HKA</b>	<b>149</b>
6.1	Die DACHS HKA G/F für Erdgasbetrieb am Prüfstand	151
6.2	Versuchsergebnisse	155
6.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur	155
6.2.2	Variation der Vorlauf­temperatur	157
6.2.3	Ein-/Ausschaltversuche	159
6.2.4	Auflösung des Startverhaltens	163
6.2.5	Schadgasemissionen	166
6.2.6	Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel»	167
6.2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen mit der DACHS HKA G/F	168
<b>7</b>	<b>Das SOLO-Stirling-161-microKWK-Modul</b>	<b>171</b>
7.1	Technik und Einbindung	171
7.2	Versuchsergebnisse	177
7.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur	177
7.2.2	Leistungsvariation	179
7.2.3	Instationäres Verhalten	181
7.2.4	Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel»	186
7.2.5	Leistungsvariation über die Drehzahl	188
7.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen mit dem SOLO-Stirling-BHKW	193
<b>8</b>	<b>Das Mini-BHKW ecopower</b>	<b>197</b>
8.1	Technik, Einbindung und Regelung	197
8.2	Versuchsergebnisse	203
8.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur	205
8.2.2	Teillastverhalten, Variation der Drehzahl	208
8.2.3	Instationäres Verhalten	210
8.2.4	Schadgasemissionen	215
8.2.5	Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel»	217
8.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen für das Mini-BHKW ecopower	219
<b>9</b>	<b>Biogas-Stirlingmotor-BHKW SM5A</b>	<b>223</b>
9.1	Technische Beschreibung	224
9.1.1	Einbindung und Steuerung des Mini-BHKWs SM5A	227
9.1.2	An- und Abfahrverhalten	230
9.2	Versuchsergebnisse	231
9.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur	233
9.2.2	Teillastverhalten	236

9.3	Schadgasemissionen/Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel» .....	242
9.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen mit dem BHKW SM5A .....	244
<b>10</b>	<b>Das Dampfmotor-BHKW lion® Powerblock .....</b>	<b>247</b>
10.1	Aufbau des lion® Powerblocks .....	249
10.2	Versuchsergebnisse .....	254
10.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur .....	254
10.2.2	Variation der Leistungsstufe .....	256
10.2.3	Instationäres Verhalten .....	260
10.3	Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel» ...	264
10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen mit dem lion® Powerblock .....	265
<b>11</b>	<b>Das Motor-BHKW XRGI 15G-TO .....</b>	<b>269</b>
11.1	Aufbau des BHKWs XRGI 15G-TO .....	270
11.2	Versuchsergebnisse .....	276
11.2.1	Variation der Rücklauf­temperatur .....	276
11.2.2	Leistungsvariation .....	278
11.2.3	Instationäres Verhalten .....	281
11.3	Messungen zum Umweltzeichen «Der Blaue Engel» ...	286
11.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen mit dem BHKW XRGI 15G-TO .....	288
<b>12</b>	<b>Vergleichende Betrachtung der untersuchten Mini-BHKW .....</b>	<b>291</b>
12.1	Wirkungsgradvergleich .....	291
12.2	Schadgasemissionen .....	295
12.3	Primärenergiefaktor und Primärenergieeinsparung ...	297
12.4	Fazit .....	299
12.5	Referenzanlagen .....	302
<b>13</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen .....</b>	<b>305</b>
13.1	Vergütung der erzeugten elektrischen Energie .....	306
13.2	Brennstoffkosten .....	308
13.3	Wartungskosten .....	312
13.4	Erlösberechnung, Kapitalkosten, Wirtschaftlichkeit ...	314
13.5	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	318
13.5.1	Mehrfamilienhäuser, kleine Gewerbebetriebe ...	319
13.5.2	Einfamilienhäuser .....	321
<b>14</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>323</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>325</b>

<b>Verwendete Formelzeichen und Einheiten</b> .....	<b>333</b>
<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b> .....	<b>335</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>341</b>

# 1

## Kraft-Wärme-Kopplung und Mini-Blockheizkraftwerke

- Aufbau von Mini-Blockheizkraftwerken
- Kenngrößen zur Beschreibung von Leistung und Effizienz
- Energetische Analyse von Mini-Blockheizkraftwerken

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird bereits seit vielen Jahren in Form von Wärmeauskopplung aus großen Kraftwerken praktiziert. Durch die Entnahme von Anzapfdampf aus der Turbine wird Heizwasser erwärmt, das durch Leitungen zu umliegenden Gebäuden geführt wird und dort für die Beheizung sorgt. Auf diese Weise verringert sich zwar der Wirkungsgrad der Stromerzeugung, weil der abgeführte Dampf keine weitere Entspannungsarbeit mehr leisten kann. Die zusätzliche Bereitstellung von Wärme für Heizzwecke gleicht dieses Manko jedoch aus und sorgt für einen zusätzlichen Nutzen. So bieten derartige Kraftwerke mit Wärmeauskopplung eine bessere Verwertung der Gesamtenergie im Vergleich zur reinen Stromerzeugung.

Die Ausnutzung dieser Technologie ist allerdings durch zwei Randbedingungen stark eingeschränkt: Zum einen ist die Ausweitung der Fernwärmenetze aufgrund der Isolationsverluste und der erforderlichen Pumpleistungen auf ein räumlich eng begrenztes Gebiet um das Kraftwerk beschränkt. Zusammen genommen mit der Tatsache, dass Großkraftwerke aus naheliegenden Gründen zumeist nur am Rande oder gänzlich außerhalb größerer Siedlungen geplant und gebaut werden, ergibt sich somit nur ein geringes Potenzial zur Beheizung insbesondere von Wohngebäuden. Zum anderen lassen sich bestehende Siedlungen nachträglich kaum wirtschaftlich auf diese Technologie umstellen, da der Aufwand für die spätere Erstellung eines Fernwärmenetzes immens ist, selbst wenn die Nähe zu einem Kraftwerk gegeben wäre.

Um die Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung, die gerade vor dem Hintergrund der Notwendigkeit zur Einsparung von Primärenergie und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen unbestritten sind, großflächig nutzen zu können, werden zur Vermeidung zuvor genannter Nachteile in letzter Zeit vermehrt so genannte Blockheizkraftwerke (BHKW) aufgebaut.

Der Begriff «Blockheizkraftwerk» beruht auf der Eigenart des Aggregates, Wärme und Kraft aus einem «Block», also von einem Gerät, liefern zu können [1]. Bislang handelt es sich dabei zumeist um Verbrennungsmotoren, deren mechanische Energie an der Welle über einen Generator in elektrische Energie gewandelt wird. Die entstehende Motorabwärme wird gleichzeitig in einen Heizkreis eingekoppelt und zur Gebäudebeheizung genutzt. Neben den Motor-BHKW ❶ sind aber auch andere Energiewandler verfügbar und bereits im Einsatz.

❶  
*Blockheizkraftwerk*

**Blockheizkraftwerke/  
dezentrale  
Energieversorgung**

Obwohl die Leistung derartiger Blockheizkraftwerke in den Bereich einiger Megawatt vorstoßen kann, spricht man im Vergleich zum Großkraftwerk von dezentralen Energieerzeugungsanlagen. Entsprechend wird das Netz zur Verteilung der Nutzwärme als Nahwärmenetz bezeichnet, da die zur Verfügung gestellte Wärmemenge vergleichsweise klein ist und somit nur im Nahbereich verwertet werden kann. Häufig werden Blockheizkraftwerke an den Standorten von Heizkraftwerken, die ausschließlich zur Wärmebereitstellung dienen, installiert, da hier bereits ein entsprechendes Nahwärmenetz vorhanden ist. Bei neuen Siedlungen oder im Zuge der Umstellung bestehender Wohngebiete auf Kraft-Wärme-Kopplung muss das Nahwärmenetz jedoch ebenfalls erstellt werden. Insgesamt schmälert also auch hier der Aufwand für Aufbau, Instandhaltung und Betrieb des Wärmeverteilungsnetzes den energetischen und wirtschaftlichen Nutzen der Technologie. Vorteilhaft ist jedoch, dass die Blockheizkraftwerke im Gegensatz zum Großkraftwerk inmitten von Siedlungsgebieten aufgebaut werden können und somit die prinzipiellen Möglichkeiten zur Umsetzung von Kraft-Wärme-Kopplung erweitern.

**Mini- und  
Mikro-BHKW**

❷  
*Kraft-Wärme-Kopplung*

Führt man den Gedanken der wirtschaftlichen Wärmeverteilung konsequent zu Ende, so kommt man zu sehr kleinen Anlagen, die nur noch so viel Wärme produzieren, wie im Wohngebäude selbst verbraucht wird, so dass die Notwendigkeit eines Wärmeverteilungsnetzes gänzlich entfällt. Man spricht hier von Kleinst-KWK ❷ oder, bei einer elektrischen Leistung der Geräte unter 15 kW, von Mini-KWK. Entsprechend bezeichnet man BHKW in diesem Leistungsbereich als Mini-Blockheizkraftwerke.

In letzter Zeit werden in diesem Leistungsbereich verstärkt die Begriffe Mikro-KWK und Mikro-Blockheizkraftwerk verwendet, die somit gleichbedeutend mit den im Rahmen dieses Buches verwendeten Begriffen Mini-KWK und Mini-Blockheizkraftwerk anzusehen sind. Zukünftig scheint sich der Begriff Mikro-KWK in Anlehnung an die im europäischen Umfeld gültige Gasgeräte-richtlinie [115] für alle Geräte mit einer Brennstoffleistung bis 70 kW durchzusetzen. Diese Sprachregelung würde alle BHKW mit einer elektrischen Leistung unterhalb von etwa 23 kW einschließen.

Die Geräte werden dabei im Gebäude wie ein Heizkessel installiert und betrieben mit dem Zusatzeffekt, dass bei der Wärmeerzeugung gleichzeitig elektrische Energie entsteht, die entweder selbst genutzt oder gegen Vergütung in das Stromnetz eingespeist werden kann. Der letztgenannte Aspekt macht Mini-BHKW interessant für viele Hausbesitzer, verspricht der selbst erzeugte Strom doch sowohl eine gewisse Unabhängigkeit von den kommunalen Energieversorgern als auch die Möglichkeit einer zusätzlichen Einnahmequelle oder zumindest eine Kompensation der Ausgaben für Nutzwärme. Beide Argumente können prinzipiell aufrechterhalten werden; sie müssen jedoch vor dem Hintergrund der technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen wie folgt relativiert werden: Eine vollständig autarke Betriebsweise von Mini-BHKW, der so genannte Inselbetrieb, ist nur mit Zusatzaggregaten wie Batteriepuffer mit Wechselrichtern sowie Notkühler möglich. Außerdem muss der aus der Einspeisevergütung resultierende Erlös gegen den höheren Brennstoffbedarf und die höheren Anschaffungskosten der Geräte aufgerechnet werden.

**Autarker Betrieb,  
Inselbetrieb**

Dennoch wird den Mini-BHKW vor dem Hintergrund steigender Energiepreise eine zunehmende Verbreitung attestiert. Eine Analyse des Marktforschungs- und Beratungsunternehmens Frost & Sullivan prognostiziert für Europa die Entstehung eines Massenmarktes für Mini-BHKW in naher Zukunft, wie Bild 1.1 zeigt [2]. Aus den Daten ergeben sich mittlere jährliche Steigerungsraten von 61 % für die Absatzzahlen und 43 % für den Umsatz zwischen den Jahren 2005 und 2012. Insgesamt sagen die Experten von Frost & Sullivan einen Anstieg der in Europa mit Hilfe von Mini-BHKW bereitgestellten elektrischen Leistung von 75 MW im Jahr 2005 auf 1,3 GW im Jahr 2012 vorher.

**Marktpotenzial**

Es ist anzumerken, dass die Studie von finanziellen Anreizen seitens der Regierungen für Erwerb und Betrieb von Mini-BHKW ausgeht. In

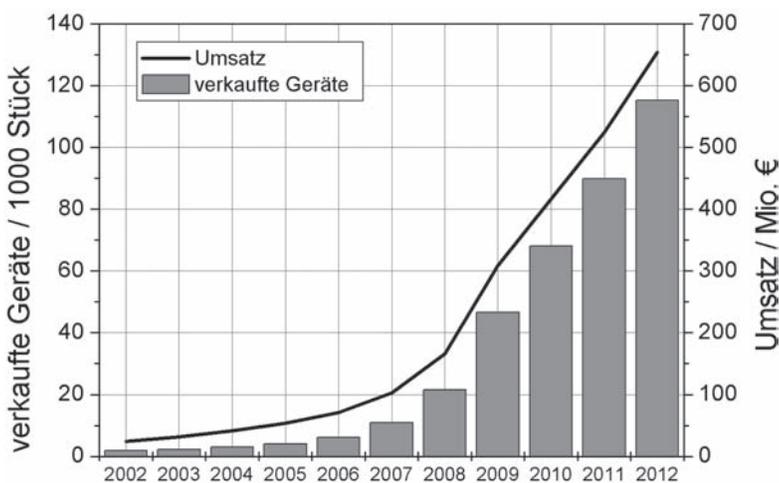


Bild 1.1  
Prognostiziertes  
Wachstum des  
Mini-BHKW-Marktes  
in Europa (Daten nach  
[2], Basisjahr: 2005)

**Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz**

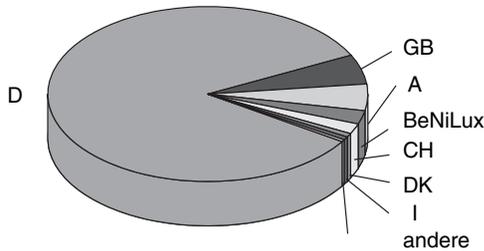
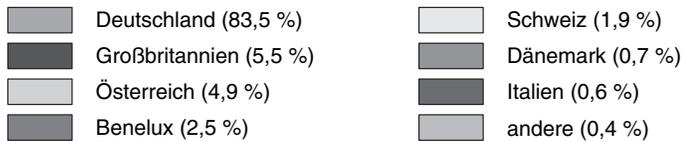
Deutschland ist dieser Randbedingung mit der Novellierung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes [3] sowie Einführung eines Förderprogramms für Mini-KWK-Anlagen unter 50 kW<sub>el</sub> [4] am Ende des Jahres 2008 Rechnung getragen worden. Dieses hat zu einem Anstieg der Absatzzahlen von etwa 3000 im Jahr 2008 auf geschätzte 6000 im Jahr 2009 geführt. Obwohl es sich dabei nur um die Zahlen für Deutschland handelt, ist absehbar, dass sich die nach Bild 1.1 für Europa prognostizierten Mengen verkaufter Mini-BHKW bislang nicht eingestellt haben. Erschwerend kommt hinzu, dass das genannte Förderprogramm ab 2010 auf unbestimmte Zeit ausgesetzt wurde, was nach Expertenmeinung zu einem deutlichen Rückgang der Verkaufszahlen in Deutschland führen wird.

**Anwendung in Einfamilienhäusern**

Auf der anderen Seite stehen mittlerweile Mini-BHKW mit kleinster Leistung im Bereich von 1 kW zur Anwendung in Einfamilienhäusern an der Schwelle der Markteinführung. Wenn der Markteintritt an dieser Stelle gelingt, ist aufgrund der Größe dieses Marktes mit einem, wenn auch zeitlich versetzten, Verlauf der Verkaufs- und Umsatzzahlen gemäß Bild 1.1 zu rechnen. Damit könnten Mini-BHKW mittelfristig mit einem steigenden Anteil am Heizgerätemarkt vertreten sein, der sich in Europa im Jahr 2005 auf immerhin 5,2 Mio. verkaufte Geräte pro Jahr belief. Ein Vergleich mit den in Bild 1.1 gezeigten Absatzzahlen macht das Potenzial der Technologie auch für die fernere Zukunft deutlich.

In Bild 1.2 ist die in der Studie von Frost & Sullivan illustrierte Verteilung der installierten Mini-BHKW auf die europäischen Länder für das Jahr 2005 dargestellt [2]. Es ist deutlich erkennbar, dass die überwiegende Mehrheit der Geräte in Deutschland betrieben wird. Gleichzeitig besitzen die deutschen Hersteller von Mini-BHKW auch die größten Marktanteile, so dass sich das Marktgeschehen derzeit vorwiegend in Deutschland abspielt. In Zukunft ist aber mit einer zunehmenden Ausweitung auf die europäischen Nachbarländer, insbesondere Großbritannien und die Niederlande, zu rechnen.

Bild 1.2  
Verteilung der installierten Mini-BHKW auf die europäischen Länder in 2005 (Daten nach [2])



# 1.1 Aufbau von Mini-Blockheizkraftwerken

In Bild 1.3 ist der Aufbau eines Mini-Blockheizkraftwerkes dargestellt, wobei das Prinzip auch auf BHKW größerer Leistung übertragbar ist. Gut zu erkennen ist der «Block», grau dargestellt, bestehend aus Kraftmaschine und Generator. (Streng genommen ist der Begriff «Kraftmaschine» zu eng gefasst, da hier auch Brennstoffzellen zum Einsatz kommen können, die thermodynamisch gesehen keine Kraftmaschinen sind. Aus Gründen der Vereinfachung wird die Bezeichnung jedoch beibehalten.) In der Kraftmaschine, die im allgemeinen Sinn den Energiewandler darstellt, wird die mit dem Brennstoff zugeführte Primärenergie in mechanische Energie umgesetzt, die dann mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie gewandelt wird. Im Fall der Brennstoffzelle entfällt der Zwischenschritt über die mechanische Energie. Hier ist lediglich die Umformung der elektrischen Energie mit Hilfe eines Wechselrichters analog zur Photovoltaik erforderlich. Anschließend kann die Energie direkt in das Stromnetz eingespeist werden und steht somit unmittelbar zur Nutzung bereit.

Für den Betrieb von Blockheizkraftwerken wird neben Heizöl überwiegend Erdgas als Brennstoff eingesetzt, was sowohl hinsichtlich Wartung und Lebensdauer der Motoren als auch mit Blick auf die Schadgasemissionen deutliche Vorteile besitzt. Zukünftig wird dem Einsatz von regenerativen Brennstoffen wie Biogas, Klär- und Deponiegas, Biodiesel, Rapsöl und auch Holzpellets sowie Holzhackschnitzeln zunehmende Bedeutung beigemessen. Aus diesem Grund wird verstärkt an BHKW-Aggregaten gearbeitet, die diese Brennstoffe möglichst direkt, also ohne aufwendige Aufbereitung, verarbeiten können.

Das Abgas des BHKWs muss, wie in Bild 1.3 zu erkennen, zwecks Reinigung zumeist durch einen Katalysator geleitet werden. Bei bestimm-

**Energiewandler**

**Brennstoffe**

**Regenerative Brennstoffe**

**Abgas / Katalysator**

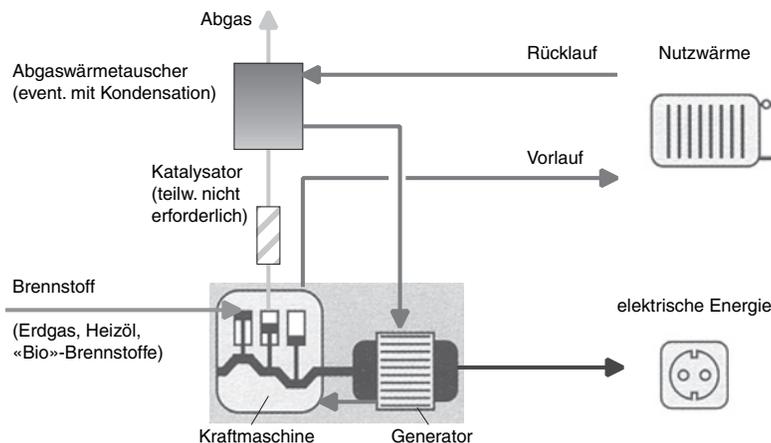


Bild 1.3  
Prinzipieller Aufbau eines Blockheizkraftwerkes

ten Geräten, wie beispielsweise Stirlingmotor oder Dampfmotor-BHKW, kann die Verbrennung aber auch so schadstoffarm geführt werden, dass keine nachgeschaltete Reinigung erforderlich ist.

#### **Abgaswärmetauscher/ Brennwerttechnik**

In jedem Fall erfolgt eine weitere Abkühlung des Abgases in einem entsprechenden Wärmetauscher, um möglichst viel der noch enthaltenen Energie in Form von Wärme nutzen zu können. Dabei wird analog zu modernen Heizgeräten die Brennwerttechnik eingesetzt und der aufgrund der Verbrennung im Abgas enthaltene Wasserdampf abhängig vom Niveau der Rücklauftemperatur auskondensiert. Bild 1.3 zeigt die Verschaltung des Heizkreises. Im Anschluss an den Abgaswärmetauscher wird der Generator gekühlt, um die hier entstehende Abwärme ebenfalls für Heizzwecke verwenden zu können. Der Hauptanteil der in den Heizkreis eingekoppelten Wärme entsteht in der Kraftmaschine, die abschließend durchströmt und somit gekühlt wird.

#### **Asynchrongenerator**

Zur Wandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie dient in den meisten Fällen ein Asynchrongenerator, der robust, weit verbreitet und gut verfügbar sowie kostengünstig zu beziehen ist. Außerdem kann bei Verwendung eines Asynchrongenerators und direkter Kopplung an das Stromnetz auf eine äußere Erregung mittels einer Leistungselektronik verzichtet werden, da diese durch das Netz unmittelbar gegeben ist. Auf diese Weise ist die Drehzahl der Kraftmaschine jedoch abhängig von der Zahl der Polpaare am Generator fest mit der Netzfrequenz gekoppelt und entsprechend konstant. Mit Hilfe eines zwischengeschalteten Getriebes kann die Motordrehzahl lediglich gegenüber der Generatordrehzahl verschoben werden; die Drehzahl bleibt jedoch nach wie vor konstant, und das BHKW läuft mit konstanter Leistung. Falls eine Leistungsmodulation gewünscht wird, muss diese durch Variation anderer Parameter bewirkt werden. Bei Verwendung eines Synchrongenerators ist prinzipbedingt ein Frequenzumrichter zur Einspeisung der elektrischen Leistung erforderlich, über den jedoch eine Variation der Drehzahl und damit eine Leistungsmodulation möglich ist.

#### **Synchrongenerator**

Synchrongeneratoren bauen zumeist kleiner als Asynchrongeneratoren gleicher Leistung; dafür erfordern Asynchrongeneratoren keinen Frequenzumrichter, und die Verluste sind zumeist etwas kleiner als bei Synchrongeneratoren. Beide Varianten benötigen in jedem Fall den Anschluss an ein festes elektrisches Netz. Die zuvor erwähnten Inselösungen, die unabhängig von einem elektrischen Netz arbeiten können, bedingen zusätzliche Aggregate wie Puffer in Form von Batterien, entsprechende Wechselrichter und einen separaten Kühler für den stromgeführten Betrieb [5], was zu deutlich höheren Anschaffungskosten im Vergleich zur Standardvariante mit Netzkopplung führt.

#### **Inselbetrieb**

Zusammenfassend betrachtet zeigt sich somit, dass ein Blockheizkraftwerk elektrische Energie und Nutzwärme gekoppelt produzieren kann. Auf diese Weise wird der eingesetzte Brennstoff bestmöglich ausgenutzt, und es entsteht ein energetischer Vorteil gegenüber der getrennten Produktion von elektrischer Energie und Wärme in Kraftwerk und Heizkessel, wo große Anteile der Brennstoffenergie über den Kühlturm des Kraftwerkes ungenutzt in die Umgebung entweichen.

**Bessere  
Brennstoffausnutzung**

## 1.2 Kenngrößen zur Beschreibung von Leistung und Effizienz

### 1.2.1 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung  $P_{el}$  beschreibt, wie viel elektrische Energie pro Zeiteinheit von dem BHKW produziert wird. Entscheidend ist dabei, insbesondere im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsberechnungen, die Angabe der elektrischen Nettoleistung, die anzeigt, wie viel Energie tatsächlich vom BHKW in das Stromnetz eingespeist wird. Die im Inneren des BHKWs, also direkt am Generator, anfallende Leistung ist zumeist größer, um Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen, Gebläse usw. und die geräteeigene Steuerung zusätzlich versorgen zu können. Herstellerangaben sollten demnach immer auf die elektrische Nettoleistung bezogen sein. Im folgenden Text ist mit der elektrischen Leistung immer die Nettoleistung gemeint, sofern nicht explizit andere Angaben gemacht sind.

**Elektrische  
Nettoleistung**

Per Definition trägt die elektrische Leistung ein negatives Vorzeichen, um zu verdeutlichen, dass dieser Energiestrom vom BHKW abgegeben wird. Aus Gründen der Einfachheit wird die Größe im Folgenden jedoch immer positiv gezählt. Die Angabe der elektrischen Leistung erfolgt in der Einheit Watt, bei Mini-BHKW zumeist in kW. Am Stromzähler wird jedoch nicht die Leistung, sondern die elektrische Arbeit in kWh gezählt und angezeigt. Dieser Wert entsteht durch Multiplikation der Leistung mit der Betriebszeit. Liegt beispielsweise eine elektrische Leistung von 5 kW über einen Zeitraum von 3 Stunden an, so beträgt die geleistete elektrische Arbeit 15 kWh. Die Arbeit bildet die Grundlage für die Vergütung; daraus ist bereits an dieser Stelle ersichtlich, dass neben der Nettoleistung die Betriebszeit von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines BHKWs ist.

**Definitionen/Einheit**

In umgekehrter Weise kann aber auch aus der am Stromzähler abgelesenen Arbeit auf die elektrische Leistung zurückgerechnet werden. Zu diesem Zweck ist die über einen definierten Zeitraum aus der Differenz

**Leistungsmessung**

der Zählerstände ermittelte elektrische Arbeit in kWh durch die Betriebszeit in Stunden zu dividieren. Dabei ist allerdings nur die über den Messzeitraum gemittelte elektrische Abgabeleistung ermittelbar. Um eine präzise Aussage über die aktuelle Leistung zu erhalten, sollte das BHKW bei dieser Methode nach Möglichkeit konstant laufen.

Die elektrische Leistung kann aber auch direkt bestimmt werden. Die entsprechenden Messgeräte, die in die Stromleitung geschaltet sind, geben Ströme und Spannungen der einzelnen Phasen sowie Frequenz, Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ , Blind- und Scheinleistung aus. In Abschnitt 5.2 sind beispielhaft zwei Geräte dieser Art beschrieben.

#### Wirkleistung

Einfacher ist es, die elektrische Leistung mit einer so genannten Stromzange zu ermitteln. Dazu muss der gemessene Strom  $I$  durch Multiplikation mit der Spannung  $U$  in die Wirkleistung umgerechnet werden. Für die bei Mini-BHKW überwiegend verwendete Leistungseinspeisung auf der 400-V-Drehstromebene mit 3 Phasen ergibt sich dafür folgende Gleichung:

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  ist eine Apparatekonstante des Generators und zumeist in den technischen Daten angegeben. Es ist jedoch zu beachten, dass der Leistungsfaktor nicht konstant ist und beispielsweise bei Asynchrongeneratoren im Teillastbereich abnimmt.

### 1.2.2 Thermische Leistung

#### Nutzwärme

Analog zur elektrischen Leistung ist der Begriff der thermischen Leistung zur Beschreibung der vom BHKW abgegebenen Nutzwärme eingeführt. Es handelt sich dabei ebenfalls um eine Leistungsgröße, die bei Mini-BHKW überwiegend in der Einheit kW angegeben wird. Aus diesem Grund sind die Bezeichnungen «Wärme- oder Heizleistung» ebenfalls gebräuchlich. Auch hier wird der Wert abweichend von der thermodynamischen Definition positiv verwendet. Seitens des BHKWs dient die thermische Leistung zur Kühlung des Gerätes, denn die zugehörige Wärme wird vom BHKW abgegeben und an ein Zwischenmedium, zumeist Wasser in einem Heiz-/Kühlkreislauf, übertragen. Da die Wärme jedoch nicht über einen weiteren Kühler quasi nutzlos an die Umgebung abgegeben wird, sondern Verbrauchern zur Erwärmung von Brauchwasser oder zur Raumheizung zugeführt wird, erklärt sich der Begriff «Heizleistung» aus Sicht des Verbrauchers.

#### Bestimmung der thermischen Leistung

Zur Bestimmung der thermischen Leistung müssen die Temperaturen des Kreislaufwassers vor und hinter dem BHKW sowie der Wasservolumenstrom  $\dot{V}_W$  gemessen werden. Die Temperatur des erwärmten Wassers am Austritt des BHKWs wird dabei als Vorlauftemperatur  $T_{VL}$

bezeichnet. Entsprechend nennt man die Temperatur des vom Verbraucher zurückfließenden und in das BHKW eintretenden Kreislaufwassers Rücklauftemperatur  $T_{RL}$ . Zusammen mit den Stoffdaten Dichte  $\rho$  und spezifische Wärmekapazität  $c$  des Kreislaufwassers ergibt sich die thermische Leistung gemäß folgender Gleichung:

$$\dot{Q}_{th} = \dot{V}_W \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Zur überschlägigen Berechnung für das Kreislaufmedium Wasser können Stoffwerte von  $\rho = 990 \text{ kg/m}^3$  und  $c = 4,18 \text{ kJ/kgK}$  verwendet werden. Bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit sind die Daten in Abhängigkeit von Druck und Temperatur aus Tabellen der Stoffdatenliteratur (z. B. [6]) einzusetzen.

Im praktischen Betrieb dient häufig ein Wärmemengenzähler zur Erfassung der thermischen Leistung (s. Bild 1.4). Bei diesen Geräten werden die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Volumenstrom gemessen und die thermische Leistung auf Basis von Gleichung 1.2 berechnet. Zusätzlich wird die Größe mit der Messzeit multipliziert, woraus die Wärmemenge in kWh resultiert. Je nach Ausbaustufe werden neben der Wärmemenge auch die Vor- und Rücklauftemperaturen, der Volumenstrom und die thermische Leistung an einem zentralen Display angezeigt. Zudem ist häufig eine Fernübertragung der Daten möglich, die zumeist über M-Bus erfolgt. Für höhere Anforderungen an die Genauigkeit sollten die Temperaturen und der Volumenstrom jedoch separat gemessen und angezeigt werden; entsprechende Messgeräte sind in Abschnitt 5.2 aufgeführt.

Zur besseren Analyse des Gesamtgerätes können die auf Abgaswärmetauscher, Generator und Kühler der Kraftmaschine entfallenden Anteile der thermischen Leistung auch einzeln bestimmt werden. Dafür ist es unter Beibehaltung von Gleichung 1.2 lediglich erforderlich, weitere Temperaturmessstellen zwischen den einzelnen Komponenten in den Kreislauf einzubringen.

**Wärmemengenzähler**

**Wärmemenge**



Bild 1.4  
Wärmemengenzähler [7]

### 1.2.3 Brennstoffleistung

#### Kondensation des Wasserdampfes

①

Abgeleitet aus dem internationalen Sprachgebrauch: Heizwert  $H_i$  (inferior) Brennwert  $H_s$  (superior)

Mit der Brennstoffleistung  $\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}$  wird der dem BHKW über die chemische Energie des Brennstoffes zugeführte Antriebsenergiestrom bezeichnet. Als Kenngröße für die chemische Energie dient der Heizwert  $H_i$ , der in älteren Tabellen auch als unterer Heizwert auftritt. Zusätzlich existiert der Brennwert oder auch oberer Heizwert  $H_s$  ①. Der Unterschied dieser beiden Angaben ist über die Kondensationswärme des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes gegeben. Bei der Definition des Heizwertes geht man davon aus, dass der Wasserdampf die Brennkammer dampfförmig, also nicht kondensiert, verlässt. Der Brennwert basiert dagegen auf einer vollständigen Kondensation des Wasserdampfes, der die Brennkammer damit flüssig verlässt. Folglich nimmt der Brennwert einen höheren Zahlenwert an, da die Kondensationswärme des Wasserdampfes zusätzlich enthalten ist. In Tabelle 1.1 sind zur Übersicht Heiz- und Brennwerte für verschiedene Brennstoffe zusammengefasst. Bei gasförmigen Brennstoffen werden Heizwert und Brennwert auf das Normvolumen des trockenen Gases (bei 0 oder 15 °C und 1,01325 bar) bezogen. Bei flüssigen und festen Brennstoffen bezieht man die Werte dagegen auf die Brennstoffmasse.

#### Chemisch uneinheitliche Brennstoffe

Im Fall von chemisch uneinheitlichen Brennstoffen, wie Erdgas oder Heizöl, ist zu beachten, dass in Tabelle 1.1 nur Anhaltswerte aufgeführt sind, die in der Praxis aufgrund veränderlicher Zusammensetzungen in gewissen Toleranzbereichen schwanken können.

Aus den Daten in Tabelle 1.1 leitet sich ab, dass das Verhältnis von Brennwert zu Heizwert für Erdgas 1,11 beträgt, während sich für Heizöl EL nur ein Wert von 1,06 ergibt. Ursache für diesen Unterschied ist das größere Verhältnis von Wasserstoff- zu Kohlenstoffatomen bei Erdgas im Vergleich zu den Molekülen der langkettigen Kohlenwasserstoffe im Heizöl. Auf diese Weise wird insbesondere bei der Verbrennung von Erdgas H anteilig mehr Wasserdampf und weniger CO<sub>2</sub> gebildet, und die verwertbare Kondensationswärme fällt entsprechend höher aus.

Tabelle 1.1 Heizwert und Brennwert für verschiedene Brennstoffe

Brennstoff	Heizwert $H_i$	Brennwert $H_s$
Methan*	35,88 MJ/m <sup>3</sup>	39,82 MJ/m <sup>3</sup>
Erdgas L*,**	31,79 MJ/m <sup>3</sup>	35,21 MJ/m <sup>3</sup>
Erdgas H*,**	37,26 MJ/m <sup>3</sup>	41,26 MJ/m <sup>3</sup>
Propan*	93,56 MJ/m <sup>3</sup>	101,81 MJ/m <sup>3</sup>
Butan*	123,52 MJ/m <sup>3</sup>	133,99 MJ/m <sup>3</sup>
Heizöl EL**,	42,70 MJ/kg	45,25 MJ/kg

\* auf Normvolumen (bei 0 °C, 1,01325 bar) bezogen

\*\* mittlere Werte; exakte Werte abhängig von der Zusammensetzung

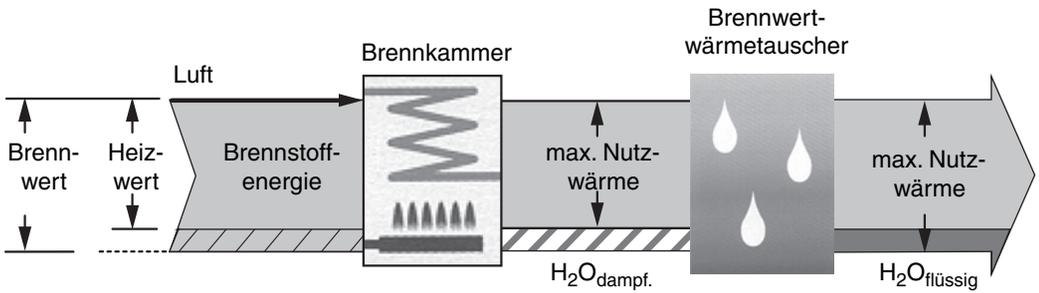


Bild 1.5  
Prinzip Brennwerttechnik

Der Begriff «Brennwerttechnik» bezeichnet die Nutzung dieser Kondensationswärme in modernen Heizanlagen. Dabei wird das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt, der für Erdgas H bei etwa 57 °C und für Heizöl EL bei etwa 47 °C liegt. Bild 1.5 zeigt, wie sich die maximale Nutz-wärme durch die Kondensation des Wasserdampfes im so genannten Brennwertwärmetauscher vergrößert. Die unterschiedliche Bedeutung von Heiz- und Brennwert ist ebenfalls ersichtlich.

### Brennwerttechnik

Obwohl die Definition der in die Brennkammer eingebrachten Brennstoffleistung auf Basis des Brennwertes im ersten Moment sinnvoller erscheint – nicht zuletzt aufgrund der mittlerweile weiten Verbreitung der Brennwerttechnik –, wird dieser Energiestrom jedoch in vielen Fällen, wie auch im Rahmen dieses Buches, mit Hilfe des Heizwertes berechnet. Für Brenngase, bei denen der Heizwert auf das Normvolumen bezogen ist, gilt demnach:

$$\dot{Q}_{\text{Brennstoff}} = \dot{V}_{\text{B, Norm}} \cdot H_i \quad (\text{Gl. 1.3})$$

mit dem auf Normbedingungen bezogenen Brenngasvolumenstrom  $\dot{V}_{\text{B, Norm}}$ . Bei flüssigen Brennstoffen, wie beispielsweise Heizöl, ist der Heizwert auf die Masse bezogen, so dass neben dem Volumenstrom des Brennstoffes  $\dot{V}_{\text{B}}$  auch die Dichte  $\rho_{\text{B}}$  eingeht:

$$\dot{Q}_{\text{Brennstoff}} = \dot{V}_{\text{B}} \cdot \rho_{\text{B}} \cdot H_i \quad (\text{Gl. 1.4})$$

Während der Volumenstrom bei flüssigen Brennstoffen mit geeigneten Durchflussmessgeräten zumeist in einfacher Weise zu ermitteln ist, muss bei der Bestimmung des Normvolumenstromes von Brenngasen mehr Aufwand betrieben werden. Dabei geht man teilweise auf so genannte Massenstrommessgeräte über, die, wie der Name bereits andeutet, den Massenstrom bestimmen und diesen anschließend über die Gasgleichung in den Volumenstrom bei Normbedingungen umrechnen. Problematisch bei dem Verfahren sind sowohl der hohe Aufwand für das Messgerät – insbesondere, wenn akzeptable Grundgenauigkeiten gefor-

### Ermittlung des Normvolumenstromes

dert sind – als auch der vergleichsweise hohe Druckverlust, der durch das Messgerät in der Gasleitung entsteht. Darüber hinaus muss die Zusammensetzung des Brenngases bekannt sein, um weitere Fehler bei der Umrechnung mit Hilfe der Gasgleichung zu vermeiden.

#### Ideales Gasgesetz

Alternativ finden die bekannten Balgengaszähler Verwendung. Die Geräte messen zwar primär nur das Gasvolumen; dieses erfolgt jedoch mit sehr hoher Genauigkeit. Durch Festlegung einer definierten Messzeit kann der Volumenstrom mit Hilfe der Differenz von End- und Anfangsvolumen berechnet werden. Daraus ergibt sich allerdings analog zum Stromzähler der Nachteil, dass nur ein über die Messzeit gemittelter Wert zu bestimmen ist. Instationäre Messungen sind auf diese Weise nicht durchführbar. Des Weiteren muss der so gemessene Volumenstrom mit dem Druck und der Temperatur des Brenngases an der Messstelle über die Gasgleichung auf Normbedingungen bezogen werden. Bei Verwendung des idealen Gasgesetzes ergibt sich dafür folgende Umrechnung:

$$\dot{V}_{B, \text{Norm}} = \dot{V}_B \cdot \frac{p_{\text{Brenngas}} \cdot T_{\text{Norm}}}{T_{\text{Brenngas}} \cdot p_{\text{Norm}}} \quad (\text{Gl. 1.5})$$

Dementsprechend sind weitere Messgeräte zur Bestimmung von Absolutdruck  $p_{\text{Brenngas}}$  und Temperatur  $T_{\text{Brenngas}}$  des Brenngases erforderlich, was sowohl den Aufwand als auch den Messfehler erhöht. Dennoch sind Aufwand und Messfehler insgesamt zumeist kleiner als bei den Massendurchflussmessern, was den Balgengaszähler zusammen mit Druck- und Temperatursensoren für stationäre Messungen nach wie vor geeignet erscheinen lässt. In Abschnitt 5.2 werden Geräte zur Bestimmung des Durchflusses von Brenngasen vorgestellt.

### 1.2.4 Wirkungsgrade

Auf Basis der zuvor diskutierten ein- und austretenden Energieströme am BHKW sind verschiedene Wirkungsgrade zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gerätes definiert.

#### Elektrischer Wirkungsgrad

Als elektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{el}}$  bezeichnet man das Verhältnis der abgegebenen elektrischen Leistung  $P_{\text{el}}$  zur Brennstoffleistung  $\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}$ :

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad (\text{Gl. 1.6})$$

Nach DIN 6280 Teil 14 [8] wird dabei der elektrische Leistungsbedarf für die Hilfsaggregate wie beispielsweise Steuerung, Brennergebläse oder Kreislaufpumpe herausgerechnet. Diese Regelung zielt auf große Blockheizkraftwerke ab und erscheint für Mini-BHKW wenig sinnvoll, da die Hilfsaggregate hier im Gerät integriert sind und nicht über einen

separaten elektrischen Anschluss versorgt werden. Aus diesem Grund werden mit  $P_{el}$  und  $\eta_{el}$  im Folgenden immer die netto an der Übergabestelle vorliegenden Werte angegeben.

Bei Messungen gemäß der Richtlinie zur Vergabe des Umweltzeichens «Der Blaue Engel» ist dagegen mit  $P_{el}$  der brutto am BHKW vorliegende Wert einzusetzen, d. h., hier kann die elektrische Leistung, sofern möglich, direkt am Generator bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist zulässig, da die Vergaberichtlinie für das Umweltzeichen «Der Blaue Engel» [9] in diesem Zusammenhang explizit auf die DIN 6280 Teil 14 [8] verweist.

Analog zum elektrischen Wirkungsgrad ist der thermische Wirkungsgrad definiert. Er beschreibt das Verhältnis der nutzbaren thermischen Leistung  $\dot{Q}_{th}$  zur Brennstoffleistung  $\dot{Q}_{Brennstoff}$  :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{Brennstoff}} \quad (\text{Gl. 1.7})$$

Neben dem thermischen Wirkungsgrad wird zusätzlich zum elektrischen Wirkungsgrad häufig der Gesamtwirkungsgrad angegeben, der sich aus der Addition der beiden zuvor genannten Wirkungsgrade ergibt:

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{Brennstoff}} \quad (\text{Gl. 1.8})$$

und damit ein Maß für die Gesamtausnutzung der Brennstoffleistung des BHKWs in elektrische und thermische Leistung darstellt.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die im Nenner der Definitionsgleichungen für die Wirkungsgrade verwendete Brennstoffleistung gemäß Gl. 1.3 und 1.4 auf den Heizwert des Brennstoffes bezogen ist. Aus diesem Grund ist bei Nutzung der Brennwerttechnik in Mini-BHKW eine Überschreitung der 100 %-Marke für den Gesamtwirkungsgrad analog zum Brennwertkessel möglich, und sie wird in der Praxis auch beobachtet. Die maximal erreichbaren Gesamtwirkungsgrade liegen gemäß Tabelle 1.1 für den Brennstoff Erdgas H bei 111 % und für Heizöl EL bei 106 %.

Thermodynamisch gesehen ist der Begriff «Gesamtwirkungsgrad» nicht glücklich, da im Zähler von Gl. 1.8 eine elektrische mit einer thermischen Leistung addiert wird. Beide sind in Bezug auf ihre weitere Umwandelbarkeit – man spricht hier auch vom Exergieanteil – nicht gleichwertig, so dass eine Addition im thermodynamischen Sinn nicht ohne Weiteres erfolgen darf.

In der DIN 6280 Teil 14 [8] ist jedoch der Gesamtwirkungsgrad definiert, entsprechend ist er auch im Sprachgebrauch und den einschlägigen Veröffentlichungen zum Thema Blockheizkraftwerke eingeführt; konsequenterweise wird der Begriff «Gesamtwirkungsgrad» im Folgenden beibehalten.

Des Weiteren ist die Stromkennzahl  $S$  als Maß für die Güte eines BHKWs bekannt, in dem diese Größe beschreibt, wie viel elektrische

**Thermischer  
Wirkungsgrad/  
Gesamtwirkungsgrad**

**Bezug auf  
den Heizwert**

**Stromkennzahl** Leistung im Verhältnis zur thermischen Leistung erzeugt wird. Gl. 1.9 zeigt jedoch, dass die Stromkennzahl keine neue Bewertungsgröße darstellt, sondern sich stattdessen in einfacher Weise aus den zuvor beschriebenen Wirkungsgraden ableiten lässt.

$$S = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (\text{Gl. 1.9})$$

Die Stromkennzahl gibt Aufschluss über die Aufteilung der vom BHKW erzeugten elektrischen und thermischen Leistung. Insbesondere bei wärmegeführter Betriebsweise kann mit Hilfe der Stromkennzahl aus der bereitgestellten thermischen Leistung direkt die parallel produzierte elektrische Leistung bestimmt werden. In manchen Veröffentlichungen wird in der Stromkennzahl auch die über eine bestimmte Zeit bereitgestellte elektrische Energie mit der während der gleichen Zeit erzeugten Wärmemenge ins Verhältnis gesetzt [10]. Der auf diese Weise erhaltene Wert wird von der nach Gl. 1.9 berechneten Stromkennzahl umso stärker abweichen, je mehr An- und Abfahrvorgänge sowie wechselnde Betriebsbedingungen mit unterschiedlichen Wirkungsgraden in der betrachteten Zeitspanne auftreten.

**Nutzungsgrade** Die Bewertung der Energiemengen, die in einer bestimmten Zeitspanne verbraucht oder erzeugt werden, führt zu den so genannten Nutzungsgraden. Diese sind analog zu den Gleichungen 1.6 bis 1.8 definiert, wobei anstelle der Leistungen die Energiemengen in den Einheiten [J] oder [kWh] einzusetzen sind. Die Betrachtung der Nutzungsgrade zeichnet ein realistischeres Bild des tatsächlichen Betriebs eines BHKWs in einem Gebäude, da Aufheiz- und Auskühlverluste während der An- und Abfahrphasen ebenso enthalten sind wie ein eventueller Betrieb bei Teillast. Aus diesem Grund ist beispielsweise der Primärenergiefaktor nach Energieeinsparverordnung [86], der später eingehend erläutert wird, über die Energiemengen und Nutzungsgrade definiert. Problematisch ist dabei jedoch, dass die Nutzungsgrade nicht wie die Wirkungsgrade anhand von stationären Prüfstandsversuchen bestimmt, sondern nur in Verbindung mit dem betrachteten Gebäude und über einen längeren Zeitraum ermittelt werden können.

### 1.3 Energetische Analyse von Mini-Blockheizkraftwerken

Zur Verdeutlichung der energetischen Vorteile von Blockheizkraftwerken muss die gekoppelte Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie mit der zur Zeit praktizierten getrennten Erzeugung in Großkraft-

werk und Heizkessel verglichen werden. Verständlicherweise ist das Ergebnis stark von der Festlegung der einzelnen Wirkungsgrade abhängig. So werden den Mini-BHKW in einigen Literaturstellen Einsparungen an Primärenergie zwischen 31 % und 36 % zugeschrieben [11-13]. An anderer Stelle wird dagegen mit hocheffizienten GuD-Kraftwerken ① und Wärmepumpen verglichen und ein um 14 % höherer Primärenergieverbrauch bei Einsatz von Mini-BHKW angegeben [14]. Diese Diskrepanz soll im Folgenden aufgenommen und diskutiert werden.

①  
*Gas- und  
Dampfturbinen-  
Kraftwerk*

Zur Analyse der Effizienz von Mini-Blockheizkraftwerken kann man bei Geräten mit einer elektrischen Leistung im Bereich von 5 kW derzeit von einem elektrischen Wirkungsgrad zwischen 24 und 27 % und einem Gesamtwirkungsgrad zwischen 85 und 100 % ausgehen.

Für die folgende Betrachtung werden der elektrische Wirkungsgrad mit einem mittleren Wert von 25 % und der Gesamtwirkungsgrad mit 90 % angesetzt. Aus der Differenz beider Werte resultiert ein thermischer Wirkungsgrad von 65 %. Die Festlegung des Gesamtwirkungsgrades auf einen mit 90 % eher niedrigeren Wert erfolgt mit Blick auf den Einsatz der Geräte in Heizsystemen mit höheren Rücklauftemperaturen, wie sie häufig im Modernisierungsfall auftreten. Gleiches wird anschließend bei der Bewertung der konkurrierenden Systeme Heizkessel und Wärmepumpe unterstellt. Die Untersuchung des Modernisierungsfalls ist dabei nicht zwingend; sie erscheint aber sinnvoll, da die Heizungsmodernisierung aufgrund der strukturellen Randbedingungen in Deutschland gegenüber der Neuinstallation mit etwa 75 % überwiegt. Der Vergleich auf Basis niedriger Rücklauftemperaturen im Fall von Neubauten würde ähnlich ausfallen, da für alle Systeme höhere thermische Wirkungsgrade, und bei einigen Mini-BHKW sogar höhere elektrische Wirkungsgrade, anzusetzen wären.

**Gekoppelte  
Erzeugung  
im Mini-BHKW**

Setzt man die Energiemenge des zum Betrieb des Blockheizkraftwerkes erforderlichen Brennstoffes auf 100 %, so können die daraus erzeugten Anteile Elektroenergie und Wärme entsprechend der genannten Wirkungsgrade gemäß Bild 1.6 abgeleitet werden. Es ist zu erkennen, dass im Mini-Blockheizkraftwerk demnach aus 100 Anteilen Brennstoffenergie 25 Anteile elektrische Energie und 65 Anteile Nutzwärme entstehen. Die nicht verwertbare Energie, die hier vereinfachend als Verlust bezeichnet ist, beläuft sich auf lediglich 10 Anteile.

Legt man nun die so erzeugten Anteile Elektroenergie und Nutzwärme der getrennten Erzeugung zugrunde, so kann mit Hilfe von Kraftwerkswirkungsgrad und dem Wirkungsgrad des Heizkessels auf die für diesen Fall erforderliche Brennstoffenergie zurückgerechnet werden.

**Getrennte Erzeugung**

Dazu sei nochmals der grundlegende Gedanke der Mini-Blockheizkraftwerke benannt, der auf die gekoppelte Erzeugung von Wärme und

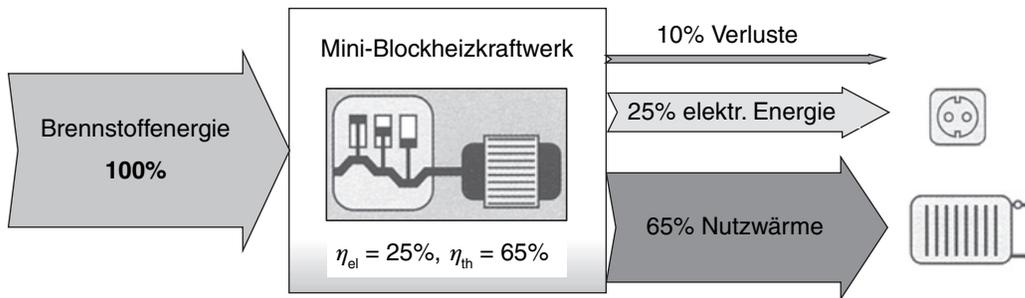


Bild 1.6  
Energieflussbild für die gekoppelte Energieerzeugung im Mini-BHKW

Kraft in kleinster Einheit, also direkt in den Wohngebäuden, fokussiert. Hier würde die Installation eines Mini-BHKWs im Rahmen einer Heizungsmodernisierung in Erwägung gezogen, und zwar in Konkurrenz zum Heizkessel, genauer gesagt zu einem modernen Gasbrennwertkessel, da Mini-BHKW derzeit überwiegend mit Erdgas betrieben werden. Alternativ zum Heizkessel könnte auch der Einsatz einer Wärmepumpe in Frage kommen; beide Varianten sollen im Folgenden betrachtet werden.

#### Gasbrennwertkessel

Gasbrennwertkessel erreichen heutzutage Normnutzungsgrade von 109 %, bezogen auf den Heizwert des Brenngases. Berücksichtigt man, dass bei der Verbrennung von Erdgas H und vollständiger Kondensation des Abgases ein maximaler Wirkungsgrad von 111 %, bezogen auf den Heizwert, möglich ist, zeigt sich die technische Ausgereiftheit dieser Geräte. Der genannte Normnutzungsgrad stellt sich allerdings nur bei niedrigen Vor- und Rücklauftemperaturen von 40 und 30 °C ein, wie sie in Kombination mit Fußbodenheizsystemen Verwendung finden. Im Bereich der hier betrachteten Heizungsmodernisierung ist dagegen, wie zuvor ausgeführt, von höheren Rücklauftemperaturen und entsprechend kleineren Wirkungsgraden auszugehen. Aus diesem Grund wird mit einem Normnutzungsgrad von 104 % gerechnet, der mit Gasbrennwertkesseln bei Vor- und Rücklauftemperaturen von 75 und 60 °C erreichbar ist (z. B. [15]).

#### Kraftwerk/ GuD-Kraftwerk

Bei den Großkraftwerken beträgt der durchschnittliche elektrische Nettowirkungsgrad derzeit etwa 38 % [16]. Neu errichtete Braunkohlekraftwerke erreichen bereits einen Wirkungsgrad von 46 %, und kombinierte Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD-Kraftwerke) kommen auf 58 bis 59 %, in naher Zukunft sogar auf 60 % [17]. Bis zum Jahr 2025 wird sogar eine Wirkungsgradsteigerung auf 65 % angestrebt [18]. Dabei ist jedoch die Frage zu klären, ob GuD-Kraftwerke inklusive der prognostizierten Wirkungsgradsteigerungen in die aktuelle Betrachtung einbezogen werden können, da sie derzeit kaum – mit den höchsten Wirkungsgraden noch gar nicht – im Einsatz sind. Sicherlich liegt hier