

# **Blockheizkraftwerke**

## **Technik, Ökologie, Ökonomie**



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 2001

## IMPRESSUM

<b>Herausgeber</b>	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  76185 Karlsruhe · Postfach 21 07 52 <a href="http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de">http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>ISSN</b>	0949-0485
<b>Bearbeitung</b>	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 3 - Industrie und Gewerbe Dipl.- Phys. Gütling, Dr. Kamm
<b>Umschlaglayout</b>	Stephan May · Grafik-Design, 76227 Karlsruhe
<b>Titelbild</b>	Jutta Ruloff · Dipl.-Designerin, 76275 Ettlingen
<b>Druck</b>	hausinterne Herstellung mit Festtintendrucker (Solid Ink)
<b>Umwelthinweis</b>	gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier
<b>Bezug über</b>	Verlagsauslieferung der LfU bei JVA Mannheim - Druckerei Herzogenriedstraße 11, 68169 Mannheim Telefax: (0621) 398 – 370
<b>Preis</b>	12,00 DM (6,14 €)

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

## Zusammenfassung

Aus Gründen des Klimaschutzes ist eine deutliche Reduktion der relevanten Emissionen erforderlich. Dies ist nur durch eine Vielzahl von Maßnahmen möglich. Eine dieser Maßnahmen ist die effizientere Umwandlung von Primärenergie (Kohle, Erdöl, Erdgas) in Sekundärenergie (Strom, Wärme). Dabei können Blockheizkraftwerke (BHKW) eine bedeutende Rolle spielen, da sie durch die Kraft-Wärme-Kopplung einen deutlich höheren Wirkungsgrad aufweisen als konventionelle Kraftwerke.

In der vorliegenden Studie wird zunächst ein Überblick über die prinzipielle Funktionsweise und wesentliche Kennzahlen von BHKW gegeben.

Im Detail werden BHKW mit Verbrennungsmotoren, Stirling-Motoren und Brennstoffzellen vorgestellt. Neben den technischen Besonderheiten wird dabei insbesondere auf das Emissionsverhalten und den aktuellen Entwicklungsstand eingegangen.

In einem weiteren Kapitel wird der derzeitige Einsatz von BHKW in Baden-Württemberg dargestellt.

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit und zu Umwelteinwirkungen sowie ein Ausblick über Entwicklungsmöglichkeiten runden die Studie ab.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Technik von Blockheizkraftwerken.....	7
2.1	Prinzipielle Funktionsweise.....	7
2.1.1	Der Motor.....	7
2.1.2	Der Generator und die Netzanbindung.....	7
2.1.3	Anbindung an die Wärmeversorgung.....	7
2.1.4	Kennzahlen von BHKW.....	8
2.1.5	Betriebsweisen von BHKW.....	9
2.2	Verbrennungsmotorgetriebene BHKW - Techniken, Brennstoffe und Emissionen.....	9
2.2.1	Brennstoffe.....	9
2.2.1.1	Gasförmige Brennstoffe.....	9
2.2.1.2	Flüssige Brennstoffe.....	11
2.2.2	Emissionen und Techniken zur Minderung.....	11
2.2.2.1	Gesetzliche Grundlagen.....	11
2.2.2.2	Einflussfaktoren für die Höhe der Emissionen.....	12
2.2.2.3	Die Lambda-Zahl als entscheidender Parameter der motorischen Verbrennung (Primärmaßnahmen).....	13
2.2.2.4	Katalysatortechnik (Sekundärmaßnahmen).....	13
2.2.3	Emissionen bestehender BHKW.....	15
2.3	Der Stirling-Motor in Blockheizkraftwerken.....	18
2.3.1	Funktionsweise.....	18
2.3.2	Stand der Entwicklung.....	19
2.4	Brennstoffzellen.....	19
2.4.1	Funktionsweise.....	19
2.4.2	Technische Realisierung.....	20
2.4.3	Gasqualität.....	21
2.4.4	Emissionen.....	21
2.4.5	Entwicklungsstand der verschiedenen Brennstoffzellentypen.....	21
2.5	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK).....	22
3	Einsatz und Wirtschaftlichkeit.....	24
3.1	Der BHKW-Einsatz in Baden-Württemberg.....	24
3.2	Wirtschaftlichkeit.....	26
3.2.1	Einsatz und Planung.....	26

---

3.2.2	Kosten.....	27
3.2.3	Erlöse.....	28
3.2.4	Finanzierung .....	29
4	Systemtechnische Analyse der Umwelteinwirkungen von Blockheizkraftwerken.....	30
5	Fazit und Ausblick.....	32
6	Literaturverzeichnis.....	33

# 1 Einleitung

In der 1992 in Rio unterzeichneten Klimarahmenkonvention wurde erstmals von einem Großteil der Staaten die Absicht erklärt, die Klimagasemissionen zu senken oder zumindest zu begrenzen. Damit wurde erstmals offiziell anerkannt, dass eine potentielle Gefährdung für das Klima und somit auch für die Lebensgrundlagen des Menschen durch die Emission von sogenannten Klimagasen ( Kohlendioxid [CO<sub>2</sub>], Methan, Stickoxid [N<sub>2</sub>O], Fluorchlorkohlenwasserstoff [FCKW]) besteht.

Ein bedeutender Teil der anthropogen erzeugten Treibhausgase resultiert aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Erdgas. Um die von der deutschen Bundesregierung bis 2005 angestrebte Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 % gegenüber dem Stand von 1990 zu erreichen, müssen daher vor allem im Energiesektor emissionsmindernde Maßnahmen getroffen werden. Die auf der Nachfrageseite gemeinhin als "Energiesparen" bekannten Maßnahmen bieten aus heutiger Sicht noch erhebliche Möglichkeiten. Jedoch kann die Energienachfrage bei Beibehaltung des gegenwärtigen Wohlstands in den kommenden Jahrzehnten wohl maximal um 20 bis 30 % gegenüber dem jetzigen Niveau gesenkt werden. Um die Menge der Klimagase deutlich zu senken, sind daher weiterhin Schritte auf der Angebotsseite vonnöten. Als eine Option galt lange Zeit die Kernkraft, da sie kaum CO<sub>2</sub> produziert. Doch die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz und der Verzicht auf den Bau von neuen Kernkraftwerken seitens der Elektrizitätswirtschaft sowie die jüngste Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und der Energiewirtschaft wird zu einem Ende der Kernkraftnutzung innerhalb der nächsten Jahrzehnte führen.

Eine weitere Option zur Klimagasreduktion bietet der Ausbau der regenerativen Energien. Doch selbst im günstigsten Fall wird geschätzt, dass die Regenerativen, vor allem wegen ihrer Kosten, bis zum Jahr 2020 nicht mehr als ein Viertel des Primärenergieverbrauchs in Deutschland decken werden können. Eine kurzfristige Maßnahme bietet sich durch die Substitution von Kohle und Erdöl durch Erdgas, da dieses bei

gleichem Energiegehalt weniger Kohlenstoff enthält und somit weniger CO<sub>2</sub> bei der Verbrennung freisetzt. Diese Substitution wurde in den vergangenen Jahren verstärkt durchgeführt, ist jedoch wegen der begrenzten Erdgasvorräte auf wenige Jahrzehnte befristet. Schließlich bleibt die Möglichkeit, durch effizientere Umwandlungstechniken die eingesetzte Primärenergie bei gleichbleibendem Output zu vermindern. Betätigungsfelder ergeben sich hier in der Verbesserung von Kraftwerkswirkungsgraden und in der Kraft-Wärme-Kopplung, d.h. der Nutzung der Abwärme von Stromerzeugungsanlagen, welche in konventionellen Anlagen ungenutzt der Umwelt zugeführt wird. Daraus resultiert eine Einsparung, da zur Wärmeengewinnung nicht, wie üblich, zusätzliche Primärenergie eingesetzt werden muss. Seit den siebziger Jahren hat sich eine Technik entwickelt, welche einen verbrennungsmotorgetriebenen Stromgenerator mit der Technik der Kraft-Wärme-Kopplung betreibt. Derartige Einheiten nennt man Blockheizkraftwerke (BHKW). In Abbildung 1-1 sind die Energieflüsse eines BHKW mit denen eines konventionellen Kraftwerks und eines Heizkraftwerks verglichen. Man sieht, dass durch ein BHKW die eingesetzte Primärenergie am effektivsten genutzt wird. Damit einher gehen Reduktionen an Luftschadstoffen und Klimagasen.

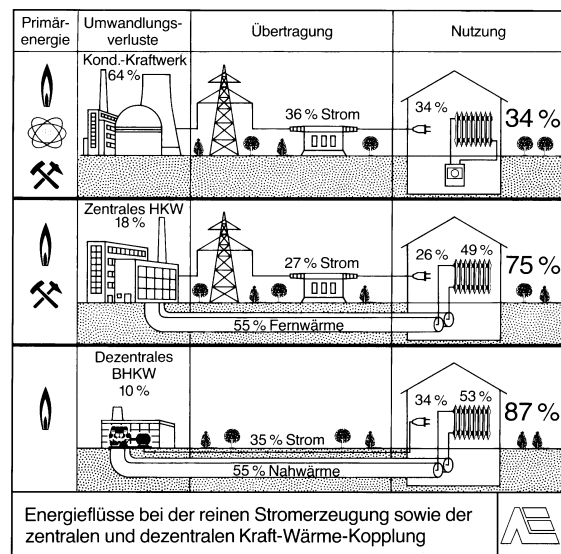


Abbildung 1-1: Nutzung der eingesetzten Primärenergie bei einem Kondensationskraftwerk, einem Heizkraftwerk und einem Blockheizkraftwerk [2]

Die Leistung derartiger BHKW reicht von 5 Kilowatt (kW) für ein Einfamilienhaus bis zu mehreren Megawatt (MW) für die Großindustrie [1], [3].

Neueste Entwicklungen versuchen, auch Brennstoffzellen und Stirling-Motoren als Basis für Blockheizkraftwerke zu verwenden.

Die vorliegende Studie stellt die wesentlichen

Informationen über Blockheizkraftwerke in kompakter und übersichtlicher Form zusammen und soll damit Kommunen und kommunale Betriebe sowie Industrie- und Gewerbebetriebe bei der Entscheidung über den Bau und bei der Anlagenkonzipierung unterstützen. Außerdem soll sie eine Informationsquelle für Genehmigungs- und Überwachungsbehörden darstellen.

## 2 Technik von Blockheizkraftwerken

### 2.1 Prinzipielle Funktionsweise

Abbildung 2-1 zeigt die Schemazeichnung eines verbrennungsmotorbetriebenen Blockheizkraftwerkes. Es sind alle wesentlichen Komponenten dargestellt, welche für die Einbindung in das Wärme- und Stromnetz erforderlich sind.

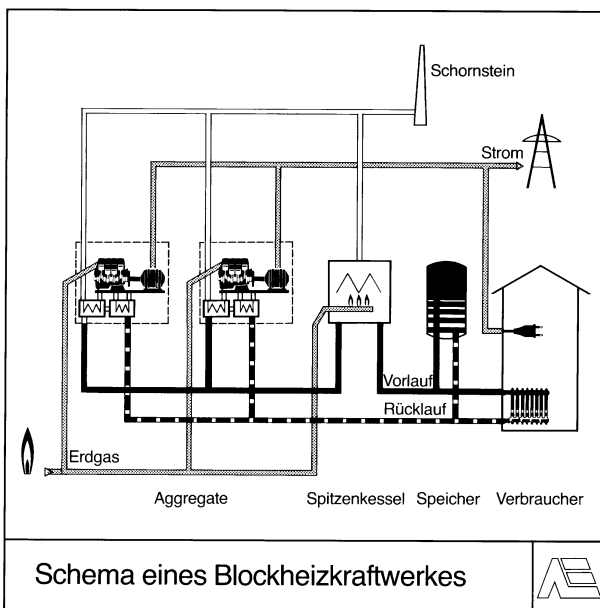


Abbildung 2-1: Prinzipieller Aufbau eines Blockheizkraftwerkes [2]

#### 2.1.1 Der Motor

Die zentrale Einheit bildet in diesem Fall der Verbrennungsmotor. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Motorkonzepte, die Brennstoffe und die Emissionsminderungstechniken näher beschrieben.

#### 2.1.2 Der Generator und die Netzanbindung

Der Motor treibt über die Kurbelwelle den Generator an. Dieser speist den erzeugten Strom über einen Transformator in das Stromnetz ein. Man unterscheidet zwei Generatortypen. Der Asynchrongenerator benötigt einen Anschluss an das Festnetz als Taktgeber, damit der erzeugte Strom in Frequenz und Phase mit dem Festnetzstrom übereinstimmt. Der Synchrongenerator benötigt eine Gleichstromquelle als Taktgeber. Er ist daher auch geeignet für den Fall, dass kein Festnetzanschluss vorhanden ist und die Stromversorgung alleine vom BHKW geleistet wird. Man spricht in diesem Fall von einem Inselbetrieb. Eine Synchronisierereinrichtung passt Frequenz und Phase an das Festnetz an. Des Weiteren besitzt der Synchrongenerator einen höheren Wirkungsgrad als der Asynchrongenerator, hat allerdings auch den Nachteil aufwändiger und teurer zu sein [18].

Die Netzanbindung von BHKW erfolgt entweder über das Niederspannungsnetz oder - ab etwa 1 MW Generatorleistung - über das Mittelspannungsnetz.

#### 2.1.3 Anbindung an die Wärmeversorgung

Der Wärmetauscher ermöglicht es, die Wärme aus Abgas, Schmieröl und Kühlwasser zu nutzen, um Brauchwasser auf 80° - 90° C zu erwärmen. Höhere Temperaturen sind bei Verwendung von Verbrennungsmotoren nur bei zusätzlichem Einsatz einer Wärmepumpe möglich. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es meist nicht sinnvoll, die Leistung eines BHKW für den

Spitzenbedarf auszulegen. Deshalb ist zusätzlich ein Spitzenlastkessel notwendig, der so dimensioniert ist, dass er im Notfall den gesamten Wärmebedarf decken kann. Ein Warmwasserspeicher hilft, Belastungsspitzen abzufedern und verhindert somit das häufige Anfahren des Motors, wodurch die Lebensdauer verlängert wird. Spitzenlastkessel und BHKW können entweder in Reihe geschaltet sein oder durch eine hydraulische Weiche voneinander entkoppelt werden.

#### 2.1.4 Kennzahlen von BHKW

Um die Energieeffizienz einer Stromerzeugungsanlage zu charakterisieren, ist die Angabe des elektrischen Wirkungsgrades  $\eta_{el}$  hinreichend. Im Fall der Koppelproduktion von Strom und Wärme muss man zusätzlich die erzeugte Wärmeenergie berücksichtigen. Der Gesamtwirkungsgrad beschreibt den Anteil der eingesetzten Energie, welcher in Form von Strom oder Wärme genutzt werden kann. Dieser Gesamtwirkungsgrad sollte jedoch keinesfalls mit Wirkungsgraden von Anlagen zur getrennten Er-

zeugung von Strom und Wärme verglichen werden, da es physikalisch nicht sinnvoll ist, die höherwertige elektrische Energie mit Wärmeenergie gleichzustellen. Je größer der Anteil einer Energieform ist, welchen man in mechanische Arbeit umwandeln kann, desto größer ist der sogenannte Exergiegehalt und desto höher ist die Wertigkeit einer Energie. Elektrische Energie kann vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden und ist daher höherwertig als Wärmeenergie.

Eine Alternative zur Angabe des Nutzungsgrades ist die Stromkennzahl, welche das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung eines BHKW wiedergibt. In Tabelle 2-1 sind mittlere Kennzahlen für BHKW für unterschiedliche Motoren aufgetragen. Der elektrische Wirkungsgrad erreicht Werte zwischen 30 und 40 %, wobei große Dieselmotoren bis zu 52 % erreichen können.

		Gas-Otto		Gas-Diesel		Diesel	
		Von	bis	von	bis	von	bis
A	Elektrischer Wirkungsgrad bei Nennlast in %	31	36	33	38	35	40
B	Thermischer Wirkungsgrad bei Nennlast in %	54	53	47	46	43	42
A + B =	Gesamtwirkungsgrad bei Nennlast in %	85	89	80	84	78	82
C	Elektrischer Nutzungsgrad in %	30	35	32	37	34	39
D	Thermischer Nutzungsgrad in %	52	51	45	44	41	40
C + D =	Gesamtnutzungsgrad in %	82	86	77	81	75	79
C / D =	Stromkennzahl	0,58	0,69	0,71	0,84	0,83	0,98

Tabelle 2-1: Kennzahlen von Verbrennungsmotoren in BHKW nach VDI 2067 [18]

Es sind weiterhin Nutzungsgrade aufgeführt. Diese Werte ergeben sich, wenn man die tatsächlichen Wirkungsgrade während des Anlagenbetriebs über längere Zeiträume mittelt. Man erkennt, dass die Nutzungsgrade meist 1 - 2 % unter den Wirkungsgraden liegen. Dies ist vor allem auf den Teillastbetrieb zurückzuführen, da dieser geringere Wirkungsgrade aufweist als der Nennlastbetrieb.

Der Gesamtnutzungsgrad liegt zwischen 75 und 86 %. Die entsprechenden Werte für einzelne Anlagen können zwischen 70 und 95 % liegen. Die Unterschiede der Wirkungsgrade für gleiche Motorfamilien ist auf die technische Ausführung

zurückzuführen. Die Werte werden jedoch auch maßgeblich durch die Größe der Motoren bestimmt.

Die oben aufgeführten Kennwerte sind spezifisch für die Einheit aus Motor, Generator und Wärmetauscher. Wie in Abbildung 2-1 zu sehen, sind diese Komponenten in ein Umfeld eingebettet, welches vom spezifischen Anwendungsfall abhängt. Kennwerte, welche das BHKW innerhalb dieses Systems charakterisieren, sind die Ausnutzungsdauer, d.h. die Betriebsstunden pro Jahr, und der Deckungsgrad, d.h. der Anteil der vom Blockheizkraftwerk erzeugten an der jährlich vom Verbraucher benötigten Energie.



Man unterscheidet zwischen dem thermischen und dem elektrischen Deckungsgrad. Der thermische Deckungsgrad ergibt sich vor allem aus wirtschaftlichen Überlegungen, da der Einsatz von BHKW meist erst ab einer Ausnutzungsdauer von 5000 h/a rentabel ist [7] (siehe auch Kapitel 3: "Einsatz und Wirtschaftlichkeit").

### 2.1.5 Betriebsweisen von BHKW

Das Verhältnis zwischen erzeugter Wärme und erzeugtem Strom ist für motorgetriebene Anlagen, anders als bei Dampfturbinen, eine feste Größe und kann nicht dem jeweiligen Bedarf angepasst werden. Man muss sich daher entscheiden, welche der beiden erzeugten Energieformen als Steuergröße für den Betrieb verwendet werden soll. In den meisten Einsatzbereichen wird eine wärmegeführte Betriebsweise eingesetzt, d.h. der Bedarf an Wärme des Verbrauchers entscheidet darüber, ob und mit welcher Leistung der Motor gefahren wird. Diese Betriebsweise hat gegenüber der stromgeführten den Vorteil, dass die gesamte erzeugte Energie genutzt wird, da der erzeugte Überschussstrom immer in das Festnetz eingespeist werden kann. Im stromgeführten Fall hingegen kann die eventuell anfallende Überschusswärme nur eingeschränkt genutzt werden, da die eingesetzten Speicher meist nur geringe Mengen an Warmwasser aufzunehmen vermögen. Nur für den Inselbetrieb, d.h. bei Fehlen des Festnetzes, und für industrielle Verbraucher mit einem relativ konstanten Wärmebedarf ist die stromgeführte Betriebsweise sinnvoll.

Die Lastregelung, unabhängig davon ob strom- oder wärmegeführt, kann entweder durch eine Teillastregelung oder eine taktende Ein-Aus-Regelung erfolgen. Die Teillastregelung ermöglicht zwar schnell und flexibel auf Angebotschwankungen zu reagieren, führt jedoch bei Verwendung von Verbrennungsmotoren zu geringeren elektrischen Wirkungsgraden und Gesamtnutzungsgraden. Deshalb wird meist die taktende Ein-Aus-Regelung verwendet, d.h. der Motor wird dann bei optimaler Leistung angefahren, wenn ein Bedarf auftritt. Kurzfristige Bedarfsschwankungen können durch den Speicher ausgeglichen werden. Um längerfristige Bedarfsschwankungen auszugleichen, werden oft

mehrere BHKW-Module in Reihe geschaltet und je nach Nachfrage zu- oder abgeschaltet. Der Vorteil einer mehrmoduligen Anlage liegt auch in der Versorgungssicherheit, da der Ausfall einer Einheit nicht den Ausfall der gesamten Versorgung zur Folge hat.

## 2.2 Verbrennungsmotorgetriebene BHKW - Techniken, Brennstoffe und Emissionen

Die Hersteller von BHKW nutzen meist die in PKW, LKW und Schiffen bewährten Motoren auch für ihre Zwecke. Entsprechend fallen die Leistungsspektren für die Motoren aus. Während Gas-Ottomotoren mit Leistungen zwischen 5 kW und 2,4 MW eingesetzt werden, können Dieselmotoren bis zu 18 MW erreichen. Die Lebensdauer der Motoren kann bis zu 20 Jahre betragen.

### 2.2.1 Brennstoffe

Derzeit kommen flüssige und gasförmige Brennstoffe zum Einsatz. Techniken zur Nutzung fester Brennstoffe mit Hilfe von Stirlingmotoren befinden sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. In Abschnitt 2.3 wird hierauf näher eingegangen.

#### 2.2.1.1 Gasförmige Brennstoffe

Zur Verbrennung von Gasen werden meist Gas-Ottomotoren eingesetzt. Dieselmotoren können ebenfalls verwendet werden, wenn das Gas durch Zusatz von Zündöl zündwilliger gemacht wird. Derartige Dieselmotoren nennt man auch Zündstrahlmotoren.

In den Verbrennungsmotoren von Blockheizkraftwerken kommen die Brennstoffe Erdgas, Deponiegas, Klärgas und Biogas zum Einsatz. Erdgas ist der mit Abstand am häufigsten eingesetzte Brennstoff. In BHKW finden die Erdgastypen L und H Verwendung, wobei sich die Unterscheidung der beiden Typen auf den Heizwert  $H_i$  bezieht. Daneben sind der Brennwert  $H_s$ , der Wobbeindex  $W_s$ , der Gemischheizwert  $H_G$ , die relative Dichte  $d$ , der stöchiometrische Luftbedarf  $L_0$  und die Centanzahl wichtige

brenntechnische Kenndaten von Gasen. Der Brennwert beschreibt die gesamte Wärmemenge, die bei einer vollständigen Verbrennung von Energieträgern frei wird. Er liegt höher als der Heizwert, da er zusätzlich die Kondensationswärme des Wassers berücksichtigt, welches als Verbrennungsprodukt anfällt. Der Heizwert ist der Quotient aus der bei der Verbrennung eines Brennstoffs freiwerdenden Wärmemenge und seiner Masse bzw. Stoffmenge. Der Wobbeindex berechnet sich aus dem Brennwert geteilt durch die Wurzel aus der relativen Dichte des Gases im Vergleich zu Luft=1 und ist ein Maß

für die Wärmebelastung (=Wärmemenge bezogen auf das Volumen des Brennerraumes) des Brenners. Der Gemischheizwert gibt an, welche Energie aus einer Volumeneinheit des stöchiometrischen Luft-Gas-Gemisches extrahiert werden kann. Die Cetanzahl ist ein Maß für die Selbst-Zündfähigkeit eines Gases und somit ein wichtiger Parameter für die motorische Verbrennung beim Dieselmotor. Der stöchiometrische Luftbedarf gibt an, wie viel Volumeneinheiten Luft mindestens notwendig sind, um das Gas vollständig zu oxidieren.

		<b>Erdgas L</b>	<b>Erdgas H</b>	<b>Deponiegas</b>	<b>Klär-Biogas</b>
Heizwert ( $H_i$ )	KWh/m <sup>3</sup>	9,03	11,04	4,98	6,07
Brennwert ( $H_s$ )	KWh/m <sup>3</sup>	10	12,2	5,53	6,74
Wobbeindex ( $W_s$ )	KWh/m <sup>3</sup>	12,4	15	5,57	8,06
Gemischheizwert ( $H_G$ )	KWh/m <sup>3</sup>	0,93	0,96	0,86	0,89
Relative Dichte (d)	-	0,65	0,66	0,987	0,7
Stöchiometrischer Luftbedarf ( $L_0$ )	M <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	8,619	9,89	4,726	5,8
Methanzahl (MZ)	-	88	70	> 130	130

Tabelle 2-2: Kennwerte gasförmiger Brennstoffe für BHKW-Einsatz [22]

In Tabelle 2-2 sind diese Werte sowohl für die beiden Erdgastypen als auch für Klär- und Deponiegas, welche zu den regenerativen Brennstoffen zählen, aufgezeigt. Deponiegas fällt bei der anaeroben Zersetzung in Deponien an und besteht zu jeweils 40 - 60 % aus Methan und CO<sub>2</sub>. Zusätzlich können je nach Deponie Chlor-kohlenwasserstoffe (CKW), Toluol, Benzol, Xylol und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) enthalten sein. Um diese toxischen Substanzen nicht entweichen zu lassen, ist ein Sammlung der Gase notwendig. Eine motorische Verbrennung bietet eine effiziente Möglichkeit der Entsorgung. Wie in Abschnitt 2.2.2.4 näher erläutert wird, ist der Einsatz von Katalysatoren wegen der enthaltenen Katalysatorgifte meist nicht möglich. Daher werden bevorzugt Magermotoren verwendet. Die Verwendung von Klärgas, welches in Faul-türmen bei 32 - 34 °C aus dem Klärschlamm erzeugt wird, bereitet nur hinsichtlich des hohen Schwefelgehaltes von bis zu 0,6 Volumenpro-

zent Probleme [10]. Um die Entstehung von SO<sub>2</sub> zu begrenzen, ist häufig eine Entschwefelung des Klärgases notwendig. Der Methangehalt bewegt sich zwischen 60 und 70 Prozent und führt damit zu größeren Heizwerten als im Fall des Deponiegases.

Weiterhin ist der Einsatz von Biogas möglich. Dieses wird durch die Fermentierung von Gülle, Mist und organischen Reststoffen der Lebensmittelindustrie gewonnen. Die Qualität von Biogas ist stark abhängig von der Zusammensetzung der eingesetzten Rohstoffe. So schwankte bei einer statistischen Erhebung an landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Baden-Württemberg der Methangehalt zwischen 43 und 68,5 %. Der Mittelwert lag bei 58 %. Bei den niedrigen Methananteilen ist die Verbrennung in einem Gasmotor nicht mehr möglich. In 70 % der Fälle werden daher Zündstrahlmotoren eingesetzt, welche durch einen variablen Heizöl-anteil die Verbrennung methanarmer Gase er-

möglichen. Ein oft auftretendes Problem ergibt sich durch den hohen Schwefelwasserstoffgehalt von bis zu über 2000 ppm. Um eine Schädigung des Motors zu verhindern, waren in 81 % der Anlagen biologische Verfahren zur Entschwefelung integriert. Dabei wird  $H_2S$  bakteriell zu elementarem Schwefel und Wasser umgesetzt [15].

### 2.2.1.2 Flüssige Brennstoffe

Neben den Kenndaten, wie sie für gasförmige Brennstoffe aufgelistet wurden, ist bei der Verbrennung flüssiger Stoffe die Viskosität ein bestimmender Parameter. So können nur spezielle, langsamlaufende Dieselmotoren zähflüssige Brennstoffe wie schweres Heizöl oder Pflanzenöle verbrennen. Weiterhin können Verunreinigungen v.a. in Pflanzenölen zur Verkockung des Brennraums bis zum Totalausfall führen. Allein Rapsmethylester (RME), ein Syntheseprodukt aus der Veresterung von Rapsöl mit Methanol, erreicht als regenerativer Brennstoff die Qualität von Heizöl und kann ohne Probleme in Dieselmotoren verbrannt werden. So erreicht Rapsöl auch den gleichen Cetanwert von 55, also eine identische Klopfestigkeit. Der Einsatz von RME ist jedoch mit vielen Nachteilen behaftet, da die Produktion teuer, energieaufwendig und der ökologische Vorteil somit nur noch gering ist. Der Bereich der flüssigen Brennstoffe wird zum größten Teil von leichtem Heizöl (Heizöl EL) abgedeckt, das in Dieselmotoren verbrannt wird. Dieser Heizöltyp ist sehr leichtflüssig, aschefrei und besitzt eine hohe Energiedichte. Die Anforderungen an Heizöl EL sind in der DIN 51603-1 festgelegt. In Tabelle 2-3 sind einige wichtige Kenndaten von Heizöl EL und RME zusammengestellt.

		Heizöl EL nach DIN 51603-1	Rapsöl- Methylester (RME)
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	860	883
Heizwert (H <sub>i</sub> )	kWh/kg	11,8	11,77
Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	6,00	7,15
Schwefelgehalt	Gew. %	<0,20	0,09

Tabelle 2-3: Kennwerte flüssiger Brennstoffe für BHKW-Einsatz [22]

## 2.2.2 Emissionen und Techniken zur Minderung

Der Einsatz von BHKW ergibt gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme  $CO_2$ -Einsparungen zwischen 5 und 70 %. Hierauf wird im Kapitel 4 (Systemanalyse) näher eingegangen. In diesem Kapitel sollen vor allem die klassischen Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Staub/Ruß usw. behandelt werden. Diese fallen, wie bei jeder Verbrennung, auch in BHKW an.

### 2.2.2.1 Gesetzliche Grundlagen

Der Gesetzgeber fordert für die im Anhang der 4. BImSchVO unter 1.4 aufgelisteten Verbrennungsanlagen Emissionsgrenzwerte. Es handelt sich im Einzelnen um Anlagen, die mit den Brennstoffen Altöl, Deponie-, Klär- und Biogas betrieben werden. Für Anlagen mit einer thermischen Leistung unter 1 MW, welche mit Erdgas oder Heizöl betrieben werden und nicht genehmigungsbedürftig sind, sind keine Grenzwerte festgeschrieben wohl aber die Forderung, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind (§ 22 BImSchG). Trotzdem wird in der Genehmigungspraxis auch für kleinere Anlagen die Einhaltung der Emissionswerte nach TA Luft gefordert.

Die Auslegung der genehmigungsbedürftigen Anlagen bestimmt sich nach §5 Abs. 1 Nr. 1-3 BImSchG. Als Hilfe für die Auslegung des §5 Abs. 1 Nr. 2 dient die TA Luft in der Fassung von 1986. Eine Dynamisierung der Grenzwerte erfolgt durch den Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI). In Baden-Württemberg wurde die Dynamisierungsklausel durch "Ausführungserlass des Umweltministeriums zur weitergehenden Verminderung der Emission von Anlagen in Nr. 3.3 TA Luft" vom 4. August 1992 umgesetzt. Für BHKW bedeutsam sind die Reduzierung der  $NO_x$ - und Staub-Emissionswerte für Dieselmotoren und Gasturbinen. Weiterhin konkretisiert die Dynamisierung technische Maßnahmen zur Emissionsminderung. So werden das SCR(selective catalytic reaction)-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.2.4) und die Abgasrückfüh-

nung als Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung angegeben. Außerdem soll zur Minderung von Staubemissionen der Einsatz von Rußfiltern angestrebt werden. In Tabelle 2-4 sind die Anforderungen der TA Luft unter Berücksichti-

gung der Dynamisierung durch den LAI dargestellt. Die genannten Werte sind Zielwerte, welche für Neuanlagen eingehalten werden müssen. Eine Neufassung der TA Luft ist in Vorbereitung.

	Dieselmotoren					Ottomotoren	
	<3 MW	>3 MW	Gasgetriebene Zündstrahlmotoren (Neuanlage)	sonstige Motoren, < 1 MW (Neuanlage)	Sonstige Motoren, > 1 MW (Neuanlage)	4-takt	2-takt
CO	650	650	650	650	650	650	650
NO <sub>x</sub>	4000	2000	500	1000 (Zielwert)	1000 (Zielwert)	500	800
Staub	130	130	50	80 (Zielwert)	50 (Zielwert)		

Tabelle 2-4 Emissionswerte der TA Luft (1986) unter Berücksichtigung der Dynamisierung durch den LAI 1992. (Angaben in mg/m<sup>3</sup> bezogen auf 5 Vol.% O<sub>2</sub>, [22])

Für Verbrennungsmotoren in BHKW sind die übrigen Emissionswerte der TA Luft 86 Nummer 2.3 (krebserzeugende Stoffe), Nummer 3.1.4 (staubförmige, anorganische Stoffe) und Nummer 3.1.7 (organische Stoffe) als Grenzwerte heranzuziehen, sofern nicht neuere Erkenntnisse vorliegen.

### 2.2.2.2 Einflussfaktoren für die Höhe der Emissionen

Art und Umfang der Emissionen hängen vom Brennstoff und vom Verbrennungsprozess ab. Dabei unterscheidet man zwischen umweltneutralen und umweltschädigenden Emissionen.

In Abbildung 2-2 sind Entstehungsmechanismen der Emissionen und die Wirkungsweise von sekundären Minderungsverfahren dargestellt.

Man erkennt, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß alleine vom Treibstoff abhängt, also durch die Verbrennungstechnik nicht beeinflusst werden kann. Vergleicht man die energiespezifischen CO<sub>2</sub>-Gehalte verschiedener Brennstoffe (s. Tabelle 2-5), so erkennt man, dass Erdgas von Natur aus am wenigsten CO<sub>2</sub> pro kWh Energiegehalt emittiert.

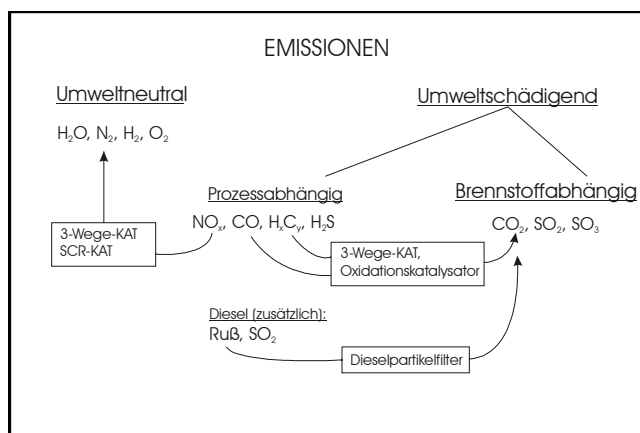


Abbildung 2-2: Entstehung der Emissionen und Wirkungsweise von sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen

Brennstoff/Energieträger	spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor in g/kWh (relativ zu Erdgas in %)
Erdgas	224 (100)
leichtes Heizöl	301 (134)
Steinkohle	381 (170)
Braunkohle	448 (200)
Holz	21 (9)
Deutscher Strommix	739

Tabelle 2-5: Energiespezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen (= Menge an CO<sub>2</sub>, welche pro kWh Brennstoffenergie emittiert wird) [18]

Maßnahmen zur Emissionsvermeidung lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Emissionsminderungsmaßnahmen, welche darauf abzielen, Emissionen gar nicht erst entstehen zu lassen, wie z. B. die Substitution von Erdöl durch Erdgas, werden als **primäre Maßnahmen bezeichnet**. Eine weitere primäre Maßnahme auf der

Brennstoffseite ist die Beschränkung des Schwefelgehaltes in Heizöl. Seit 1.3.1988 erlaubt die 3. BImSchV maximal 0,20 Gew. % Schwefel im Heizöl. Dieser Wert soll ab 2008 EU-weit auf 0,10 Gew. % gesenkt werden. Die Weiterentwicklung der Motortechnik ist das Hauptbetätigungsfeld für primäre Maßnahmen. Es können durch Änderung des Zündzeitpunktes und durch Gestaltung des Brennraums Emissionsminderungen erzielt werden. Maßgeblich werden die Emissionen primär durch die Änderung der Zusammensetzung des Luft-Brennstoff-Gemisches beeinflusst. Im folgenden Abschnitt wird darauf eingegangen, wie es dabei zu Emissionsminderung kommen kann.

Die zweite Kategorie der Emissionsminderungsmaßnahmen sind Abgasreinigungstechniken, sog. **sekundäre Maßnahmen**, z. B. katalytische Abreinigung oder Filter, welche die Konzentration der im Abgas enthaltenen Schadstoffe verringern. In Abb. 2-2 sind die Wirkungsweisen gängiger Katalysatoren für Verbrennungsmotoren eingezeichnet. Ihnen ist gemeinsam, dass sie die bei der Verbrennung entstehenden Schadstoffe entweder in umweltneutrale Gase oder  $\text{CO}_2$  umwandeln.

Die Funktionsweise der verschiedenen Katalysatoren wird in Abschnitt 2.2.2.4 näher erläutert.

### 2.2.2.3 Die Lambda-Zahl als entscheidender Parameter der motorischen Verbrennung (Primärmaßnahmen)

Die Verbrennung ist eine schnell ablaufende Oxidation der Kohlenwasserstoffe, aus denen der Brennstoff besteht. Für die vollständige Oxidation ist eine gewisse Menge an Sauerstoff erforderlich, welche stöchiometrischer Sauerstoffbedarf genannt wird. Der  $\lambda$ -Wert ist das Verhältnis zwischen dem Sauerstoffgehalt eines Brennstoff-Luft-Gemisches bei der Verbrennung und dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf. Bei  $\lambda=1$  spricht man von einer stöchiometrischen, bei  $\lambda>1$  von einer überstöchiometrischen Verbrennung. Es zeigt sich, dass nahezu alle erwähnten Emissionen maßgeblich von der  $\lambda$ -Zahl beeinflusst werden [20], [16]. Wie in Abbildung 2-3 zu sehen, sind die Emissionen an CO und NMHC (= Summe aller  $\text{H}_x\text{C}_y$  außer Methan)

bei  $\lambda=1$  recht hoch und nehmen für steigende  $\lambda$ -Werte zunächst stark ab. Für  $\lambda>1,6$  steigen sie jedoch wieder an. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen hingegen haben für  $\lambda=1$  einen hohen Wert, erreichen bei  $\lambda=1,15$  ihr Maximum und nehmen dann rapide ab. Um die Emissionen aller drei Schadstoffe zu minimieren, ist es am sinnvollsten, die Verbrennung in einem Bereich zwischen  $\lambda=1,5$  und  $1,6$  ablaufen zu lassen. Man spricht dann von einer Magermischverbrennung bzw. von einem Magermotor. Als sekundäre Maßnahmen finden hier der Oxidationskatalysator und das SCR-Verfahren (Selektive Katalytische Reduktion) Anwendung.

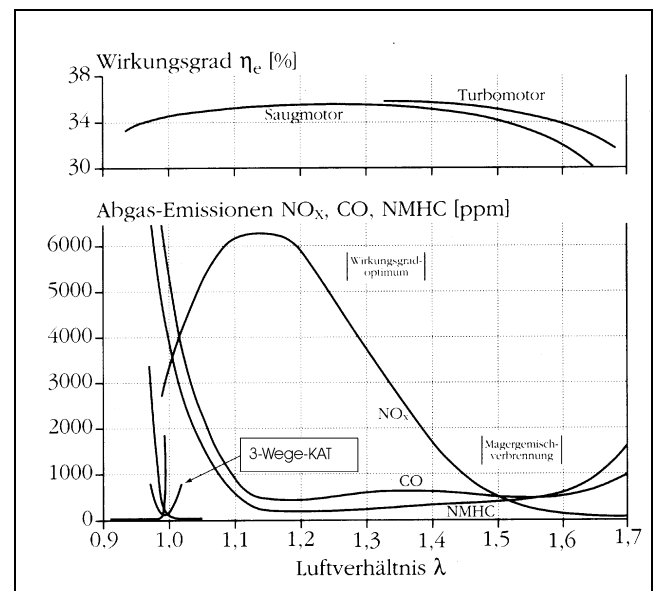


Abbildung 2-3: Abhängigkeit der Emissionen vom Luftverhältnis  $\lambda$  bei Verbrennungsmotoren [20]

Der 3-Wege-Katalysator kann nur in einem sehr schmalen Band um  $\lambda=1$  eingesetzt werden. Wie in Abbildung 2-3 zu sehen, ist die Schadstoffreduzierung sehr groß, nimmt aber sehr schnell ab, wenn  $\lambda$  sich von 1 entfernt. Dieselmotoren werden stets im Magerverfahren betrieben, da für  $\lambda<1,2$  die Rußbildung zu stark wäre.

### 2.2.2.4 Katalysatortechnik (Sekundärmaßnahmen)

Allgemein ist ein Katalysator ein Stoff, welcher die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöht und dadurch bewirkt, dass sich das chemische Gleichgewicht schneller einstellt. Ein Beispiel ist die Oxidation von CO zu  $\text{CO}_2$ . Diese Reaktion findet in der Atmosphäre innerhalb von

Tagen statt. Der Katalysator ermöglicht dieselbe Reaktion innerhalb von Millisekunden und verhindert somit, dass CO seine toxische Wirkung entfalten kann. Katalysatoren im chemischen Sinn sind Edelmetallatome wie Platin und Rhodium. Diese werden auf einen Träger mit großer Oberfläche aufgebracht, der damit eine große Kontaktfläche zum vorbeiströmenden Abgas ermöglicht und gleichzeitig ein möglichst geringes Volumen besitzt. Als Grundstruktur zur Realisierung dieser Anforderungen wird eine Aneinanderlagerung von wabenförmigen Kanälen eingesetzt. Dieses Gerüst besteht aus Keramik oder Edelstahl. Dieser sogenannte Trägermonolith wird mit einer oxidischen Zwischenschicht, meist Aluminiumoxid, beschichtet. Diese ist derart porös, dass sich insgesamt eine Reaktionsfläche von bis 20.000 m<sup>2</sup> bildet, auf welche die katalytisch aktiven Edelmetalle aufgebracht werden (Abbildung 2-4).

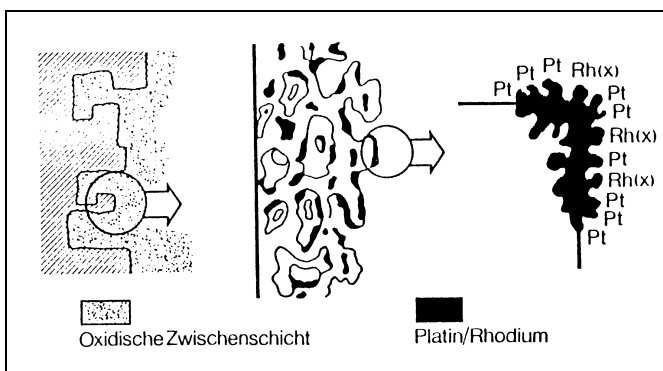


Abbildung 2-4: Vergrößernde Darstellung der Katalysatoroberfläche [12]

- Der 3-Wege-Katalysator

Die Aufgabe des 3-Wege-Katalysators besteht in der Reduktion von NO<sub>x</sub> zu N<sub>2</sub> und in der Oxidation von CO und Kohlenwasserstoffen zu CO<sub>2</sub> und Wasser. Wie bereits erwähnt, ist es dabei wichtig, dass ein stöchiometrisch zusammengesetztes Abgas in den Katalysator gelangt. Bei Luftüberschuss wird die Reduktion der NO<sub>x</sub> verhindert. Bei Luftmangel wird hingegen die Oxidation des CO und der Kohlenwasserstoffe eingeschränkt. Für ein konstantes  $\lambda$  sorgt ein Regelkreis mit einer  $\lambda$ -Sonde als Fühler (Abbildung 2-5). Die Sonde ist in den Abgasstrom vor dem Katalysator eingebracht und misst kontinuierlich den Sauerstoffgehalt. Bei Abweichung vom

Sollwert wird über eine Verbindung mit dem Mischer das Gas-Luft-Gemisch solange verändert, bis der Sollwert wieder erreicht ist.

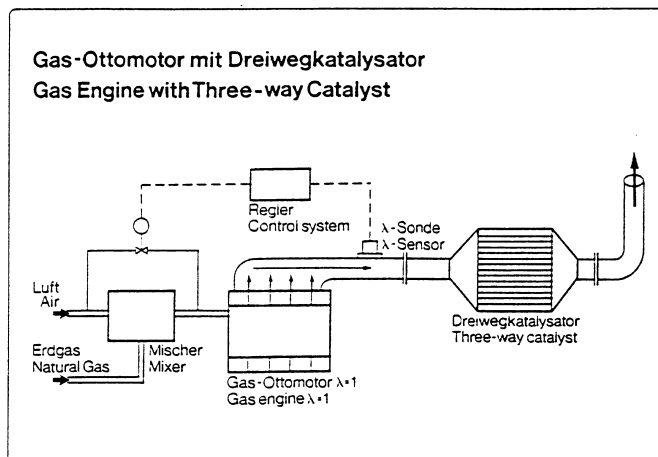


Abbildung 2-5: Der  $\lambda$ -Regelkreis für den 3-Wege-Katalysator [12]

Ein korrekt eingestellter 3-Wege-Kat erreicht für Verbrennungsmotoren die geringsten Emissionswerte. So kann NO<sub>x</sub> bis zu 99%, CO bis zu 95% und H<sub>x</sub>C<sub>y</sub> bis zu 70 % gegenüber dem  $\lambda=1$  Betrieb ohne Katalysator reduziert werden. Das Hauptproblem ergibt sich jedoch aus der Alterung der Katalysatoroberfläche. Durch sogenannte Katalysatorgifte, wie Schwermetalle, Schwefel-, Arsen-, Halogen- und Phosphorverbindungen werden die aktiven Zentren in ihrer Wirkung blockiert. Derartige Stoffe finden sich oft in Klär-, Deponie- und Biogas. Der Einsatz von 3-Wege-Katalysatoren ist daher hier besonders problematisch. Weiterhin kann durch Überhitzung des Katalysators eine Sinterung der oxidischen Zwischenschicht erfolgen, welche zu einer Reduzierung der aktiven Oberfläche führt. Derartige Überhitzungen können dann entstehen, wenn unverbranntes Gasgemisch in den Katalysator eindringt und erst dort zündet. Schließlich können Reste des Motoröls zu einer feinen Staubschicht auf der Eintrittsseite des Katalysators führen und die Wirkung mindern.

- Der Oxidationskatalysator (Oxi-Kat)

In diesem Katalysator findet nur die Oxidation von Schadstoffen statt. Die Reduktion von NO<sub>x</sub> kann also nicht durchgeführt werden. Daraus ergibt sich allerdings der Vorteil, dass das Abgas einen fast beliebig großen Luftüberschuss besitzen darf. Der Oxi-Kat findet somit Anwendung

bei Mager- und Dieselmotoren. Er bildet die einzigen Möglichkeiten, bei derartigen Motoren die CO- und  $H_xC_y$ -Emissionen zu senken. Da, wie oben dargestellt, die Magermotoremissionen eher gering sind, was bei steigendem Luftüberschuss insbesondere für  $NO_x$  gilt, wird meist auf eine aufwendige  $NO_x$ -Reduzierung verzichtet. Das zur  $NO_x$ -Reduktion bekannte SCR-Verfahren ist erst bei großen Anlagen mit mehreren Megawatt Leistung einsetzbar und notwendig. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Oxi-Kat weitaus weniger empfindlich auf Katalysatorgifte reagiert als der 3-Wege-Kat. Deshalb ist die Kombination von Magermotor und Oxi-Kat vorteilhaft bei der Verbrennung von belastetem Klär- und Deponiegas.

- Der SCR(selective catalytic reaction)-Katalysator

Um die Stickoxidemissionen von Mager- und Dieselmotoren zu reduzieren, kann das SCR-Verfahren eingesetzt werden. Durch die Zugabe von Ammoniak oder Harnstoff zum Abgas kann in einem Katalysator das  $NO_x$  zu  $N_2$  und Wasser reduziert werden [12]. Die Wirksamkeit ist begrenzt durch den sogenannten Ammoniak-schlupf. Dies ist die Menge an Ammoniak, welche den Katalysator unverbraucht verlässt. Beim Start und beim Stop steigt ab einer gewissen Reduktionsrate der Stickoxide auch der Ammoniak-schlupf an. Da auch Ammoniak ein umweltbelastender Stoff ist, muss der Ammoniak-schlupf und somit auch eine weitere Reduktion von Stickoxiden in der Start- und Stop-Phase begrenzt werden. Wie schon oben erwähnt, ist ein SCR-Kat erst für große Dieselmotoren rentabel. In Baden-Württemberg waren im Jahr 1997 nur 6 dieselgetriebene Anlagen bekannt, welche eine SCR-Reinigung durchführten.

- Der Dieselpartikelfilter

Dieselpartikel bestehen meist aus einem kohlenstoffhaltigen Kern mit Anlagerungen von Kohlenwasserstoffen und anorganischen Verbindungen. Die Anwendung von Dieselpartikelfiltern, auch Rußfilter genannt, beschränkt sich in BHKW bisher auf wenige Anlagen. Realisierbar sind keramische Katalysatoren, welche in ihren Kanälen die Rußpartikel zurückhalten. Durch die katalytische Wirkung werden die Par-

tikel schon bei  $500^\circ\text{C}$  gezündet und glimmen rückstandsfrei ab. Eine nachgeschaltete Oxidationszone sorgt für die Umwandlung von CO und  $H_xC_y$  in  $CO_2$  und Wasser. Eine Anlage der Degussa erreicht mit dieser Technik eine Partikelreduktion von knapp 60 %. Probleme ergeben sich, wenn es sich bei den Partikeln nicht um brennbaren Ruß, sondern um unbrennbare Öl- asche handelt. Es kommt dann zu irreversiblen Verstopfungen des Katalysators.

Entwicklungen der letzten Jahre zielen auf die Rußemissionsminderung von Nutzfahrzeugen ab. Wie eine Studie des LAI zeigt, ist das größte kanzerogene Gefährdungspotential aller Luftschadstoffe der verkehrsbedingte Dieselruß. In den letzten Jahren haben sich die Hinweise verdichtet, dass besonders die sehr feinen Partikel in der Größenordnung bis 100 nm kanzerogene Wirkung besitzen [13]. Die neueste Filtergeneration für Dieselfahrzeuge kann bis zu 99,9 % dieser Feinstpartikel und bis zu 90 % der gesamten emittierten Partikelmasse zurückhalten. Dies wird realisiert durch einen Kunstfasfilter, an dem die Partikel adsorbiert werden. Die adsorbierten Partikel werden entweder im Ruhebetrieb des Motors oder kontinuierlich durch Zugabe von Additiven zum Treibstoff bei Betriebstemperatur des Filters abgebrannt [23]. Derartige Filter werden in Zukunft sicherlich auch in BHKW zum Einsatz kommen können. Zum einen sind die technischen Anforderungen geringer, da der Motor gleichmäßiger läuft als im mobilen Einsatz. Zum anderen ist diese Technik in Anbetracht der Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch Dieselpartikel und die an ihnen haftenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Reinigungstechnologien.

### 2.2.3 Emissionen bestehender BHKW

Zunächst sollen hier Emissionsfaktoren für BHKW mit einer thermischen Leistung über 200 kW wiedergegeben werden. Diese Werte wurden einer Erhebung der Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH (UMEG) aus dem Jahr 1997 entnommen. Es wurden Messwerte aus dem gesamten Bundesgebiet zusammengetragen, um einen Quer-

schnitt zur Ermittlung der Emissionsfaktoren zu erhalten. Unter Emissionsfaktoren wird die Menge eines Schadstoffs, welche pro Einheit eingesetzter Brennstoffenergie emittiert wird, verstanden.

In Abbildung 2-6 sind die Emissionsfaktoren für Gas-Otto-Motoren mit Leistungen zwischen 200 kW und 4 MW dargestellt. Als Vergleich sind die Emissionswerte der TA Luft eingezeichnet.

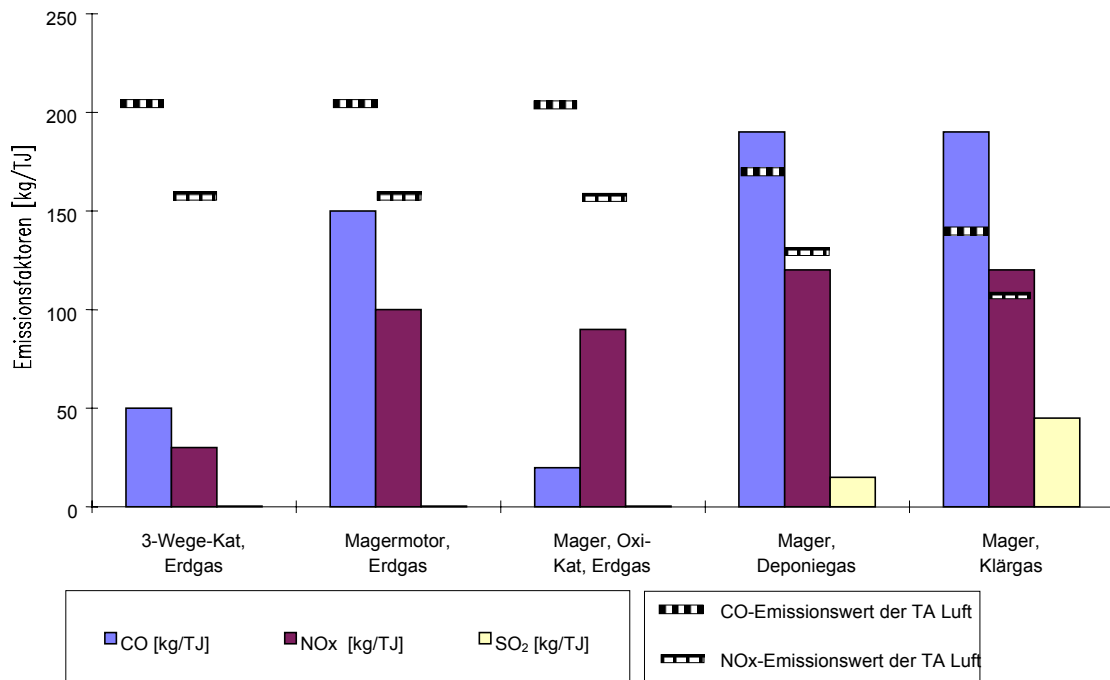


Abbildung 2-6: Emissionsfaktoren für Gas-Otto-Motoren mit Leistungen zwischen 200 kW und 4 MW (Werte aus [20])

Beim Einsatz von 3-Wege-Katalysatoren werden die geringsten Emissionen beobachtet. Die CO-Emissionen können durch die Kombination von Magermotor mit Oxi-Kat weiter gesenkt werden. Die Emissionswerte der TA Luft werden eingehalten. Probleme zeigen sich nur beim Einsatz von Klär- und Deponiegas. Hier können die CO- und NO<sub>x</sub>-Werte nicht eingehalten werden. Der Schwefelgehalt der genannten Gase führt zu erhöhtem SO<sub>2</sub>-Ausstoß.

In Abbildung 2-7 sind die Emissionsfaktoren für Dieselmotoren mit unterschiedlicher Reinigungstechnik und für die Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas aufgetragen.

Die geringsten Emissionen werden von Motoren mit SCR-Reinigung und Oxi-Kat bei Einsatz von Erdgas erzielt. Verwendet man dieselbe Technik zur Verbrennung von Heizöl EL, so sind sämtliche Emissionswerte nahezu viermal so hoch. Besonders auffällig sind die hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen. Sie unterschreiten allerdings alle

die Werte der TA Luft. Viele der bestehenden Anlagen überschreiten jedoch bei weitem die seit 1992 verschärften NO<sub>x</sub>-Werte für Neuanlagen. Die Staubwerte unterschreiten ebenfalls die geltenden Werte für Altanlagen. Die Werte für Neuanlagen (s. Tabelle 2-4) werden z. T. jedoch überschritten.

Die in den Abbildungen 2-6 und 2-7 dargestellten Emissionsfaktoren beziehen sich jeweils auf Anlagen mit mindestens 200 kW<sub>th</sub>. Um die Emissionen von Klein-BHKW zu zeigen, wurden Daten aus dem Programm GEMIS 3.08 aufbereitet. Es wurden dabei nur Anlagen mit einer thermischen Leistung von jeweils 50 kW<sub>th</sub> betrachtet.

Abbildung 2-8 zeigt ein heizölbetriebenes Dieselaggregat mit Oxidationskatalysator, einen erdgasbetriebenen Gas-Ottomotor mit 3-Wege-Kat und einen biogasbetriebenen Gas-Ottomotor mit 3-Wege-Kat.



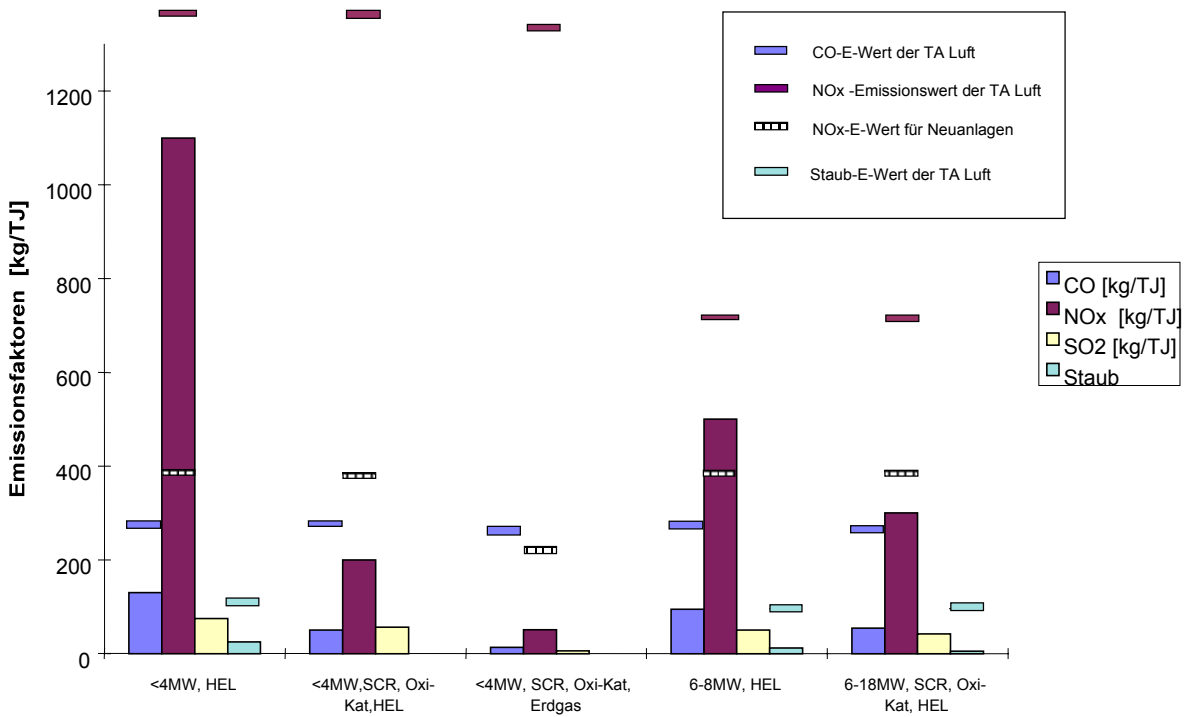


Abbildung 2-7: Emissionsfaktoren stationärer Dieselmotoren mit Leistungen zwischen 200 kW und 18 MW (Werte aus [20])

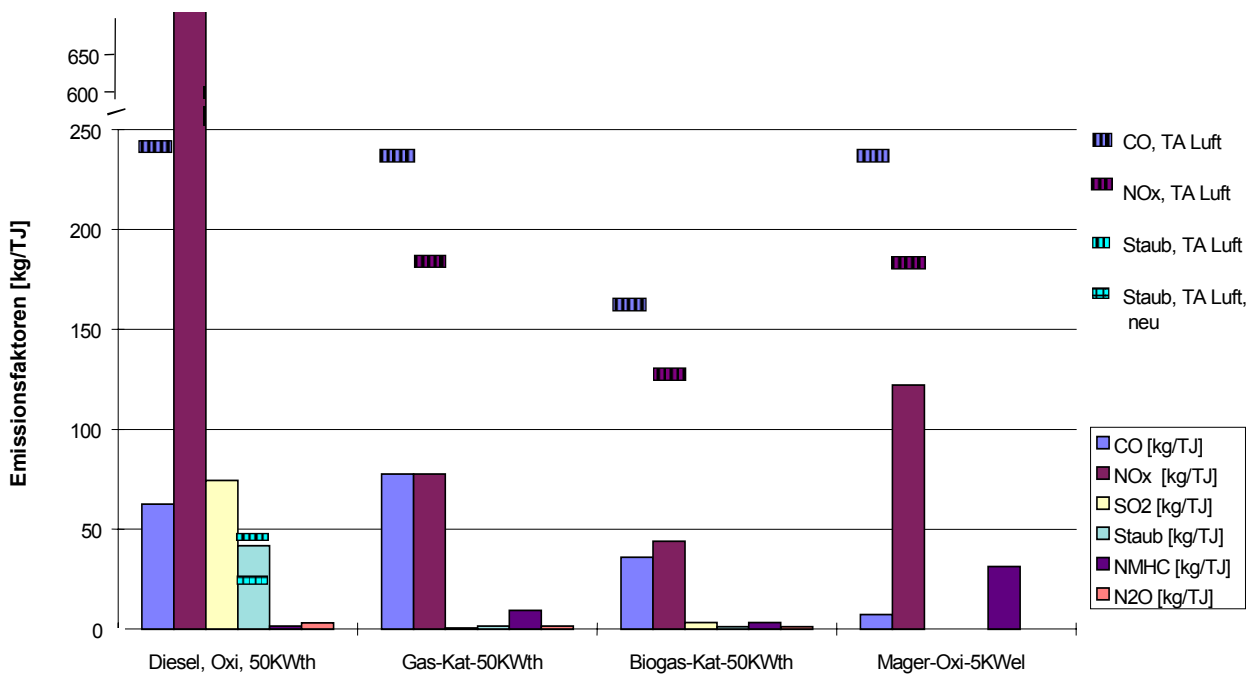


Abbildung 2-8: Emissionsfaktoren von Klein-BHKW (Werte aus [29] und [31])

Zusätzlich ist noch ein erdgasbetriebener Magermotor mit Oxidationskatalysator hinzugefügt. Die Emissionsdaten hierfür entstammen einem Feldversuch der Hessen-Energie und stellen den Mittelwert von 15 Anlagen der Firma Fich-

tel&Sachs dar. Von allen Anlagenkonfigurationen können die Werte der TA Luft eingehalten werden. Die Konfigurationen mit Oxidationskatalysator weisen sehr geringe CO-Werte, jedoch vergleichsweise hohe NO<sub>x</sub>-Werte auf. Der ge-

zeigte Dieselmotor vermag den Emissionswert der TA Luft (1260 kg/TJ) zwar ohne weiteres einzuhalten, den geforderten Zielwert von 315 kg/TJ für Neuanlagen überschreitet er jedoch um ca.100 %.

Beim Vergleich der Abbildungen 2-6, 2-7 und 2-8 ist zu erkennen, dass die Emissionswerte der TA Luft meist eingehalten werden können. Probleme können jedoch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen von Dieselmotoren und die Verwendung von Magermotoren ohne Oxidationskatalysator bei der Verbrennung von Deponie- und Klärgas be-reiten.

## 2.3 Der Stirling-Motor in Blockheizkraftwerken

Der erste Stirling-Motor wurde bereits vor 150 Jahren von dem gleichnamigen schottischen Pfarrer gebaut. Er ist heute nicht weit verbreitet. Der Hauptgrund liegt darin, dass er wegen seines recht hohen Gewichts für Kraftfahrzeuge ungeeignet ist und somit nicht stetig weiterentwickelt wurde wie etwa der Otto- oder Dieselmotor. Dieser Motor hat eine Reihe von Vorteilen, die ihn insbesondere für den Einsatz in BHKW interessant machen [9].

### 2.3.1 Funktionsweise

In Abbildung 2-9 ist ein Stirlingmotor abgebildet, wie er von der Firma Solo hergestellt wird. Die Grundeinheit besteht aus zwei Kolben, welche sich jeweils in einem Zylinder befinden und über das Pleuel die Kurbelwelle antreiben. Man unterscheidet den Kompressions- und den Expansionskolben. Dem Erhitzer wird durch eine nahezu beliebige Wärmequelle Energie zugeführt. Der Stirling-Prozess lässt sich thermodynamisch in zwei Isothermen und zwei Isochoren einteilen.

Das Arbeitsgas Helium wird bei niedriger Temperatur unter Wärmeabfuhr an das Kühlwasser im Kompressionszylinder verdichtet. Beim anschließenden isochoren Überschieben in den Expansionszylinder nimmt das Gas im Regenerator Wärme auf und erwärmt sich auf etwa 650 °C. Im nächsten Schritt wird dem Gas durch den

Erhitzer Wärme zugeführt. Die resultierende isotherme Expansion drückt den Expansionskolben nach unten, wodurch die eigentliche mechanische Arbeit verrichtet wird. Danach wird das Gas bei gleichem Volumen in den Kompressionszylinder zurückgeschoben, wobei es sich im Regenerator abkühlt. Der Regenerator hat während eines Kreisprozesses einmal die Funktion einer Wärmesenke und ein anderes mal die Funktion einer Wärmequelle zu erfüllen. Er wirkt somit als thermischer Speicher zwischen den beiden Temperaturniveaus.

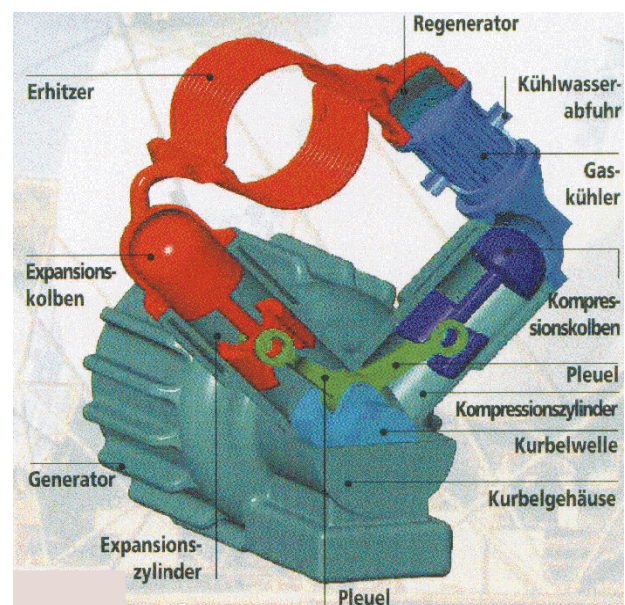


Abbildung 2-9: Querschnitt durch einen Stirlingmotor der Firma SOLO (aus [19])

Folgende Vorteile ergeben sich aus der beschriebenen Funktionsweise gegenüber einem Otto- bzw. Dieselmotor:

- Da keine Explosionsvorgänge stattfinden und aufgrund der geschlossenen Bauweise ist die Materialbeanspruchung gering. Dadurch ergeben sich lange Motorlaufzeiten und lange Wartungsintervalle. Für den beschriebenen Solo-Motor ergaben sich in der Testphase Wartungsintervalle zwischen 5000 und 8000 Stunden.
- Die Schadstoffemissionen liegen auf dem Niveau moderner Gasbrenner, d.h. um den Faktor 10 niedriger als bei Gas-Otto-Motoren. Der 10 kW<sub>el</sub>-Motor von Solo emittiert 10 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>, 20 mg/m<sup>3</sup> CO und

$CxHy < 1 \text{ mg/m}^3$ , [5]. In Tabelle 2-7 des Abschnitts 2.4.4 werden diese Werte mit den Emissionen anderer Techniken verglichen.

- Die Wirkungsgrade von Stirlingmotoren hängen nicht von der Leistung ab. Ein Teillastbetrieb ist somit ohne Probleme möglich.
- Durch die äußere Wärmezufuhr ist die Verwendung von Biomasse prinzipiell möglich. Techniken zur Nutzung von fester Biomasse befinden sich noch in der Entwicklung. Die Verwendung von Holzgas ist bereits in einigen Anlagen erfolgt. In manchen Fällen gab es Probleme mit der Ablagerung von Stäuben an den Wärmeeintragsflächen, weshalb eine vorherige Entstaubung der Gase angeraten wird. Gute Ergebnisse beim Einsatz von Biomasse lieferten hingegen die von Stirling Dynamics (Indien) und Danstoker/DTU (Dänemark) entwickelten Prototypen. Auf dem deutschen Markt sind derzeit jedoch keine derartigen Techniken erhältlich.

### 2.3.2 Stand der Entwicklung

Derzeit befinden sich in Deutschland Stirling-BHKW-Module von zwei verschiedenen Herstellern kurz vor der Serienfertigung. Die bereits vorgestellten Motoren von Solo besitzen eine Leistung zwischen 3,5 und 9  $\text{kW}_{\text{el}}$ . Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 24 %, der thermische Wirkungsgrad bei etwa 68 %. Die Wirtschaftlichkeit von einem 7  $\text{kW}_{\text{el}}$ -Modul soll ab einer jährlichen Laufzeit von 5000 h gegeben sein. Nach einer Testphase mit 20 Modulen hat man sich Ende 1999 für eine Serienfertigung entschieden. Die Markteinführung von Solo ist für 2001 geplant.

Weiterhin wird von einem 40  $\text{kW}_{\text{el}}$ -Modul der Firma Heidelberg Motor GmbH in der Literatur berichtet. Dieses soll einen elektrischen Wirkungsgrad von 28 % und einen thermischen Wirkungsgrad von 63 % besitzen. Es ist nicht bekannt, ob inzwischen eine Serienfertigung angelaufen ist.

Die derzeitigen Preise für Stirling-Module sind aufgrund von Kleinserienproduktionen noch zu hoch, um mit konventionellen Aggregaten konkurrieren zu können. Wenn es jedoch gelingt,

die erwartete Kostendegression durch die Massenfertigung zu realisieren, dürften die Vorteile von Stirling-Motoren ein entscheidendes Argument für deren Einsatz liefern.

## 2.4 Brennstoffzellen

Die letzten Jahre brachten für die schon seit vorigem Jahrhundert bekannte Brennstoffzelle (BZ) einen gewaltigen Entwicklungs- und Innovationsschub. Durch die neuen Techniken eröffnen sich für die Brennstoffzelle neue Anwendungsfelder. Neben dem Einsatz in Kraftfahrzeugen ist hier vor allem der stationäre Einsatz in Blockheizkraftwerken interessant. Schon heute ist absehbar, dass aufgrund der hohen Modularität von Brennstoffzellen ein wirtschaftlicher Einsatz in einigen Jahren möglich ist. Brennstoffzellen zeigen gegenüber Verbrennungsmotoren einige deutliche Vorteile:

- Werden Verbrennungsmotoren außerhalb der Nennlast betrieben, so sinkt ihr Wirkungsgrad rapide ab. Bei Brennstoffzellen fällt dieser Abfall viel flacher aus. Sie sind somit auch für den Teillastbetrieb gut geeignet.
- BZ besitzen kaum wartungs- und geräuschintensive, bewegte Teile.
- BZ unterbieten die Emissionen von Verbrennungsmotoren um das 3- bis 150-fache.

Wenn es gelingt, die Lebensdauer der Anlagen zu erhöhen und gleichzeitig die Produktionskosten zu senken, werden Brennstoffzellen schon bald weite Verbreitung finden.

### 2.4.1 Funktionsweise

Die Brennstoffzelle verwandelt chemische Energie in Strom. Er wird erzeugt aus Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ). Im Prinzip bestehen alle Brennstoffzellen aus zwei porösen Flächen, den Elektroden (Kathode und Anode), die eine dritte Fläche, der Elektrolyt trennt. An die Anode wird Wasserstoff herangeführt, an die Kathode Sauerstoff. Ohne Elektrolyt gäbe es eine Knallgasreaktion. Der Elektrolyt bewirkt eine elektrochemische Reaktion: An der Anode bilden sich positiv geladene Wasserstoff-Ionen, an der Kathode

de negativ geladene Sauerstoff-Ionen. Dadurch entsteht eine elektrische Spannung wie zwischen den Polen einer Batterie, die sich über einen Stromkreis nutzen lässt.

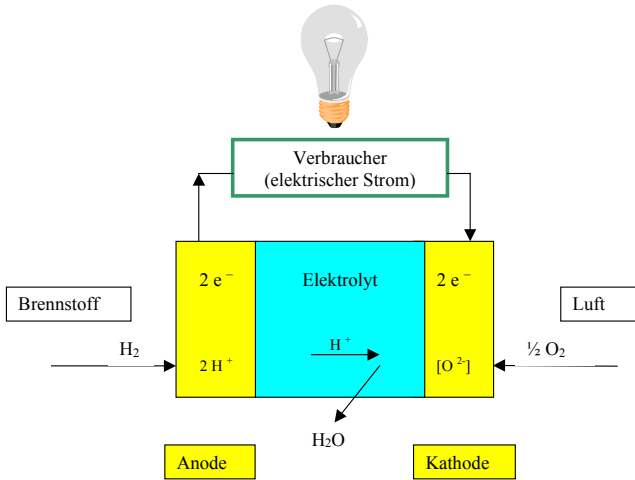


Abbildung 2-10: Funktioneller Aufbau einer Brennstoffzelle

Reaktionsschema:

1. Anodenreaktion:  $2 H_2 \rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$
2. Kathodenreaktion:  $4 H^+ + 4 e^- + O_2 \rightarrow 2 H_2O$
3. Gesamtreaktion:  $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$

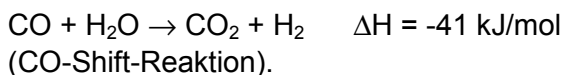
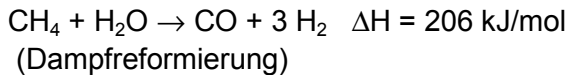
### 2.4.2 Technische Realisierung

Als Elektrodenmaterial werden Nickelverbindungen oder Platin eingesetzt. Das entscheidende Merkmal einer Brennstoffzelle ist jedoch der Elektrolyt. Dieser gibt der BZ auch den Namen. In Tabelle 2-6 sind die vier wichtigsten Brennstofftypen zusammengestellt. Man unterscheidet phosphorsaure Brennstoffzellen (PAFC), Polymermembran-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC), Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (MCFC) und keramische Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC). Weiteres Merkmal ist die Betriebstemperatur. Während PEMFC-Zellen schon ab 50 °C arbeiten [8], erfordert die SOFC bis zu 1100 °C. Hohe Temperaturen verhindern eine variable Leistungsabgabe, weshalb die SOFC, MCFC und PAFC für den Grund- bzw. Mittellastbetrieb benutzt werden. Allein die PEMFC ermöglicht eine schnelles An- und Abschalten und ist daher für Kraftfahrzeuge geeignet. Die Wirkungsgrade liegen zwischen 40 und 60 % und sind u.a. davon abhängig, ob Wasserstoff oder Erdgas verwendet wird. Erdgas muss zunächst der Reformierung unterzogen werden. Dieser zweistufige Prozess, bestehend aus Dampfreformierung und CO-Shifting, benötigt einen Teil des erzeugten Stroms und

	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
	Phosphorsaure Brennstoffzelle	Polymermembran-Elektrolyt-Brennstoffzelle	Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle	Oxidkeramische Brennstoffzelle
<b>Elektrolyt</b>	Phosphorsäure (H2SO4)	Polymermembran	Li2CO3/Na2CO3	Yttrium-dotiertes Zirkoniumoxid
<b>Temperatur [°C]</b>	160 - 220	50 - 90	600 - 660	800 - 1000
<b>el. Wirkungsgrad [%]</b>	Erdgas: 40	Erdgas: 40 H2: 50 - 60	Erdgas: 54	Erdgas: 50 - 55
<b>Bedingungen an Brennstoff</b>	S < 1 ppm CO < 1% N2 < 4%	S < 1 ppm CO < 10-100 ppm	S < 1 ppm CO-tolerant	S < 1 ppm CO-tolerant
<b>Leistungsbereich</b>	einige 10 kW bis einige 100 kW	einige W bis einige 100 kW	einige 100 W bis einige MW	einige kW bis einige MW
<b>Betriebsweise</b>	Mittellast - Grundlast	variabel	Grundlast	Mittellast - Grundlast
<b>Reformierung</b>	extern	extern	intern oder interne Teilreformierung	interne Teilreformierung
<b>Entwicklungsstand</b>	Marktprodukt	seit '95: Einsatz in Kraftfahrzeugen	Demonstrationsanlagen seit '96	Pilotanlage seit '97

Tabelle 2-6: Technische Merkmale der 4 wichtigsten Brennstoffzellentypen (nach [17])

vermindert somit den elektrischen Wirkungsgrad. Die Dampfreformierung erzeugt aus Methan und Wasser unter Zufuhr von Wärme Kohlenmonoxid und elementaren Wasserstoff. Die CO-Shift-Reaktion bewirkt eine Oxidation von Kohlenmonoxid durch Wasser zu Kohlendioxid und elementarem Wasserstoff. Diese Reaktion ist exotherm:



Bei der MCFC und der SOFC wird die Reformierung zumindest teilweise in der Brennstoffzelle durchgeführt. Hierdurch sinkt der energetische Aufwand, und die elektrischen Wirkungsgrade dieser beiden Typen sind bei der Verwendung von Erdgas höher als bei der PAFC oder der PEMFC.

### 2.4.3 Gasqualität

An die Gasreinheit werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. Während Schwefel- und Halogenverbindungen in allen Zelltypen zu Reaktionshemmungen führen und somit aus dem Rohgas entfernt werden müssen, ist die Empfindlichkeit gegenüber Kohlenmonoxid unterschiedlich. Bei den PAFC und PEMFC kommt Platin oder Gold als Elektrodenmaterial zum Einsatz. Dieses wird durch CO blockiert. Die MCFC und SOFC sind hingegen resistent gegenüber Kohlenmonoxidverunreinigungen des Rohgas. Die PAFC ist zusätzlich empfindlich gegenüber Stickstoff, welcher in Form von Ammoniak die Anodenreaktionen behindert.

### 2.4.4 Emissionen

In Tabelle 2-7 werden die Emissionen einer PAFC-Zelle PC25 des Herstellers ONSI mit denen des in Abschnitt 1.2.3 beschriebenen 5 kW<sub>el</sub>-Magermotors mit Oxi-KAT sowie mit einem 10-kW<sub>el</sub> Stirlingmotor verglichen. Weiterhin sind die Grenzwerte der TA Luft eingetragen. Die Emissionswerte der Brennstoffzelle liegen weit unterhalb der Grenzwerte der TA Luft.

	PAFC (PC25) [mg/m <sup>3</sup> ]	Stirlingmotor 10 kW- (Solo) [mg/m <sup>3</sup> ]	Magermotor 5 kW- mit Oxi-Kat [mg/m <sup>3</sup> ]	TA Luft [mg/m <sup>3</sup> ]
NO <sub>x</sub>	2,7	10	394	500
CO	6,7	20	23	650
H <sub>x</sub> C <sub>y</sub>	7,6	< 1	101	150

Tabelle 2-7: Emissionen der PAFC-Zelle PC25 [24] im Vergleich zu einem Stirlingmotor [19], einem schadstoffarmen 5kW-Magermotor mit Oxi-Kat [29] und den Emissionswerten der TA Luft

### 2.4.5 Entwicklungsstand der verschiedenen Brennstoffzellentypen

#### • PAFC

Dieser BZ-Typ ist zur Zeit am weitesten entwickelt. Seit 1992 wird von der Firma ONSI ein Brennstoffzellen-BHKW dieses Typs auf dem Markt angeboten. Die sogenannte PC25 leistet 200 kW<sub>el</sub> und 226 kW<sub>th</sub>. Laut Hersteller soll sie eine Lebensdauer von 40000 Betriebsstunden besitzen. Nach dieser Zeit soll ihr elektrischer Wirkungsgrad von anfangs 40 % auf 34 % gesunken sein. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei 75 - 85 %. In Deutschland sind derzeit 13 Anlagen dieser Serie in Betrieb. Zwei haben ihren Betrieb bereits nach 31000 bzw. 34000 Stunden eingestellt, nachdem ihr Wirkungsgrad nach dieser Zeit auf 34 % gesunken war. Die Stromerzeugungskosten lagen für die Anlage mit 34000 Stunden Laufzeit bei 0,33 DM/kWh. Die Investitionskosten für eine derartige Anlage liegen derzeit bei etwa 5000 DM/kW. Das größte PAFC-Kraftwerk mit einer Leistung von 11 MW<sub>el</sub> steht derzeit in Tokio.

#### • PEMFC

Das Prinzip des Polymermembraneinsatzes in Brennstoffzellen ist bereits seit den 60er Jahren bekannt. Erfolgversprechend wurde es jedoch erst durch die Entwicklungen der Firma Ballard (CAN) Ende der 80er Jahre, welche erhebliche Material- und Gewichteinsparungen mit sich brachten. Die PEMFC hat den Vorteil, keine korrosive Flüssigkeiten zu beinhalten. Im Prinzip ist sie leicht zu produzieren und verspricht daher eine enorme Kostendegression in der Serienfertigung. Auch scheint eine hohe Lebensdauer erreichbar. Diese Kriterien machen die Zelle für den Einsatz in Kraftfahrzeugen interessant. Da-

her sind intensive Forschungsbemühungen auf diesen Brennstoffzellentyp gerichtet worden.

Den Einsatz in BHKW forcieren im Moment mehrere Firmen. Ballard, der Pionier auf dem Gebiet, betreibt seit Mitte 1997 eine 250 kW<sub>el</sub>-Pilotanlage. Ende 1999 soll eine Testphase mit mehreren Anlagen anlaufen. Ende 2001 ist die Markteinführung geplant.

Vom deutschen Heizungsbauer Vaillant stammt das Konzept des Brennstoffzellenheizgerätes. Diese Klein-BHKW besitzen eine Leistung zwischen 1 und 10 kW. Sie sollen in Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern die zentrale Erdgasheizung ersetzen bzw. ergänzen und zusätzlich Strom produzieren. Die Markteinführung ist für Ende 2001 geplant [21], [24].

- MCFC

Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen sind recht aufwändig im Betrieb, weshalb nur Anlagen im MW-Bereich für sinnvoll gehalten werden. Das größte technische Problem ergibt sich aus der hohen Temperatur von etwa 600 °C, welche die korrosive Wirkung des Elektrolyten verstärkt und die Lebensdauer bisheriger Anlagen erheblich herabsetzt. Andererseits ergeben sich durch die hohen Temperaturen auch Vorteile, wie z.B. die interne Reformierung von Erdgas oder die mögliche Kopplung des Abwärmestroms mit einer Dampfturbine. Durch eine derartige Kombination könnte der gesamte elektrische Wirkungsgrad auf bis zu 65 % gesteigert werden.

In Deutschland werden derzeit zwei MCFC-Demonstrationsanlagen mit jeweils etwa 300 kW von einem europäischen Konsortium unter der Führung der MTU Friedrichshafen GmbH betrieben [11]. Weltweit sind die Firmen ERC (USA), M-C Power (USA), Hitachi (J) und ECN (NL) mit der MCFC-Entwicklung beschäftigt und betreiben mehrere Test- und Demonstrationsanlagen. Die mit 2 MW<sub>el</sub> größte dieser Anlagen ist seit 1996 in Santa Clara (Kalifornien) in Betrieb.

Wenn es in Zukunft gelingen sollte, die Korrosionsprobleme in den Griff zu bekommen, sind hohe elektrische Wirkungsgrade von 53 - 57 % über mehr als 40 000 Stunden zu erwarten.

- SOFC

Die Entwicklung der Oxidkeramischen Brennstoffzelle ist im Vergleich zu den anderen Brennstoffzellentypen am wenigsten weit fortgeschritten. Meist handelt es sich noch um Versuchs- und Testanlagen. Demonstrationsanlagen befinden sich erst in Vorbereitung. Es wird davon ausgegangen, dass erst in ca. 15 Jahren die SOFC breitere Anwendung finden wird.

Die Vor- und Nachteile sind ähnlich denen der MCFC. Die hohe Temperatur von 800 - 1000 °C ermöglicht interne Reformierung und eine Kopplung mit einer Dampfturbine, provoziert aber gleichzeitig Korrosions- und Wärmespannungsprobleme. Die bisher gemessenen Degradationswerte des Wirkungsgrades von 1- 3 % pro 1000 Stunden sind noch bei weitem zu hoch [14].

## 2.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

Unter der KWKK versteht man die Nutzung der bei der KWK anfallenden Wärmeenergie zum Betreiben einer Kälteanlage. Das Verfahren, um aus Wärme Kälte zu produzieren, ist der Absorptionskälteprozess. Dieser Prozess wird schon seit über 100 Jahren industriell angewandt. Durch die Kopplung mit einer Kältemaschine kann eine größere Auslastung von Blockheizkraftwerken erreicht werden [6]. Dadurch erhöht sich deren Wirtschaftlichkeit. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2-10 schematisch dargestellt. Im Verdampfer verdampft ein Kältemittel bei tiefem Temperatur- und Druckniveau. Dabei wird die Wärme  $Q_0$  aufgenommen, wodurch der Kühleffekt realisiert wird. Danach wird das Kältemittel im Absorber vom Lösungsmittel absorbiert. Die frei werdende Lösungswärme  $Q_{Abs}$  wird vom Absorber abgeführt. Der Druck der kältemittelreichen Lösung wird nun erhöht. Durch die Zuführung der Wärmeenergie  $Q_{Heiz}$  im Austreiber wird das Kältemittel verdampft und im Kondensator wieder verflüssigt. Nach der Entspannung wird das Kältemittel dem Verdampfer zugeführt, wodurch der Kreislauf geschlossen wird.

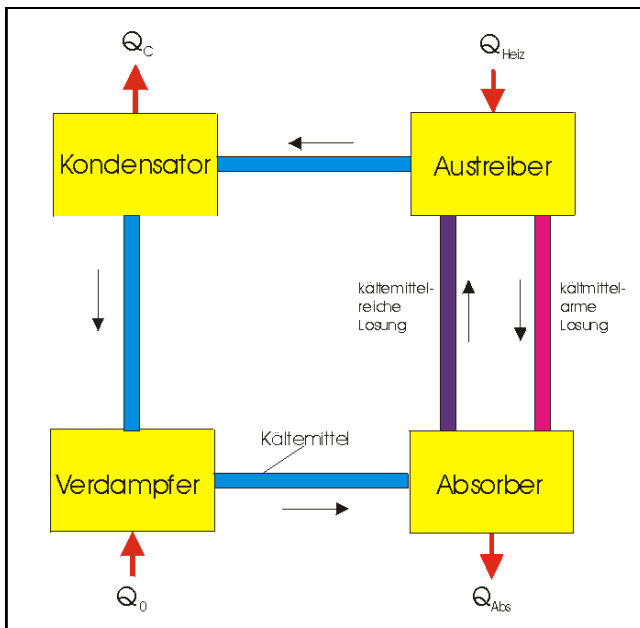


Abbildung 2-10: Vereinfachtes Fließschema einer einstufigen Absorptionskältemaschine (nach [4])

Für Kühltemperaturen über 0 °C kommt meist Wasser-Lithium-Bromid (LiBr) als Kältemittel-Lösungsmittel-Kombination zu Einsatz. Bei Kühltemperaturen unter 0 °C hat sich die Kombination Ammoniak - Wasser bewährt. Die erforderliche Heiztemperatur im Austreiber liegt zwischen 80 und 180 °C. Die Abwärme eines BHKW ist daher gut geeignet für diesen Zweck. Für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine (AKM) ist nur ein geringer elektrischer Energieeinsatz für Umwälzpumpen erforderlich. Die ei-

gentliche Kälteleistung entstammt der Heizenergie  $Q_{\text{Heiz}}$ . Daraus ergibt sich als Wirkungsgrad  $z = Q_0/Q_{\text{Heiz}}$

Die auch als Wärmeverhältnis bekannte Größe  $z$  liegt für einstufige Anlagen für Heiztemperaturen zwischen 80 und 100 °C bei etwa 0,65. Der Einsatz von 2-stufigen Anlagen liefert zwar Wirkungsgrade von 1,1 - 1,2, erfordert allerdings auch höhere Heiztemperaturen von 150-180 °C. Die kombinierte Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom bietet sich als Alternative zur getrennten Erzeugung an. Diese wird üblicherweise durch Bezug von Strom aus dem Festnetz, Bezug von Wärme aus einem Heizbrenner und durch Bezug von Kälte aus einer strombetriebenen Kompressionskältemaschine realisiert.

Die KWKK bietet gegenüber der getrennten Erzeugung folgende Vorteile:

- ❖ effizienter Einsatz von Primärenergie
- ❖ hohe Auslastung des BHKW
- ❖ gute stufenlose Regelbarkeit der AKM bei wirtschaftlichem Teillastbetrieb
- ❖ geringer Wartungsaufwand und lange Lebensdauer

1996 waren in Deutschland 55 der 2200 installierten BHKW mit einer AKM ausgestattet. Die entsprechende Kälteleistung betrug 200 MW<sub>th</sub>. Laut VDEW liegt das mögliche Potential bei 2 - 3 GW<sub>th</sub>.

### 3 Einsatz und Wirtschaftlichkeit

#### 3.1 Der BHKW-Einsatz in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurden im Jahre 1998 nach der Statistik des VDEW 986 BHKW-Anlagen mit einer Gesamtnennleistung von 514 MW<sub>el</sub> betrieben. Hiermit konnten schätzungsweise 2,4 % des Strombedarfs in Baden-Württemberg gedeckt werden. Betrachtet man die Einsatzfelder etwas genauer, so erkennt man, dass der Hauptteil der Anlagen zur Versorgung von öffentlichen Gebäuden und von Industrie und Gewerbe dienen (Abbildung 3-1). Da jedoch, wie in Abbildung 3-1 (unten) zu sehen, die in der Industrie installierten Anlagen höhere Leistungen besitzen, ist der Hauptteil der installierten Leistung auch dort zu finden.

Es fällt auf, dass der größte Wärmeverbraucher, der Wohnungssektor, mit einer installierten elektrischen Leistung von 14135 kW relativ schwach vertreten ist. Hingegen werden Nischenmärkte wie Krankenhäuser oder Schwimmbäder recht häufig von BHKW versorgt. Dies deutet auf einen wesentlichen Aspekt der Wirtschaftlichkeit von BHKW hin.

Ein wirtschaftlicher Einsatz ist nämlich dann erst möglich, wenn der Verbraucher einen möglichst kontinuierlichen, gleichzeitigen Bedarf an Wärme und Strom hat. Dies ist jedoch nur ein Faktor, welcher die Wirtschaftlichkeit und somit auch die Entscheidung für oder gegen ein BHKW beeinflusst.

Die in Abbildung 3-2 dargestellten Leistungsspektren der in Baden-Württemberg installierten Anlagen geben einen Eindruck von typischen Anlagengrößen in den verschiedenen Einsatzgebieten. Wohngebäude werden vor allem mit kleinen Anlagen bestückt.

Industrie und Gewerbe bevorzugen zwar Größen zwischen 100 und 500 kW, sind aber auch darüber und darunter noch vertreten. Anwendungsgebiete wie Deponien, Kläranlagen und die chemische Industrie belegen eher eingeschränkte Leistungsintervalle.

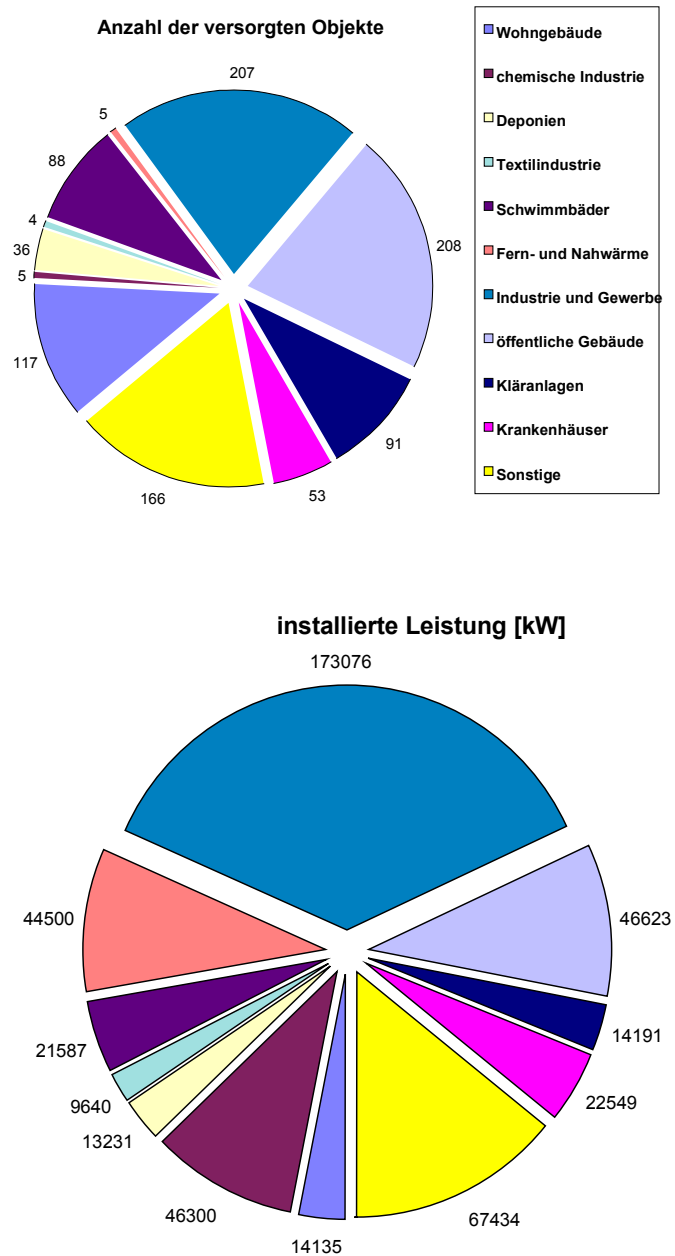


Abbildung 3-1: a) Anzahl der mit BHKW versorgten Objekte in Baden-Württemberg; b) installierte Leistung nach Einsatzfeldern (Werte aus [27])

Biogasanlagen wurden bei diesen Statistiken nicht berücksichtigt. Aus [15] ist jedoch bekannt, dass Mitte 1997 in Baden-Württemberg 68 landwirtschaftliche Biogasanlagen mit einer durchschnittlichen Leistung von 41 kW<sub>el</sub> in Betrieb waren. Daraus ergibt sich eine Gesamtleistung von 2788 kW<sub>el</sub>, womit 1997 ca. 14,1 GWh elektrische Energie erzeugt wurden.



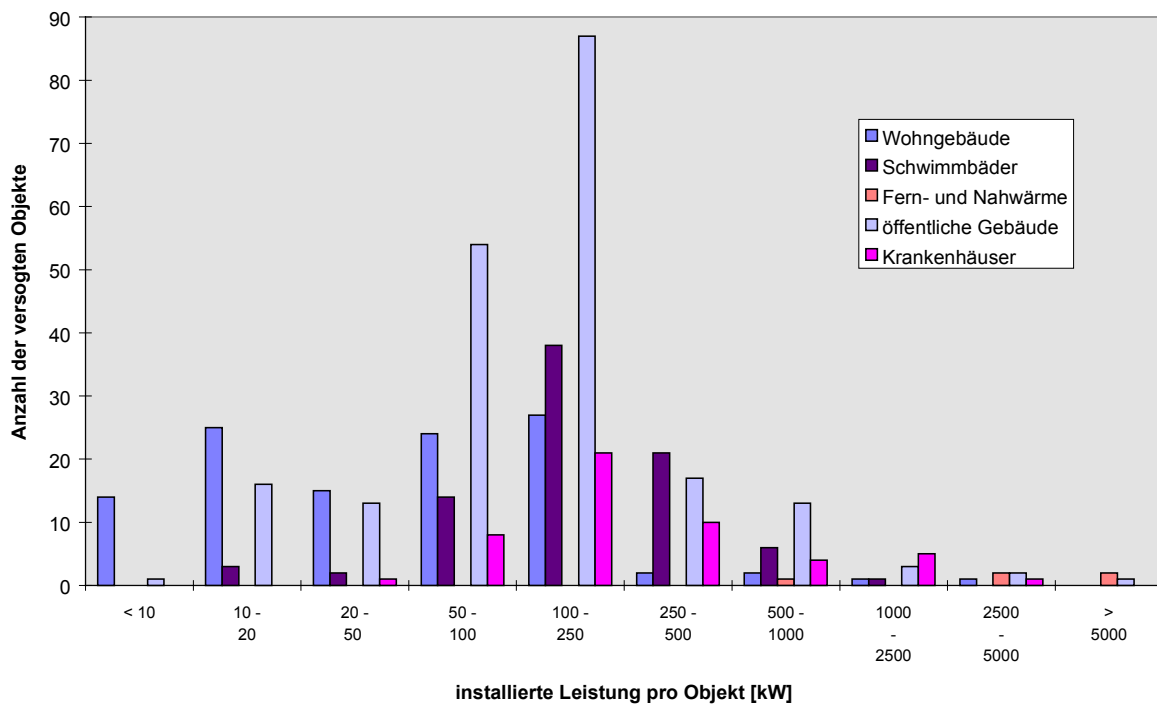
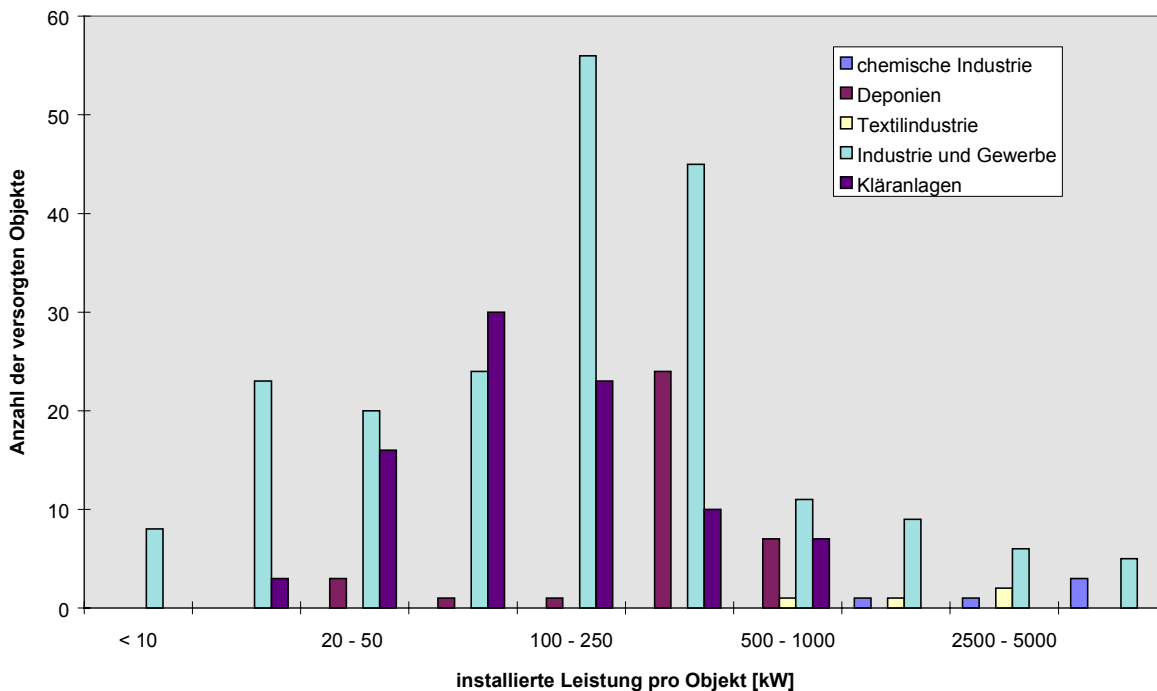


Abbildung 3-2 a) und b): Verteilung der BHKW in Baden-Württemberg auf Leistungsintervalle für die verschiedenen Einsatzfelder (Werte aus [27])

## 3.2 Wirtschaftlichkeit

Die Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit

beeinflussen, sind in Abbildung 3-3 zusammengestellt.

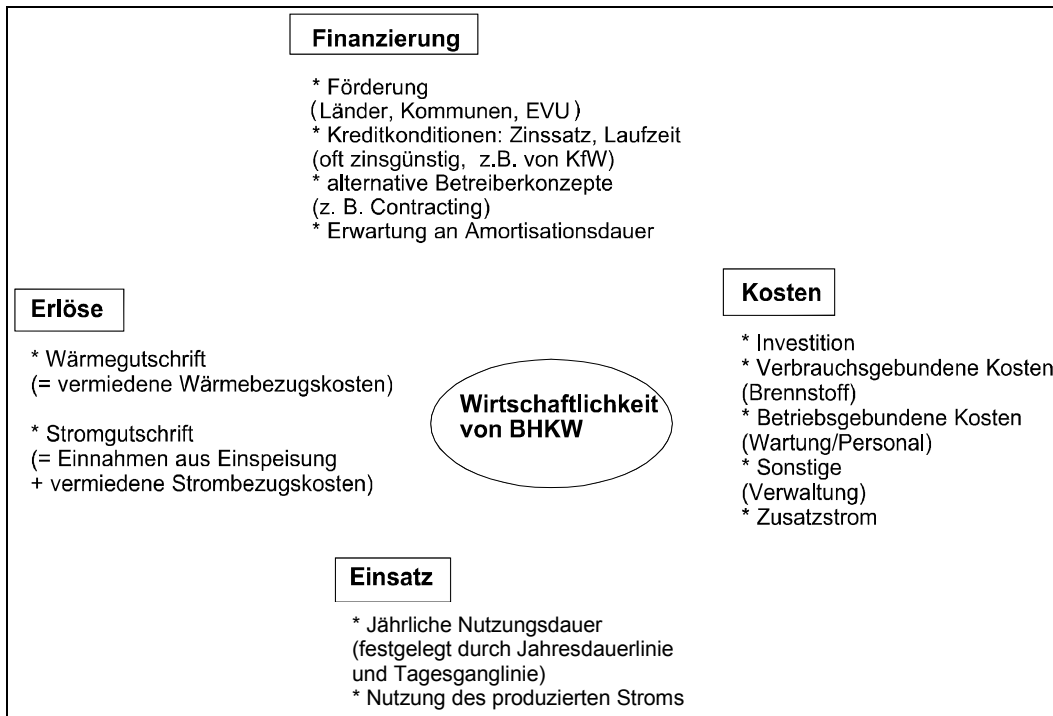


Abbildung 3-3: Wirtschaftlichkeitsfaktoren für Blockheizkraftwerke

### 3.2.1 Einsatz und Planung

Zur Maximierung der Wirtschaftlichkeit, bedarf es unter anderem der genauen Planung, um die optimale Größe, Konfiguration und Betriebsweise des BHKW für den gegebenen Einsatzfall zu finden [25], [26], [28]. Wie bereits in Abbildung 3-3 aufgelistet, ist ein wichtiger Parameter die jährliche Nutzungsdauer. Je länger ein BHKW während eines Jahres arbeitet, desto höher sind die Einsparungen durch Wärme- und Stromgutschrift und desto eher amortisiert sich die BHKW-Investition. Daher ist bereits bei der Planung darauf zu achten, dass die jährliche Nutzungsdauer die oft geforderten 5000 Betriebsstunden erreicht oder überschreitet. Die Bestimmung der Nutzungsdauer im voraus erfolgt mit Hilfe von Jahresdauerlinien und Tagesganglinien. Eine Jahresdauerlinie ist die grafische Auftragung der von einem Objekt benötigten Wärmeleistung gegen die Zeit, während derer diese Wärmeleistung im Verlauf eines Jahres benötigt wird. Abbildung 3-4 zeigt eine typische Jahresdauerlinie. Der größte Teil der Wärme-

energie, die sogenannte Grundlast, wird bei niedrigen Leistungen erzeugt. Während der kalten Monate wird jedoch für kurze Zeit auch eine Wärmeleistung benötigt, welche ein Vielfaches über der durchschnittlichen Wärmeleistung liegt. Eine erste Anpassung eines BHKW an ein bestehendes Objekt besteht in der Wahl einer Wärmeleistung, welche eine Mindestbetriebsdauer ermöglicht. Wie in Abbildung 3-4 gezeigt, können auch mehrere Module (M1-M3) auf diese Art und Weise angepasst werden. Üblicherweise fordert man eine jährliche Betriebsdauer von 4000 bis 5000 Stunden.

Für eine Verfeinerung der Planung müssen zusätzlich typische Tagesganglinien berücksichtigt werden. So kann z.B. durch extremes Schwanken des Wärmebedarfs während eines Tages nicht die Jahresbetriebsdauer erreicht werden, welche sich alleine aus den Jahresganglinien berechnet. In diesem Fall muss über Zwischenspeicher oder eine kleinere Dimensionierung der Anlage nachgedacht werden.

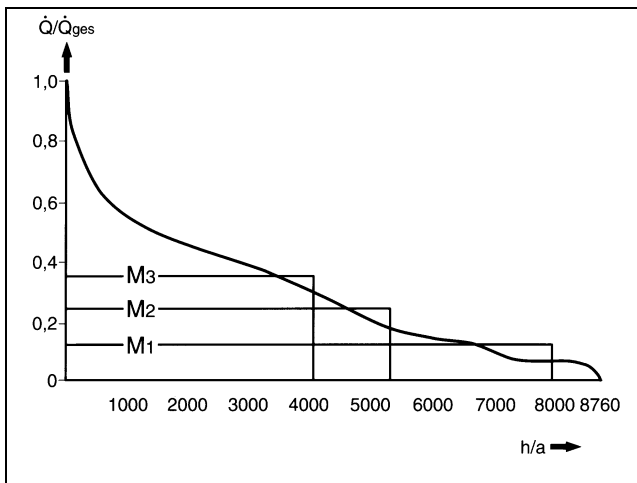


Abbildung 3-4: Jahresdauerlinie für ein Versorgungsobjekt und Bestimmung der optimalen Wärmeleistung für mehrere BHKW-Module [2]

Die Frage, ob der erzeugte Strom tatsächlich verbraucht werden kann oder in das Stromnetz eingespeist werden muss, ist ebenfalls ein betriebswirtschaftlicher Faktor. Da die Vergütung für eingespeisten Strom derzeit zwischen 6 und 9 Pf/kWh liegt, die Kosten für den vom Netz bezogenen Strom jedoch 25 bis 35 Pf/kWh betragen, sollte die Anlage so ausgelegt sein, dass

möglichst der gesamte erzeugte Strom selbst verbraucht wird. Auch hierfür sind Tagesganglinien des Stromverbrauchs nützlich.

### 3.2.2 Kosten

Blockheizkraftwerke bieten eine Möglichkeit zum rationellen Energieeinsatz. So erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad bei Einsatz von BHKW durch die hier gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme gegenüber der herkömmlichen reinen Stromerzeugung von derzeit maximal 55 bis 60 % auf 80 bis > 90 %. Damit ist auch eine erhebliche Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen verbunden.

Die vergleichsweise hohen Investitionskosten stellen jedoch oft eine Hemmschwelle für den Einsatz dieser Technologie dar. Zu den Investitionskosten zählen die Kosten für BHKW-Module, bauliche Maßnahmen, Anschluss an das Gas-, Strom- und Warmwassernetz, Speicher, Spitzenlastkessel und Planung. Ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Investitionskosten bieten die Richtlinien VDI 2067, Blatt 7 und VDI 3985.

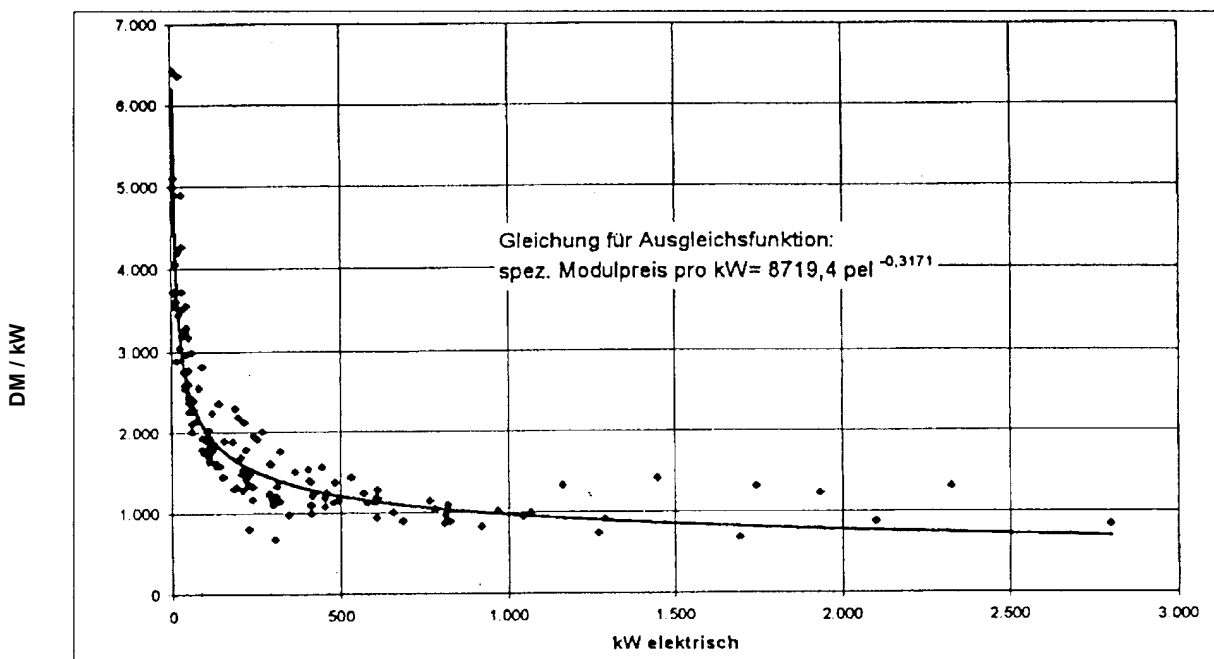


Abbildung 3-5: Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße [28]

Ein weiteres Hemmnis für die Verbreitung von BHKW sind die hohen spezifischen Kosten für BHKW-Module kleiner Leistung. Wie in Abbildung 3-5 zu sehen ist, sind für kleine Module bis zu 7000 DM/kW zu bezahlen, die spezifischen Kosten bei größeren Anlagen auf unter 1000 DM/kW sinken können.

Die verbrauchsgebundenen Kosten bestehen vor allem aus den Brennstoffkosten, zu denen eventuell noch die Kosten für den Hilfsstrombe-

zug hinzukommen. Betriebsgebundene Kosten entstehen v.a. durch Wartungsarbeiten. Sie liegen bei 1 bis 7 Pf/kWh<sub>el</sub>. Für die Höhe der spezifischen Wartungskosten ist die Anlagengröße von entscheidender Bedeutung (siehe Abbildung 3-6).

Die Verwaltungskosten sind eher gering und belaufen sich auf wenige Promille bis Prozent der Produktionskosten.

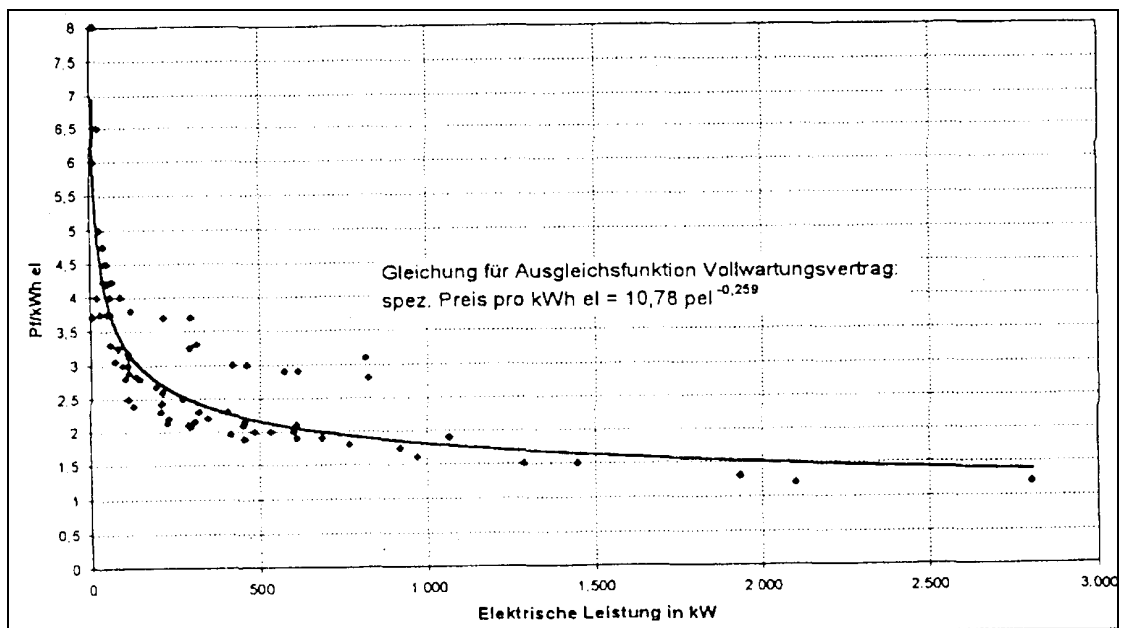


Abbildung 3-6: Spezifische Wartungskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße [28]

### 3.2.3 Erlöse

Die Erlöse ergeben sich aus den eingesparten Bezugskosten für Wärme und Strom. Für Fernwärme ergibt sich eine Einsparung von etwa 40 DM/MWh. Die eingesparten Stromkosten bewegen sich zwischen 20 und 28 Pf/kWh. Dabei ist zu beachten, dass Großverbraucher weniger einsparen, da die EVU ihnen bereits bisher hohe Rabatte gewähren. Dieser Faktor gewinnt im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes immer mehr an Bedeutung. So sind für industrielle Großkunden Preise bis unter 10 Pf/kWh bekannt geworden (Stand: Mitte 1999). Bei einem solchen Preisniveau kann eine BHKW-Anlage ohne staatliche finanzielle Förderung nicht mehr konkurrenzfähig betrieben werden. Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz bezweckt den Schutz

vorhandener und in Errichtung befindlicher Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, soweit sie von bestehenden Energieversorgungsunternehmen betrieben werden, die die allgemeine Versorgung von Endverbrauchern sicherstellen (hauptsächlich Stadtwerke). Erfasst wird die Stromerzeugung in diesen Anlagen, wenn der KWK-Anteil bezogen auf die installierte Kraftwerksleistung des Unternehmens mindestens 25 Prozent und die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Strommenge an der gesamten Stromerzeugung mindestens zehn Prozent beträgt. Das Gesetz sieht eine befristete Förderung dieser Anlagen vor, um die vorhandene öffentliche Stromerzeugung durch Kraft-Wärme-

Kopplung zu sichern und die mit der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes verbundene

wirtschaftliche Entwertung der öffentlich geförderten Investitionen zu verhindern. Der Fördermechanismus ist dem des Stromeinspeisungsrechts vergleichbar. Danach ist der in den begünstigten Anlagen erzeugte Strom vom abnahmepflichtigen Netzbetreiber mit 9 Pfennig/kWh zu vergüten. Auf der Verbundebene ist ein bundesweiter Belastungsausgleich vorgesehen. Der Vergütungs- und der Ausgleichsbetrag werden jährlich degressiv um 0,5 Pfennig/kWh abgesenkt.

### 3.2.4 Finanzierung

Welche Maßnahmen können dazu beitragen, die Finanzierung zu erleichtern und das Investitionsrisiko zu verkleinern ?

- staatliche Förderung

An dieser Stelle ist vor allem das bereits erwähnte von der Bundesregierung ins Leben gerufene Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz mit der dort festgeschriebenen Mindestvergütung von 9 Pf/kWh zu nennen.

- zinsgünstige Kredite

Für Unternehmer und Selbständige bietet sich das Umweltprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) an. Es werden Kredite für BHKW-Investitionen bei einem Zinssatz von ca. 5 - 5,5 % bei 10 - 20 Jahren Laufzeit vergeben. Dabei können 75 % der Gesamtinvestition über den Kredit finanziert werden. Die Abwicklung

erfolgt über die Hausbank des Investors. Dieses Kreditprogramm ist auch für Modelle der Drittfinanzierung interessant, da auch Contractoren antragsberechtigt sind.

- alternative Betreiberkonzepte

Wenn ein potentieller Betreiber das Kapital für eine BHKW-Investition nicht aufbringen kann oder will, so hat er die Möglichkeit über Drittfinanzierung eine Anlage zu realisieren. Dies kann mit Hilfe von Contracting geschehen. Darunter versteht man die Finanzierung einer Anlage durch ein externes Unternehmen, den sogenannten Contractor. Je nach Contracting-Modell betreibt und wartet der Contractor auch die Anlage und vermarktet den Überschussstrom. Der Contractor-Nehmer zahlt dem Geber eine jährliche, z. T. verbrauchsabhängige Nutzungsg Gebühr. Nach dem Ablauf der etwa 10-jährigen Vertragsdauer geht die Anlage in den Besitz des Contracting-Nehmers über.

Für den Contracting-Nehmer ergeben sich durch den externen Kapitaleinsatz einige Vorteile. Durch die Festlegung der Contracting-Rate kann das finanzielle Risiko minimiert werden. Des Weiteren kann das Know-How der Contracting-Firma eingesetzt werden, um eine optimale technische und wirtschaftliche Konfiguration der Anlage zu finden.

Diese Vorteile sorgten in den vergangenen Jahren für eine zunehmende Anwendung von Contracting-Modellen.

## 4 Systemtechnische Analyse der Umwelteinwirkungen von Blockheizkraftwerken

Die Frage nach den Umwelteinflüssen von Blockheizkraftwerken wurde bisher hinsichtlich zweier Aspekte behandelt. Zum einen wurde qualitativ gezeigt, dass im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Wärme und Strom Primärenergie, und damit meist auch CO<sub>2</sub>, eingespart werden kann [30]. Zum anderen wurden die Emissionen von BHKW näher analysiert. Dabei wurde jedoch nur Bezug genommen auf die derzeit geltenden Grenzwerte der TA-Luft.

In diesem Kapitel soll nun ein weiterer Schritt getan werden. Um den ökologischen Vorteil einer Technik beurteilen zu können, muss sie mit anderen Techniken oder Technikkombinationen verglichen werden, die die gleichen Bedürfnisse eines Verbrauchers befriedigen. Eine alternative Kombination zu einem BHKW stellt zum Beispiel der Strombezug aus dem Festnetz zusammen mit einem separaten Gasbrenner dar.

Das Ergebnis derartiger Vergleiche, d.h. die Menge an Primärenergie, Klimagasen oder konventionellen Luftschadstoffen, welche durch ein BHKW eingespart werden kann, wird maßgeblich durch folgende zwei Größen bestimmt [18], [32]:

### (1) Die Bilanzgrenze

Die Bilanzgrenze gibt den Vergleichsrahmen an und legt somit fest, hinsichtlich welcher Größen zwei Techniken bzw. Technikkombinationen verglichen werden. Durch unterschiedliche Wahl der Bilanzgrenze kann z. B. die berechnete prozentuale CO<sub>2</sub>-Einsparung durch ein BHKW im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme stark beeinflusst werden.

So ergibt sich bei Einsatz eines BHKW prozentual eine größere Einsparung an CO<sub>2</sub> gegenüber der getrennten Erzeugung, wenn man die im

Spitzenlastkessel gewonnene Energie nicht mit einbezieht. Diese sollte jedoch berücksichtigt werden, da auf die teilweise getrennte Erzeugung auch in BHKW-Systemen nicht verzichtet werden kann (siehe Abschnitt 3.2.1).

### (2) Die zu vergleichende Technikkombination

Beim Vergleich zwischen BHKW und konventionellen Techniken stellt sich die Frage, welche Form der Stromerzeugung und welche Form der Wärmeerzeugung durch den Einsatz eines BHKW ersetzt wird.

In diesem Zusammenhang sei nur an die nahezu CO<sub>2</sub>-freien Kernkraftwerke und Wasserkraftwerke erinnert. Bei der Braunkohleverstromung wird mehr als doppelt soviel CO<sub>2</sub> freigesetzt wie bei der Erdgasverstromung. Die Wirkungsgrade von Heizkesseln können zwischen 75% (alt) und 105 % (neuer Brennwertkessel) schwanken.

Aus diesem Grunde wird zum Vergleich üblicherweise der heutige Kraftwerkspark Deutschlands verwendet (Strommix). Man geht dabei davon aus, dass durch den Betrieb eines BHKW jede Form der deutschen Stromerzeugung prozentual in gleicher Weise entlastet wird.

Im folgenden werden anhand von drei Beispielrechnungen jeweils die Einsparung von Primärenergie, CO<sub>2</sub> und Schadstoffen durch BHKW erläutert und die zugrunde liegenden Bilanzgrenzen und Vergleichstechniken diskutiert.

- Beispielrechnung zur Primärenergieeinsparung

Abbildung 4-1 zeigt die Unterschiede der Primärenergienutzung zwischen BHKW und getrennter Erzeugung.

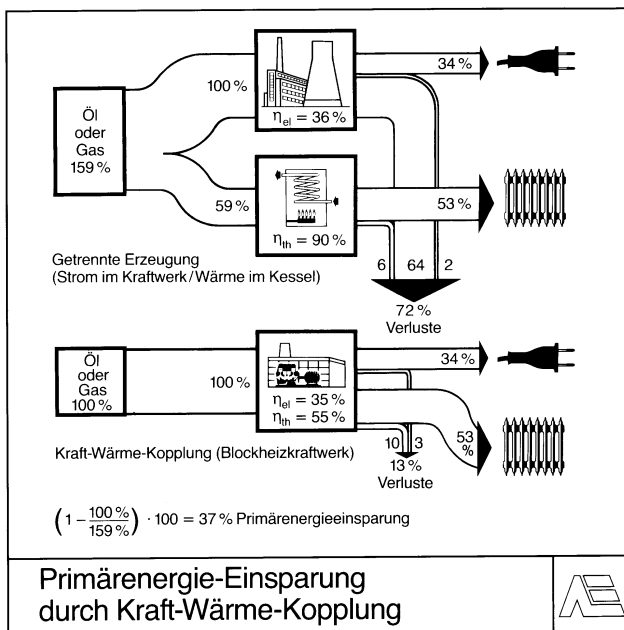


Abbildung 4-1: Primärenergieeinsparung durch Blockheizkraftwerke [2]

In einem durchschnittlichen BHKW wird für dieselbe Bereitstellung an Strom und Wärme 37 % weniger Primärenergie benötigt als bei der getrennten Erzeugung. Bei dieser Betrachtung geht man von fossil befeuerten Kraftwerken mit dem mittleren Wirkungsgrad deutscher Kondensationskraftwerke aus.

Die Bilanzgrenze ist so gewählt, dass nur die vom BHKW erzeugte Energie berücksichtigt wird. Eine andere Möglichkeit, die Einsparung zu berechnen, ergibt sich aus der Betrachtung eines versorgten Objektes. Wie in den vorhergehenden Kapiteln erläutert, kann nur ca. 70 % des Stroms und der Wärme in einem konkreten Einsatzfall durch ein BHKW erzeugt werden. Der Rest muss getrennt erzeugt werden. Die Primärenergieeinsparung bei der Versorgung eines Objekts beträgt somit nur noch 26 % statt der ursprünglichen 37 %.

- Beispielrechnung zur CO<sub>2</sub>-Einsparung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Energieerzeugung mit fossilen Brennstoffen hängen von der Effizienz der Energieumwandlung (System-Wirkungs-/Nutzungsgrad) und damit vom Primärenergieeinsatz (Technologieeffekt) und dem eingesetzten Brennstoff (Brennstoffeffekt) ab. Es besteht die Option, den Energiebedarf durch technisch möglichst effiziente und CO<sub>2</sub>-arme Brennstoffe

zu decken. Nach dem Prinzip der KWK arbeitende BHKW entsprechen diesen Forderungen, zumal wenn sie mit Erdgas betrieben werden. (CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für Erdgas: 224 g/kWh; für Heizöl: 301 g/kWh; für Steinkohle: 381g/kWh; Strommix BRD: 739 g/kWh Strom). Legt man in erster Näherung den Kraftwerksmix der BRD zugrunde, dann fallen in der Bundesrepublik bei der Stromerzeugung inklusive der vor- und nachgeschalteten Prozessketten (Brennstoffbereitstellung; Kraftwerksbau und Demontage) sowie unter Einbeziehung der Stromverteilung im Mittel 739 g CO<sub>2</sub> pro kWh Strom an. So können als Grobabschätzung durch Nahwärmesysteme auf der Basis von BHKW-Anlagen CO<sub>2</sub>-Minderungen von bis 80% gegenüber Erdgas-Einzelzentralheizungen erzielt werden. Bei dieser Berechnung wurde allein die Wärmeerzeugung betrachtet. Die vom BHKW zusätzlich erzeugte elektrische Energie wird in Form einer Gutschrift berücksichtigt, indem die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerksparks dem BHKW gutgeschrieben werden. Hieraus resultiert die prozentual sehr hohe Einsparung von 80 %.

- Beispielrechnung zur Schadstoffentlastung

Neben der Einsparung an Primärenergie und CO<sub>2</sub> sind außerdem die Emissionsentlastungen von Interesse. In Abbildung 4-2 sind diese für die Substitution von Steinkohlestrom und Öl-brennerwärme durch ein BHKW dargestellt.

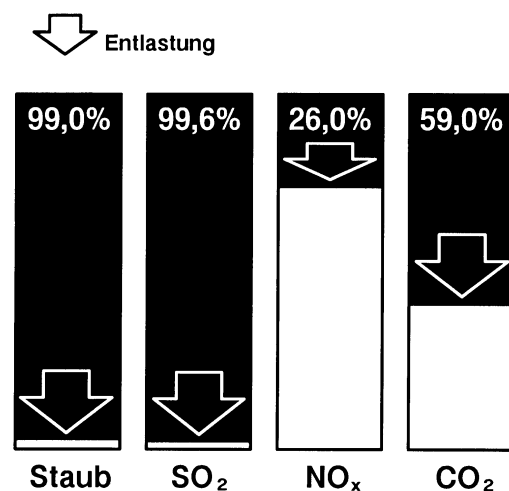


Abbildung 4-2: Emissionsentlastung bei Erdgaseinsatz in einem BHKW gegenüber getrennter Strom- und Wärmeerzeugung mit Steinkohle und Heizöl [2]

Insbesondere für Staub und  $\text{SO}_2$  sind starke Reduktionen der Emissionen zu erkennen.

Wählte man als Alternativkombination einen Gasbrenner und ein gasbefeuertes Gas- und Dampfkraftwerk ( $\eta_{\text{el}} = 55\%$ ), so würden zwar auch Entlastungen durch ein BHKW erzielt. Diese fielen jedoch weitaus geringer aus.

Eine genauere Dokumentation von eingesparten Schadstoffen ist mit Hilfe der Software GEMIS

3.08 [31] möglich. Hier werden zusätzlich die vorgelagerten Prozessketten der Energieträgerbereitstellung berücksichtigt. So kann bei der Nutzung von Erdgas die Emission von  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten bei der Gewinnung und beim Transport (v.a. durch Gasaustritt) genauso hoch sein wie bei der Verbrennung.

## 5 Fazit und Ausblick

Technische Fortschritte, welche die Nutzung der KWK beeinflussen könnten, sind vor allem im Bereich der Brennstoffzellen zu erwarten. Zwar ist das einzig kommerziell verfügbare Produkt, die Phosphorsaure Brennstoffzelle, noch technisch und wirtschaftlich weit davon entfernt mit Verbrennungsmotoren zu konkurrieren. Die intensiven Forschungsbemühungen, vor allem seitens der Autoindustrie, lassen jedoch speziell für die Polymermembran-Brennstoffzelle auf einen Durchbruch hinsichtlich der Langlebigkeit, Zuverlässigkeit und bezüglich der Herstellungskosten hoffen. Brennstoffzellen sind auch deswegen interessant, weil sie optimal als Energiewandler in ein auf Wasserstoff basierendes

Energiesystem passen. Wasserstoff wird derzeit als einzig möglicher Energieträger in einem post-fossilen Energiesystem angesehen.

Die Entwicklungsmöglichkeiten von Stirling-Motoren werden derzeit eher kritisch eingestuft. Trotz der niedrigen Emissionen und anderer Vorteile ist nicht absehbar, dass Stirling-Motoren kurz- oder mittelfristig mit Diesel- oder Otto-Motoren konkurrieren könnten, nicht zuletzt auch wegen der unzureichenden Entwicklungstätigkeiten auf diesem Gebiet. Alleine für die Nutzung von Biomasse scheint der Stirling-Motor aufgrund seiner äußeren Verbrennung attraktiv zu sein.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] BINE Informationsdienst, *Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotorantrieb*, Nr. 13/Dezember 1998
- [2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), *Blockheizkraftwerke - Grundlagen*, Broschüre, 1992
- [3] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), *BHKW-Fibel*, Broschüre
- [4] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), *Wärme macht Kälte, Kraft-Wärme-Kopplung mit Absorptionskältemaschinen* (Broschüre)
- [5] Baumüller, A. und Hegner, M., *Stand der Entwicklung bei Stirlingmotoren - erste Ergebnisse eines Feldversuches mit Blockheizkraftwerken*, GASWÄRME international Nr.46 (1997) Heft 3
- [6] BINE Informationsdienst, *KWKK - Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*, II/1998
- [7] BINE Informationsdienst, *Mini-Blockheizkraftwerke*, Nr. 2/Juni 1995
- [8] BINE Informationsdienst, *PEM-Brennstoffzellen*, Nr. 7/Okttober 1998
- [9] BINE Informationsdienst, *Stirling-Motoren*, Nr. 17/Dezember 1993
- [10] Hessen-Energie GmbH, *Klärgas-BHKW-Anlagen in Hessen*, Kurzfassung, Januar 1995
- [11] ICEU, *Brennstoffzellen-Demonstrationsprojekte in Deutschland und Europa: stationär*, Internet: <http://www.eco.be/iceu/fc/fuelcell/html/types.html>
- [12] Laubenstein, S. et al., *Katalytische Abgasreinigung für Stationär-Motoren*, Degussa-Broschüre, 1994
- [13] LfU, *Emissionen krebserzeugender Luftschadstoffe*, Internet: <http://www.uis-extern.um.bwl.de/lfu/abt3/luft95/jbl95-9.htm>
- [14] M-C Power Corporation, *Miramar Project Profile*, Internet: <http://www.mcpower.com/projects.html>
- [15] Oechsner, Hans, *Erhebung von Daten an landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Baden-Württemberg*, Agrartechnische Berichte des Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Februar 1999
- [16] Quirchmayr, G., *Der geregelte Magermotor - Eine schadstoffarme Variante des Gasottemotors*, Broschüre der Jenbacher Energiesysteme AG
- [17] Rösch, C., Wintzer, D., *Nachwachsende Rohstoffe - Vergasung und Pyrolyse von Biomasse*, Zweiter Sachstandsbericht des TAB, April 1997
- [18] Sawillion, Martin, *Einführung in die Technik des Blockheizkraftwerks - Auslegung und Anwendungsgebiete*, Unterlagen des Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt, Karlsruhe, Januar 1999
- [19] Solo, *Solo Stirling 161*, Firmenprospekt, 6/99
- [20] UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen GmbH, *Emissionsfaktoren für stationäre Verbrennungsmotoren und Gasturbinen*, UMEG-Bericht Nr.: 12-2/98
- [21] Vaillant GmbH u. Co., *Innovationsprojekt Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät*, Internet: [http://www.vaillant.de/deutsch/presse/jv\\_presseinfo\\_s045.htm](http://www.vaillant.de/deutsch/presse/jv_presseinfo_s045.htm)
- [22] VDI Gesellschaft Energietechnik, *BHKW-Handbuch*, Springer-VDI-Verlag
- [23] Wegmann, Susanne, *Winzige Partikel fordern die Antriebstechnik heraus*, Internet: <http://www.kommunalmagazin.ch/aktuell/partikel>
- [24] Weindorf, W., Bünger, U., Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, *Brennstoffzellen - Einsatzmöglichkeiten für die dezentrale Energieversorgung*, Sonn-

- energie, Heft 1/97, Internet:  
[http://www.hyweb.de/Knowledge/brennst\\_o.htm](http://www.hyweb.de/Knowledge/brennst_o.htm)
- [25] Amend, Jürgen, *Blockheizkraftwerke im Großbetrieb*, Unterlagen des Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt, Karlsruhe, Januar 1999
- [26] BINE Informationsdienst, *Blockheizkraftwerke - Technik, Wirtschaftlichkeit, Anwendungsbedingungen*, Nr. 21 / Dezember 1993
- [27] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, *Datenbank Blockheizkraftwerke*, Stand 1998 (3. Aktualisierung)
- [28] Maurer, Erich, *Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken*, Unterlagen des Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt, Karlsruhe, Januar 1999
- [29] Meixner, Horst, *Klein-Blockheizkraftwerke - Einsatzgebiete und Erfahrungen*, Informationsveranstaltung der Stadt Mainz am 31.3.1998 zu Planung und Einsatz von BHKW im kommunalen Bereich
- [30] ASUE, *Heizsysteme im Vergleich - Wirtschaftlichkeit und Auswirkungen auf Klima und Umwelt*, Kommunalwirtschaft 7/1998
- [31] Fritsche, U., Rausch, L., *GEMIS 3.08 – Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme*, copyright Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (HMUEJFG), 1989 - 99
- [32] Sawillion, M., Lux, R., Thöne, E., *Energieeinsparung durch Blockheizkraftwerke: Die Bilanzgrenze bestimmt das Ergebnis*, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95 (1996), Heft 13

## Wichtige Größen und Einheiten

Bezeichnung der Größe	Einheit (Kurzform)	Einheit (in Worten)
Wärmeleistung	$\text{kW}_{\text{th}}$	= $10^3$ Watt (thermisch)
Wärmeleistung	$\text{MW}_{\text{th}}$	= $10^6$ Watt (thermisch)
Elektrische Leistung	$\text{kW}_{\text{el}}$	= $10^3$ Watt (elektrisch)
Elektrische Leistung	$\text{MW}_{\text{el}}$	= $10^6$ Watt (elektrisch)
Elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{el}}$	%	Prozent
Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{th}}$	%	Prozent
Emissionsfaktor	kg/TJ	Kilogramm / $10^{12}$ Joule
Masse	$\mu\text{g}$	= $10^{-6}$ Gramm
Masse	mg	= $10^{-3}$ Gramm
Massenanteil	Gew.-%	Gewichtsprozent
Volumenanteil	Vol.-%	Volumenprozent
Konzentration	ppm	Parts per million (= 1 Teil auf $10^6$ Teile)

## Liste der Abkürzungen

<b>AKM</b>	Absorptionskältemaschine
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BimSchG</b>	Bundesimmissionsschutzgesetz
<b>BimSchV</b>	Bundesimmissionsschutzverordnung
<b>BZ</b>	Brennstoffzelle
<b>C<sub>m</sub>H<sub>n</sub></b>	Organische Kohlenwasserstoffe
<b>CKW</b>	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>EnWG</b>	Energiewirtschaftsgesetz
<b>EVU</b>	Energieversorgungsunternehmen
<b>FCKW</b>	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
<b>GasHL-VO</b>	Gashochdruckleitung-Verordnung
<b>Heizöl EL</b>	Heizöl Extra Leicht
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Schwefelwasserstoff
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>KWKK</b>	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
<b>LAI</b>	Länderausschuss Immissionsschutz
<b>LBO</b>	Landesbauordnung
<b>MinöStG</b>	Mineralölsteuergesetz
<b>NMHC</b>	Summe aller Kohlenwasserstoffe außer Methan
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas
<b>Oxi-Kat</b>	Oxidationskatalysator
<b>PAK</b>	Polychlorierte aromatische Kohlenwasserstoffe
<b>RME</b>	Rapsmethylester
<b>SCR</b>	Single Catalytic Reduction
<b>StromStG</b>	Stromsteuergesetz
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz

## Glossar

**3-Wege-Katalysator:** Gerät zur katalytischen Umsetzung von Abgasen aus Otto-Motoren in 3 Stufen: Kohlenmonoxid wird zu Kohlendioxid umgesetzt, Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid und Wasser; Stickoxide werden zu Stickstoff reduziert.

**Absorptionskältemaschine:** Thermodynamische Maschine, welche die Energie einer Wärmequelle nutzt um Kälte zu produzieren

**Amortisationsdauer:** [lat.-frz.], im Gesellschaftsrecht: ratenweise Herabsetzung oder Rückzahlung des Grund- oder Stammkapitals bei Kapitalgesellschaften. Im Finanzwesen: langfristige Rückzahlung einer Geldschuld (z. B. Anleihen, Hypotheken) nach einem festgelegten Tilgungsplan.

**Anode:** elektr. leitende, meist metall. Teile, die den Übergang elektr. Ladungsträger zw. 2 Medien vermitteln oder dem Aufbau eines elektr. Feldes dienen. Die positive Elektrode bezeichnet man als Anode, die negative als Kathode.

**Benzol:** einfachster, aromat. Kohlenwasserstoff, der Grundkörper der aromat. Verbindungen, chem. Bruttoformel C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Die sechs C-Atome des B.moleküls sind in Form eines Sechsecks angeordnet (B.ring). In reinem Zustand ist B. eine farblose, charakterist. riechende Flüssigkeit; giftig. Der Erstarrungspunkt liegt bei 5,5 °C, der Siedepunkt bei 80,1 °C. Dichte (bei 20 °C) 0,8789 g/cm<sup>3</sup>. Mit Wasser kaum mischbar, gut lösl. in Alkohol, Äther; Gewinnung durch Destillation aus Erdöl, Erdgas und Kokereigasen. Verwendung: Kraftstoffzusatz (Oktanzahl über 100), Extraktions- und Lösungsmittel, Ausgangsstoff für die Synthese von Kunststoffen, Farbstoffen, Arzneimitteln.

**BZ (Brennstoffzelle):** Elektrochemische Energiegewinnung basierend auf der Reaktion  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

**Contracting:** Finanzierungsmodell für Anlagen (Anlagencontracting) oder Energiesparmaßnahmen (Energiesparcontracting)

**Elektrolyt:** jeder Stoff, der der elektrolyt. Dissoziation unterliegt und elektr. Strom leiten kann, z. B. Salze, Säuren, Basen

**Emissionen:** Ausströmen luftverunreinigender Stoffe in die Außenluft

**Exergiegehalt:** Bez. für denjenigen Anteil der einer Anlage zur Energieumwandlung zugeführten Energie, der in die wirtsch. verwertbare Form (z. B. elektr. Energie) umgewandelt wird.

**Exotherm:** die Umwandlung chem. Verbindungen oder Elemente (Ausgangsstoffe) in andere Verbindungen oder Elemente (R.produnkte); erfolgt meist erst nach Einwirkung einer bestimmten Energiemenge (Aktivierungsenergie) unter Wärmeverbrauch (endotherme R.) oder Freiwerden von Wärme (exotherme R.). Diese Wärmemenge wird (bezogen auf ein Mol) als Reaktionswärme oder Reaktionsenthalpie (Formelzeichen H) bezeichnet.

**Fermentierung:** (Fermentation) [lat.], in der Lebensmitteltechnik die Umsetzung biolog. Materialien, die durch Enzyme katalysiert wird, z. B. die Gärung, Käsebereitung und Silierung.

**Gas-Otto-Motor:** [nach N. Otto], im Vier- oder Zweitaktverfahren arbeitender Kolbenmotor. Der O. ist gekennzeichnet durch Verbrennung eines im Brennraum durch einen Kompressionstakt verdichteten homogenen Luft-Kraftstoff-Gemisches. Die Verbrennung wird im Ggs. zum Dieselmotor durch Zündkerzen eingeleitet.

**GEMIS (Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme):** Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen

**Immissionen:** [lat.], die Einwirkung von Luftverunreinigungen, Geräuschen, Licht, Wärme, Strahlen und vergleichbaren Faktoren auf Menschen, Tiere, Pflanzen oder Gegenstände

**Kalorimeter:** [lat./griech.], wärmeisoliertes Gefäß; u. a. zur Bestimmung der Wärmemenge, die bei einem physikal. oder chem. Prozeß umgesetzt wird.

**Kathode:** elektr. leitende, meist metall. Teile, die den Übergang elektr. Ladungsträger zw. 2 Medien vermitteln oder dem Aufbau eines elektr. Feldes dienen. Die positive Elektrode bezeichnet man als Anode, die negative als Kathode.

**Klimagas:** Gas, welches zum atmosphärischen Treibhauseffekt beiträgt.

**Kohlenmonoxid:** (Kohlenoxid), CO, sehr giftiges, geruchloses Gas, das bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien (z. B. Motorauspuffgase) entsteht; wird für chem. Synthesen und als Heizgas verwendet.

**Kohlenwasserstoffe:** i. e. S. chem. Verbindungen, die aus einem stabilen Gerüst vierwertiger Kohlenstoffatome bestehen und bei denen die freien Valenzen der C-Atome ausschließlich zur Bindung von Wasserstoffatomen benutzt werden. In gesättigten K. (Alkane, Cycloalkane) sind die C-Atome nur durch Einfachbindungen verknüpft, ungesättigte K. enthalten auch Doppel- (Alkene, Cycloalkene) und Dreifachbindungen (Alkine, Cycloalkine). Offenkettige (lineare oder verzweigte) K. werden Zusammenfassend als aliphatische (acyclische) K., ringförmige als cyclische K. (Nomenklaturpräfix Cyclo-) bezeichnet. Cycl. K., die sich vom Benzol ableiten, nennt man aromatische K.

**Kompressionskältemaschine:** Thermodynamische Maschine, welche durch den Einsatz von mechanischer Energie Wärme von Medium A zu Medium B pumpt und somit eine Kühlleistung an Medium A vollbringt.

**Körperschalleiter:** Material oder Gegenstand, der mittels Eigenschwingungen Schallwellen zu transportieren vermag.

**Korrosion, korrosiv (Adjektiv):** [lat.], die Zerstörung von Metall durch chem. oder elektrochem. Reaktionen mit seiner Umgebung.

**Kostendegression:** Senkung der Herstellungskosten eines Gutes durch fortschreitende Massenfertigung.

**Luftzahl Lambda:** Quotient aus Luftmenge und Treibstoffmenge bei der motorischen Verbrennung

**Länderausschuss für Immissionsschutz:** Gremium, in dem Vertreter der deutschen Bundesländer über den Stand der Abgasreinigungstechnik und über Emissions- und Immissionsgrenzwerte beraten und entscheiden.

**Magermotor:** Verbrennungsmotor; unterscheidet sich vom Otto-Motor hauptsächlich durch

magereres Gemisch; Das Luft-Brennstoff-Verhältnis liegt hier 1,3 bis 1,6 mal über dem stöchiometrischen Verhältnis, bei Otto-Motoren hingegen bei 1.

**Methan:** [griech.], CH<sub>4</sub>, der einfachste, gasförmige Kohlenwasserstoff (Schmelzpunkt -182,5 °C; Siedepunkt -164,0 °C), der mit bläul. Flamme zu Kohlendioxid und Wasser verbrennt. Natürl. Vorkommen im Sumpf- und Biogas, im Erdgas und in Kohlelagerstätten (Grubengas). Die M.-Luft-Gemische sind sehr explosiv.

**Mittelspannungsnetz:** Teil des öffentlichen Stromnetzes (>1 kV aber < 110 kV).

**Niederspannungsnetz:** Teil des öffentlichen Stromnetzes (> 1kV).

**Primärenergie:** Bez. für den Energieinhalt der natürl. Energieträger (v. a. Energie fossiler Brennstoffe; Wasserkraft; Kernenergie; Sonnenenergie).

**Proton:** [griech.], physikal. Symbol p oder H + ; positiv geladenes, stabiles Elementarteilchen aus der Gruppe der Baryonen, das den Kern des leichten Wasserstoffatoms bildet und zus. mit dem Neutron Baustein aller Atomkerne ist.

**Rendite:** [italien.], jährl. Ertrag einer Kapitalanlage.

**Reststrombezug:** Der Anteil des Stroms, den ein Stromeigenerzeuger aus dem öffentlichen Netz bezieht. Dies geschieht v.a. um Stromverbrauchsspitzen abzudecken.

**Rußfilter:** auch als Partikelfilter bekannt; hält die im Dieselmotorabgas enthaltenen Partikel zurück und verbrennt sie.

**Schwefeldioxid:** SO<sub>2</sub>; Verbindung des Schwefels mit Sauerstoff; gasförmig, farblos, stechend riechend, ätzend wirkend, korrosionsfördernd; wird v. a. beim Abrösten sulfid. Erze gewonnen und zur Herstellung von Schwefelsäure, in der Zellstoff-Ind. sowie zum Schwefeln verwendet. S. wird beim Verbrennen von Heizöl, Kohle und Erdgas freigesetzt.

**Sintern:** das Verdichten (Zusammenfritten, Stückigmachen) hochschmelzender pulverförmiger bzw. körniger Stoffe unter Druck- und/oder Temperatureinwirkung (bei Temperaturen unter

halb des Schmelzpunktes), z. B. zur Herstellung von Formteilen.

**Stickoxide:** die Verbindungen des Stickstoffs mit Sauerstoff; man unterscheidet: Distickstoff[mon]oxid (Lachgas),  $N_2O$ , ein farbloses, süßlich riechendes Gas, das als Narkosemittel verwendet wird. Stickstoffmonoxid,  $NO$ , ist ein farbloses, giftiges Gas, das bei der Herstellung von Salpetersäure als Zwischenprodukt auftritt; ferner Distickstofftrioxid,  $N_2O_3$ , Stickstoffdioxid,  $NO_2$ , Hauptbestandteil der aus rauchender Salpetersäure entweichenden, nitrosen Gase, Distickstoffpentoxid,  $N_2O_5$ . Der Gehalt an umweltschädigendem  $NO$  und  $NO_2$  (zusammenfassend als  $NO_x$  bezeichnet) in Abgasen von mit Ottokraftstoffen betriebenen Kraftfahrzeugen kann durch eine Abgasnachbehandlung mit einem Abgaskatalysator deutlich verringert werden.

**Toluol:** [span./arab.] (Methylbenzol), farblose, brennbare Flüssigkeit; Lösungsmittel für Lacke, Kautschuk und Fette; wird aus Steinkohlenteer und Erdöl gewonnen.

**Veresterung:** Ester [Kohlenwasserstoff aus Essigäther], chem. Klasse von organ. Verbindungen, die unter Wasserabspaltung aus organ. Säuren und Alkoholen entstehen (= *Veresterung*). Fette und fette Öle sind Ester. des Glycerins.

**Wärme- und Stromgutschrift:** Wichtige Größe für die Wirtschaftlichkeitsberechnung eines BHKW; sie gibt an, wieviel Geld durch vermiedenen Bezug von Wärme und Strom aufgrund des BHKW-Einsatz gespart wird.

**Xylole:** [griech./arab.] (Dimethylbenzole), drei isomere aromat. Verbindungen: o- und m-Xylol sind farblose, aromatisch riechende Flüssigkeiten, p-Xylol bildet farblose Kristalle; alle X. sind wasserunlöslich. Lösungs- und Verdünnungsmittel für Fette, Öle, Kautschuk, Zusatz zu Auto- und Flugbenzin; Ausgangssubstanzen z. B. für Phthalsäure und Farbstoffe.