Einleitung

Angesichts der Forderung, den Primärenergieverbrauch und die damit verbundenen Schadstoff- sowie Treibhausgasemissionen zu mindern, wird die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland immer weiter vorangetrieben [EEG 2004]. Es kann allerdings angezweifelt werden, dass deren Potenzial ausreicht, um allein die in den nächsten Jahren durch die planmäßige Stilllegung zahlreicher Großkraftwerke erwarteten Angebotslücken zu decken [UBA 2003; VDE 2005].

Insgesamt hatten die erneuerbaren Energien 2006 einen Anteil am gesamten Endenergieverbrauch in den Bereichen Strom, Wärme und Kraftstoffe von 7,7 % [BEE 2007]. Im Bereich Strom lag der Anteil bei 11,6 % und im Bereich Wärme bei 6,2 % [BEE 2007]. Dieser Anteil ist bei Weitem noch zu gering, um die Ziele zum Klima- und Ressourcenschutz erreichen zu können. Daher rückt zusätzlich in zunehmendem Maße die effiziente Nutzung von Primärenergieträgern in den Vordergrund.

Hierzu gehören unter anderem Energieumwandlungstechnologien auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) [Fischedick 2004]. Bis 2020 könnte die Hälfte der in Deutschland benötigten Stromerzeugung aus hocheffizienten KWK-Anlagen bereitgestellt werden. Ob und wie schnell die KWK-Potenziale auch tatsächlich erschlossen werden, hängt davon ab, welche Markttreiber wirksam sind [Mühlstein 2006].

Neben größeren KWK-Einheiten gelten kleine KWK-Anlagen, sogenannte Mini-Blockheizkraftwerke (BHKW), in der Hausenergieversorgung im Leistungsbereich von unter 1 kW bis 5 kW elektrisch als interessante Ergänzung. Dabei werden sie als Ersatz oder als Ergänzung zur normalen Heizungsanlage parallel am elektrischen Netz betrieben und produzieren wärmegeführt die notwendige thermische Energie für das Objekt.

Die konventionellen, im Wohngebäudebereich eingesetzten Anlagen basieren auf Verbrennungsmotoren und stellen konstante Leistungen bereit. Diese sind ergänzt worden um drehzahlvariable Geräte, bei denen innerhalb eines gewissen Bereichs die Leistung einstellbar ist. Dadurch ist die bereitgestellte Leistung besser an den aktuellen Bedarf anpassbar und somit kann eine höhere Betriebsstundenanzahl im Jahr erreicht werden. Um die bei der gekoppelten Erzeugung gleichzeitig bereitgestellten Energien auf die Bedarfsverläufe, die in der Regel nur schwach miteinander korrelieren, abzustimmen, setzt man Wärmespeicher ein.

Mit der voranschreitenden Entwicklung von Brennstoffzellen ist die serienmäßige Anwendung dieser Technologie in greifbare Nähe gerückt. Bei einer Serienreife der Brennstoffzellentechnologie sowie einer weiteren Marktdurchdringung bei den motorischen Mini-BHKW könnte zukünftig eine nicht unwesentliche Anzahl von Mini-BHKW in den Energieversorgungsnetzen installiert werden [Friedrich 2003]. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit sich die zunehmende dezentrale elektrische Energieerzeugung durch Mini-BHKW auf das elektrische Versorgungssystem auswirkt.

Die gekoppelte elektrische und thermische Energieproduktion vom Mini-BHKW macht es notwendig, dass bei einer Simulation und Bewertung des Systems Mini-BHKW und dessen Auswirkungen auf das elektrische Netz alle Teilsysteme wie das elektrische Netz sowie das Gasnetz und das thermohydraulische Hausversorgungsnetz mit berücksichtigt werden müssen. So kann nur eine ganzheitliche Systembetrachtung zu sinnvollen Integrationsstrategien für Mini-BHKW in das elektrische Versorgungsnetz führen.

Bei einer konsequenten Umsetzung von Integrationsstrategien, die die Bedürfnisse des gesamten Systems mit berücksichtigen, ergibt sich damit ein „Smart-Grid“. Im Smart-Grid werden die dezentralen Energieerzeugungsanlagen in die Planung und die Betriebsführung des elektrischen Versorgungsnetzes aktiv mit einbezogen. Hierdurch ergibt sich insgesamt eine bessere Auslastung aller Betriebsmittel im elektrischen Versorgungsnetz.

Der technische Zusatznutzen ist direkt mit den wirtschaftlichen Aufwendungen und Vorteilen verknüpft. Im Zusammenhang mit der deutschen Gesetzgebung, die zum Ziel hat, eine möglichst sichere, preisgünstige, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Nutzer mit Gas und Elektrizität [EnWG 20005] zu gewährleisten, ist die Fragestellung interessant, inwieweit die KWK-Technologie im kleinen Leistungsbereich technisch und wirtschaftlich zur Erreichung dieses Ziels beitragen kann.

1 Energieversorgungssysteme

1.1 Elektrische Energieerzeugung und -verteilung

Die Entwicklung der elektrischen Energieerzeugung und –verteilung begann in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, indem Werner von Siemens 1866 das dynamoelektrische Prinzip entdeckte [Weiß 2005]. Hierdurch war es erstmals möglich, elektrische Energie im großen Umfang zu produzieren und zu verteilen. Die elektrische Energieproduktion erfolgte dabei dezentral bei den Verbrauchern, meistens in unmittelbarer Nähe zu großen Industrieanlagen. Auch im Privatbereich setzte sich die elektrische Energie immer mehr und mehr durch, so dass größere Kraftwerke nötig waren. Diese standen nahe an den natürlich verfügbaren Primärenergieträgern oder an Verkehrswegen, über die der Brennstoff sich gut transportieren ließ, z. B. Wasserwege. Somit wurde es nötig, die elektrische Energie vom Erzeuger in die Verbrauchsschwerpunkte zu transportieren. Dies geschieht bis heute über engvermaschte Übertragungs- und Verteilungsnetze, siehe Abbildung 1. Geprägt ist diese Top-Down-Struktur durch einen klaren Energiefluss von den Erzeugern in den Höchst- und Hochspannungsnetzen hin zu den Verbrauchern in den Mittel- und Niederspannungsnetzen.

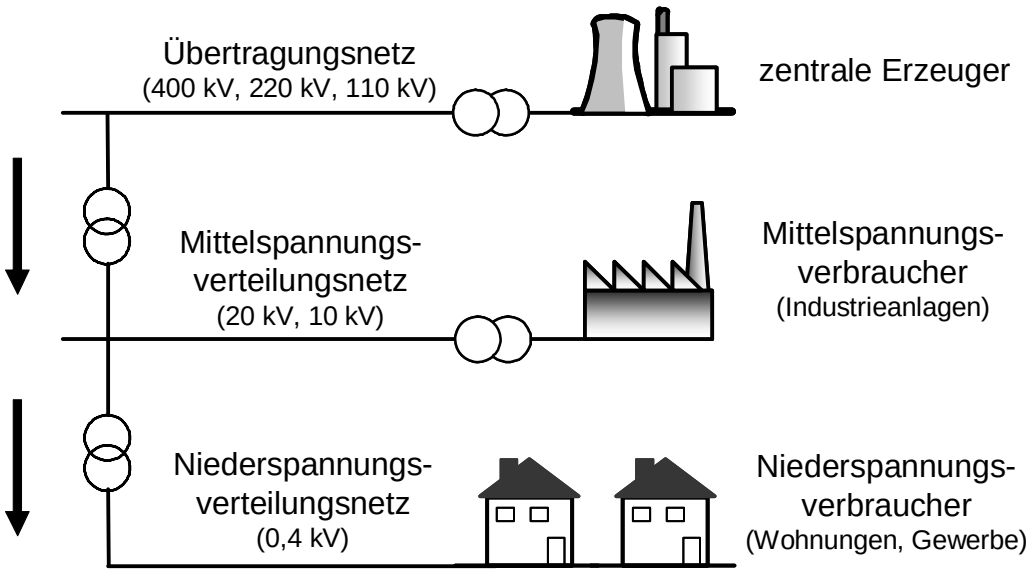

Abbildung 1: Prinzip der zentralen elektrischen Energieerzeugung und -verteilung

Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts steigt die Anzahl der dezentralen elektrischen Energieerzeuger im elektrischen Netz. Hierfür ist als Hauptgrund zu nennen, dass sich in der elektrischen Energieerzeugung, geprägt durch den gesellschaftspolitischen Willen, ein Wandel hin zu der zunehmenden Nutzung von umweltfreundlicheren Anlagen, z. B. Windkraft, Photovoltaik und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), welche erneuerbare

Energieträger nutzen oder einen höheren Gesamtwirkungsgrad aufweisen, vollzieht. Hauptsächlich erfolgt die Installation von einzelnen dezentralen Anlagen in den Mittel- und Niederspannungsnetzen, siehe Abbildung 2. Der Anschluss mehrerer dezentraler Erzeuger, die in einem Verbund zusammengefasst sind, wie z. B. ein Windpark, erfolgt aufgrund der abgegebenen Leistung an den höheren Spannungsebenen.

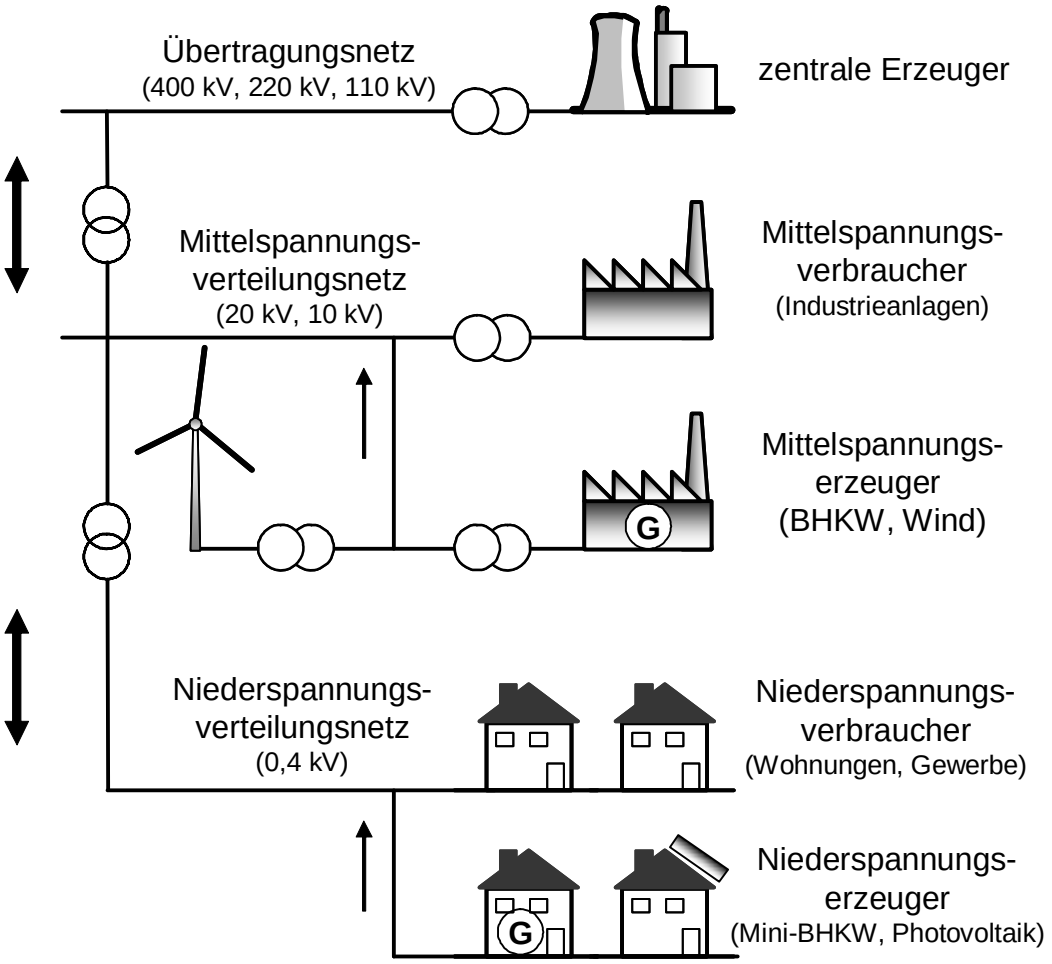

Abbildung 2: Prinzip der dezentralen elektrischen Energieerzeugung und -verteilung

Aufgrund der dezentralen Energieeinspeisung auf allen Spannungsebenen ergibt sich keine klare Energieflussrichtung mehr, was z. B. in der Netzschutztechnik Probleme bereiten kann [Jäger 2004]. Diese Struktur, in der ehemalige Verbraucher zu Erzeugern werden, bezeichnet man als Bottom-Up-Struktur. Die Folge ist, dass die bestehenden Netze für die neuen Anforderungen umgerüstet werden müssen.

Aufgrund der dezentralen Einspeisung ergeben sich aber auch neue Möglichkeiten und Potenziale. Mithilfe der dezentralen Einspeisung ist es möglich, Betriebsmittel zu entlasten und Übertragungsverluste zu vermindern. Dazu ist es notwendig, die dezentralen Energieerzeuger sinnvoll in das System zu integrieren. Im Ergebnis entsteht ein Smart-Grid, welches die Netzstruktur besser ausnutzt. Aber auch ein lokales Micro-Grid ist

denkbar, welches vollkommen ohne die vorgelagerten Netze auskommt. Ein Micro-Grid ist nur noch über einen Kuppelschalter mit dem vorgelagerten Netz verbunden, welcher jederzeit geöffnet werden kann. Allerdings ist die Betriebsführung im Gegensatz zum Smart-Grid wesentlich aufwendiger.

1.2 Thermische Energieversorgung

Im Gegensatz zur elektrischen Energieversorgung erfolgt die Umwandlung der chemischen Energie in die Nutzenergie bei der thermischen Energieversorgung direkt beim Verbraucher. Die Energieträger wie Heizöl, Kohle und Holz sind einfach lagerfähig und transportierbar und werden direkt beim Verbraucher gelagert. Der Energieträger Erdgas wird über ein Leitungsnetz direkt zum Verbraucher transportiert. In einem Heizungs- bzw. Brennwertkessel erfolgt die Umwandlung der in den Energieträgern enthaltenen chemischen Energie unter einem hohen Wirkungsgrad zu der thermischen Energie. Mithilfe der Brennwerttechnologie sind Wirkungsgrade von bis zu 106 %, bezogen auf den unteren Heizwert, zu erreichen.

Des Weiteren sind in Ballungsgebieten auch Fernwärmenetze vorzufinden. Diese transportieren die thermische Energie von ihrem Erzeugungsort hin zu den Verbrauchern. Hierbei kommt die thermische Energie aus zentralen Heizstationen oder aus Kraftwerken, in denen die anfallende Abwärme bei der Stromproduktion zum Heizen genutzt wird. Mit diesen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist es möglich, den Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks auf bis zu 90 % zu steigern. Allerdings ist die Errichtung eines Fernwärmenetzes mit hohen Investitionen verbunden und in bebauten Strukturen nachträglich nicht einfach einzufügen.

Kleinere Wärmenetze, sogenannte Nahwärmenetze, sind aufgrund ihrer lokalen Abgrenzung leichter zu errichten und versorgen bis zu einen Stadtteil mit thermischer Energie. Die thermische Energie ist hierbei die Abwärme aus BHKW, in denen ein Verbrennungsmotor einen Generator antreibt, der elektrische Energie erzeugt. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems liegt wieder bei ca. 90 %, wobei die Investitionen immer noch sehr hoch sind. Die Höhe der Leistung kann durch modulierenden oder taktenden Betrieb beeinflusst werden, nicht jedoch das Verhältnis zwischen Strom- und Wärmeerzeugung. Möglich ist es auch, kleine KWK-Einheiten direkt in den zu versorgenden Objekten zu installieren.

1.3 Mini-Blockheizkraftwerke

Unter Mini-Blockheizkraftwerken versteht man kleine Heizkraftwerke, die für ein oder mehrere Ein- sowie Mehrfamilienhäuser oder einen kleinen Gewerbebetrieb in Kraft-Wärme-Kopplung gleichzeitig elektrische Energie und nutzbare Wärme zur Verfügung stellen. Die Umwandlung des Brennstoffs in die gewünschten Energieformen geschieht entweder mithilfe eines Verbrennungsmotors, der einen Generator antreibt und dessen Abwärme über Wärmetauscher die Nutzwärme zur Verfügung stellt, oder in einer Brennstoffzelle, die die elektrische Energie direkt produziert und deren Abwärme wieder die Nutzwärme darstellt. Bezüglich der elektrischen Leistung hat sich bislang jedoch noch keine einheitliche Definition durchgesetzt. Nach dem KWK-Gesetz werden als kleine KWK-Anlagen solche aufgefasst, deren elektrische Leistung maximal 2 MW beträgt [KWK 2004]. Die im Jahr 2004 verabschiedete EU-Richtlinie zur Förderung der KWK betrachtet Anlagen mit einer elektrischen Leistung von maximal 50 kW als KWK-Kleinstanlage [RL 2004]. Im Folgenden werden alle Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu 50 kW als Mini-BHKW bezeichnet.

Der entscheidende Vorteil der Mini-BHKW gegenüber einer konventionellen Versorgung mit großen Wärmekraftwerken ist der höhere Gesamtwirkungsgrad sowie der damit verbundene geringere CO_2-Ausstoß. Des Weiteren können durch die räumliche Nähe der Mini-BHKW zum Verbraucher Energieübertragungsverluste im elektrischen Netz vermindert werden. Zurzeit liegen die Übertragungsverluste im elektrischen Netz bei ca. 4 % [VDEW 2006].

In mehreren technischen und rechtlichen Regelwerken sind die Rahmenbedingungen für den Anschluss und Betrieb eines Mini-BHKW festgelegt. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

1.3.1 Theoretische Grundlagen

Konventionelle KWK-Anlagen, die mit einer Wärmekraftmaschine arbeiten (Verbrennungsmotoren sowie Gas- und Dampfturbinen), sind in ihrer Effizienz durch den Carnot-Wirkungsgrad beschränkt. Beim Carnot-Kreisprozess erfolgt die Umwandlung der chemischen Energie im Brennstoff in mechanische und thermische Energie über einen Verbrennungsprozess.

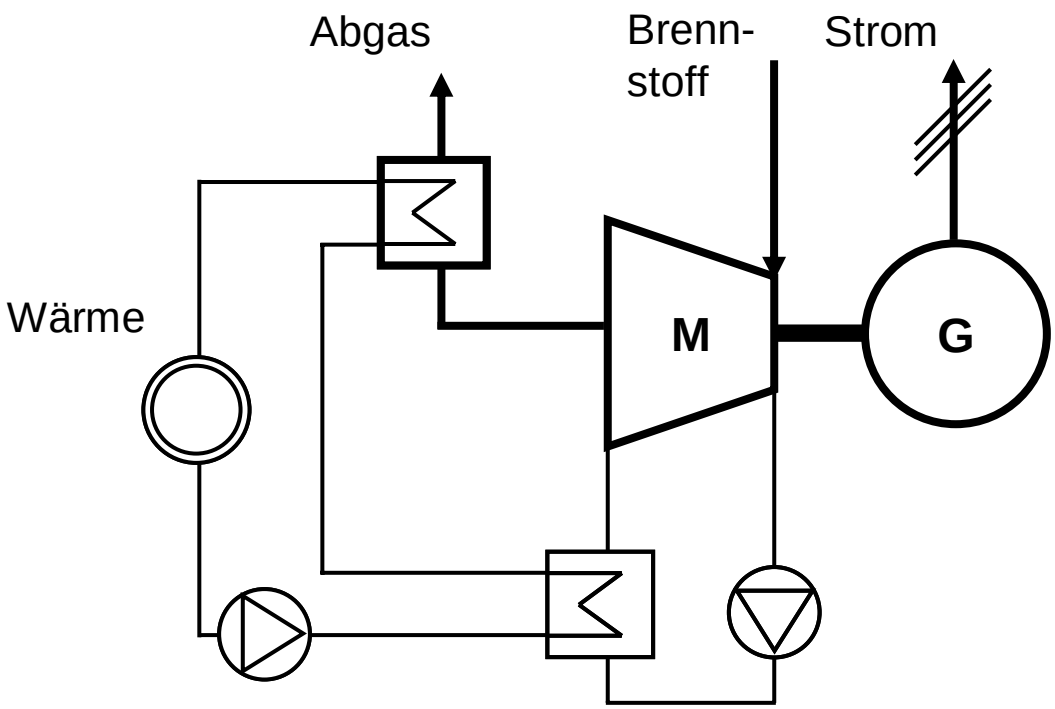

Abbildung 3: Schematische Darstellung einer verbrennungsmotorischen KWK-Anlage

Die Höhe des Wirkungsgrades hängt im Idealfall von den beiden Temperaturen ab, bei denen der Wärmeaustausch stattfindet. Dies ist die Temperatur T_2 des Arbeitsmediums, beim Verbrennungsmotor also die höchste Temperatur des Gasgemisches, sowie die Temperatur T_1 bei Austritt des Verbrennungsgases aus dem System, also die Abgastemperatur [Vogel 1999].

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \tag{1.1}$$

Während beim Carnot-Kreisprozess die Umwandlung der chemischen Energie in mechanische bzw. elektrische Energie über ein Arbeitsgas geschieht, liegt bei der Energieumwandlung in Brennstoffzellen eine direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie vor, wobei die Reaktion unter Wärmeabgabe erfolgt. Dadurch ist der Wirkungsgrad nicht auf den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. Der theoretische Wirkungsgrad bei einer Brennstoffzelle kann im Idealfall über die freie Reaktionsenthalpie ΔG_T bei der Zellarbeitstemperatur T_Z und den Standardwert der Reaktionsenthalpie ΔH_0 wie folgt ermittelt werden [Schmitz 2002]:

$$\eta_{BSZ} = \frac{\Delta G_T}{\Delta H_0} \tag{1.2}$$

Der Wert ΔH_0 stellt die entsprechende Enthalpieänderung der Verbrennungsreaktion dar. In Elektrizität wird nur der energetische Anteil ΔG_T umgewandelt.

Die oben angegebenen Wirkungsgrade sind theoretischer Natur und geben den maximal möglichen Wirkungsgrad der Energieumwandlungssysteme an. Hiermit lässt sich zwar eine Aussage über die Qualität des Systems machen, nicht aber über die realen Verhältnisse in einer KWK-Anlage. Dazu muss der reale Wirkungsgrad der Anlage herangezogen werden. Der thermische Wirkungsgrad η_{th} einer Anlage kann als das Verhältnis von abgeführter thermischer Nutzenergie und der zugeführten Brennstoffleistung definiert werden:

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{BSt}} \tag{1.3}$$

Bei dem Energieinhalt des verwendeten Brennstoffs ist zu berücksichtigten, ob die Anlage den Energieinhalt vollständig mit der Brennwerttechnologie ausnutzt. Der Unterschied zwischen einem Brennwertsystem und einem konventionellen System besteht darin, dass das Brennwertsystem auch die Kondensationswärme des Abgases weitgehend nutzt. Ist dies der Fall, so ist der untere Heizwert H_u auf den oberen Heizwert H_o wie folgt umzurechnen [Waldschmidt 2006]:

$$H_o = 1{,}1 * H_u \tag{1.4}$$

Der elektrische Wirkungsgrad der Anlage wird analog zum thermischen Wirkungsgrad definiert:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{BSt}} \tag{1.5}$$

Zu beachten ist hierbei, dass im elektrischen Wirkungsgrad eventuell die Umwandlungsverluste von der mechanischen Energie in die elektrische Energie enthalten sind. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, inwieweit der elektrische Wirkungsgrad den elektrischen Eigenverbrauch der Anlage mit einschließt.

Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage berechnet sich schließlich aus der Summe des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades. Er wird als Brennstoffausnutzungsgrad bezeichnet:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{BSt}} \tag{1.6}$$

Um den Energieumwandlungsprozess der KWK-Anlage besser bewerten zu können, empfiehlt es sich, die Stromkennzahl σ mit anzugeben. Diese drückt das Verhältnis der elektrischen Leistung zur thermischen Leistung aus [Jungbluth 1996]:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{P_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \tag{1.7}$$

Abschließend kann mit dem Belastungsgrad das Verhältnis aus aktueller elektrischer Leistung im Teillastbereich zur elektrischen Nennleistungsabgabe eines KWK-Systems angegeben werden [Kretschmer 1994]:

$$\beta = \frac{P_{el,TL}}{P_{\max}} \tag{1.8}$$

1.3.2 Verfügbare Technologien

Die verfügbaren und sich in der Entwicklung befindlichen Mini-BHKW-Technologien können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Verbrennungsprozesse, in denen die energetische Umwandlung auf dem Carnot-Kreis-Prozess beruht, z. B. Kolben-, Stirling- und Dampfmotoren sowie Gasturbinen. Diese Technologie ist in Seriengeräten verfügbar.
- Eine direkte Umwandlung der chemischen Energie in Elektrizität und Wärme in einer Brennstoffzelle. Diese Technologie wird zurzeit noch in Vorseriengeräten erprobt.

Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung und Nutzung von Verbrennungsmotoren im letzten Jahrhundert bis heute ist diese Technologie sehr ausgereift und durchgängig am Markt verfügbar. So greift die Mehrzahl aller am Markt verfügbaren Mini-BHKW auf diese Technologie zurück. Ein großer Nachteil dieser Systeme ist es aber, dass die Stromkennzahl mit ca. 0,5 relativ klein ist. Deshalb geht die Entwicklung dahin, dass in Zukunft größere Stromkennzahlen erreicht werden, die ca. bei eins liegen. Mit einer höheren Stromkennzahl lässt sich eine höhere jährliche Volllaststundenanzahl erreichen. In der Konsequenz läuft die BHKW-Anlage mit einer hohen Stromkennzahl länger, um die gewünschte thermische Energie zu produzieren. Dadurch ergibt sich z. B. im Sommer eine längere Laufzeit, in der ebenfalls elektrische Energie produziert werden kann. Zur Erreichung dieses Ziels ist es notwendig, den Carnot-Kreisprozess zu umgehen. Deswegen arbeiten zurzeit viele Hersteller an der Entwicklung von Mini-