



Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

**Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung  
mittels prüfstandsgestützter Simulation**

Ulli Arndt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander W. Koch

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 08.11.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 12.02.2008 angenommen.

© 2008 by Ulli Arndt

Der Text ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern ist nur nach Genehmigung gestattet. Das gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Verwendung in Kursunterlagen oder elektronischen Systemen. Zitate unter Angabe eines Quellenvermerks im Sinne des Urhebergesetzes sind jederzeit gestattet (und erwünscht).

## Abstract

Für kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) zur Energieversorgung von Wohngebäuden wurde eine Simulation entwickelt, welche die dynamischen Vorgänge in KWK-Systemen und deren Wechselwirkungen mit den Gebäuden über ein ganzes Jahr in hoher zeitlicher Auflösung darstellt. Auf Basis von Ergebnissen aus Prüfstandsmessungen der TUM an Mikro-KWK-Systemen wurde die Simulation validiert. Mit dem Programm können erstmalig Systemkonfigurationen und -parameter (hydraulische Verschaltung, Wärmespeicher, Temperaturen etc.) variiert sowie neue Regelstrategien entwickelt werden, um Verbesserungen von Betriebsverhalten, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Ein weiterer wesentlicher Beitrag der Arbeit ist die Neuentwicklung der „Effizienzmethode“ zur ganzheitlichen Bewertung der KWK, die für primärenergetische, CO<sub>2</sub>-Emissions- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen als Grundlage dient.

Combined heat and power (CHP) is an option for the energy supply of residential buildings. A simulation is developed for showing the dynamic behaviour of CHP-systems as an answer to the heat load of different buildings over a whole year in small time steps. The simulation and its models are validated with the aid of test rig measurements on real micro-CHP-systems at TUM. The simulation provides an opportunity to vary system configurations and parameters (hydraulic schemes, heat storage, temperatures etc.) as well as to develop control strategies with the focus to identify improvements of the operational behaviour, the energy efficiency and the economy. For the evaluation of CHP versus separate production in conventional power plants and boilers the so called efficiency method was developed. This approach can be used for the evaluation of primary energy, CO<sub>2</sub>-emissions and economics.



<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Problemstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Vorgehensweise und Methodik.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Definitionen.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Gängige Bewertungsmethoden.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Energetische Ansätze .....	9
2.2.2 Ökonomische Ansätze .....	10
2.2.3 Zusammenfassung der bisherigen Bewertungsmethoden.....	12
<b>2.3 Neue Bewertungsmethode: die Effizienzmethode .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Herleitung.....	13
2.3.2 Gegenüberstellung von Effizienzmethode und Stromgutschriftmethode .....	14
<b>2.4 Vergleich der Bewertungsmethoden und Fazit .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Rahmenbedingungen der KWK .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 KWK-Technologien .....</b>	<b>17</b>
3.1.1 Verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke.....	17
3.1.2 Mikrogasturbinen.....	17
3.1.3 Stirling-Motoren.....	18
3.1.4 Brennstoffzellen .....	18
<b>3.2 KWK zur Hausenergieversorgung.....</b>	<b>19</b>
3.2.1 Dimensionierung von KWK-Systemen .....	19
3.2.2 Bedarfscharakteristik .....	20
3.2.3 Kenngrößen .....	22
3.2.4 Referenzvarianten getrennter Energieversorgung.....	25
3.2.5 Dimensionierungsziele .....	29
<b>3.3 Wirtschaftlichkeit der KWK.....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Varianten zur Nutzung der Koppelprodukte im Versorgungsobjekt .....	30
3.3.2 Beispiele für Berechnungsansätze .....	36
3.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	38
3.3.4 Kostenfunktionen .....	41
<b>3.4 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen der KWK .....</b>	<b>43</b>
<b>4 Entwicklung einer Simulation zur Abbildung von KWK-Systemen .....</b>	<b>47</b>

<b>4.1</b>	<b>Bestandsaufnahme existierender Simulationen.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulationselemente .....</b>	<b>48</b>
4.2.1	Vorgaben und Rahmenbedingungen .....	49
4.2.2	Abbildung der Systemkomponenten .....	53
4.2.3	Systemregelung.....	63
4.2.4	Auswertung und Dokumentation der Simulationsdurchläufe .....	70
<b>5</b>	<b>Validierung der Simulation.....</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Prüfstand zur messtechnischen Untersuchung von KWK-Systemen.....</b>	<b>72</b>
<b>5.2</b>	<b>Auswertung der messtechnischen Untersuchungen .....</b>	<b>73</b>
5.2.1	Motorisches BHKW „Dachs“ von Senertec .....	74
5.2.2	Motorisches BHKW „Ecopower“ von PowerPlus Technologies .....	80
5.2.3	Stirlingmotor von Solo Stirling.....	86
5.2.4	PEM-Brennstoffzelle von Vaillant.....	88
5.2.5	Erdgas-Brennwerttherme von Vaillant .....	93
<b>5.3</b>	<b>Validierung der Anlagentechnik.....</b>	<b>97</b>
5.3.1	Wärmespeichermodell.....	98
5.3.2	Wärmeverteilungsmodell .....	102
<b>5.4</b>	<b>Validierung des Systems - Energiemengen auf Tagesbasis .....</b>	<b>103</b>
<b>5.5</b>	<b>Zusammenfassung der Validierung.....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>Variationsmöglichkeiten bei KWK-Systemen .....</b>	<b>108</b>
<b>6.1</b>	<b>Monovariablen Sensitivitäten.....</b>	<b>108</b>
6.1.1	Speichervolumen .....	108
6.1.2	Anlagenleistung .....	110
6.1.3	Leistungsmodulation vs. feste Nennleistung .....	114
6.1.4	Nachtabstaltung vs. Nachtabstimmung .....	117
<b>6.2</b>	<b>Optimierungsziele.....</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>122</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>124</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>131</b>
10.1	Benutzeroberfläche des Excel-Tools „Bewertung von KWK-Anlagen“ .....	131
10.2	Normierte Stromlastgänge für Haushaltskunden .....	132

---

<b>10.3 Daten und Kennzahlen der skalierbaren Typgebäude .....</b>	<b>134</b>
<b>10.4 Kosten, Erlöse und Gesamtannuität nach VDI-Richtlinie 2067 .....</b>	<b>135</b>
10.4.1 Kosten.....	135
10.4.2 Erlöse.....	138
10.4.3 Gesamtannuität.....	139
<b>10.5 Gesetze und Verordnungen .....</b>	<b>139</b>
10.5.1 Energiewirtschaftsgesetz .....	139
10.5.2 KWK-Gesetz .....	140
10.5.3 Ökologische Steuerreform .....	143
10.5.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz .....	144
10.5.5 Emissionshandel .....	146
10.5.6 Verordnungen über den wärmetechnischen Standard von Gebäuden ...	146
<b>10.6 Auswertungshilfen .....</b>	<b>150</b>
<b>10.7 Einstellungen bei der Validierung der Simulation .....</b>	<b>151</b>
<b>10.8 Einstellungen bei den Variationen der KWK-Systeme.....</b>	<b>151</b>

## Glossar

BHKW	Blockheizkraftwerk
BVT	Beste verfügbare Technik
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DVGW	Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
GuD	Gas-und-Dampf-Kraftwerk
HeizAnIV	Heizungsanlagenverordnung
H <sub>O</sub>	Brennwert
H <sub>U</sub>	Heizwert
IEA	Internationale Energie Agentur
IfE	Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
ISOTEG	Verbundforschungsvorhaben „Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung“
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKModG	KWK-Gesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
PEMFC	Protone Exchange Membrane Fuel Cell
SLK	Spitzenlastkessel
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
VdN	Verband der Netzbetreiber
WE	Wohneinheit
WSV	Wärmeschutzverordnung



# 1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei Wohngebäuden in Deutschland ist die getrennte Versorgung mit Strom und Wärme der Regelfall. Dabei bezieht der Kunde den Strom von einem Energieversorgungsunternehmen, die benötigte Wärme für die Raumheizung und Warmwasserbereitung wird mit Standard-, Niedertemperatur- bzw. Brennwertkesseln erzeugt.

Durch ihre hocheffiziente Energieerzeugung verspricht der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme Primärenergie einzusparen und damit auch CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden, auch wenn mit dem Betrieb der KWK-Anlage der Brennstoffverbrauch im Versorgungsobjekt gegenüber der ausschließlichen Wärmeerzeugung steigt.

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen im hohen Leistungsbereich (MW bis GW) werden derzeit meistens in der Industrie und der allgemeinen Versorgung (z.B. Fernwärmeversorgung) eingesetzt. Mittlere, meist verbrennungsmotorische KWK-Anlagen (ca. 50 kW bis 1 MW) kommen in öffentlichen und Verwaltungsgebäuden, Schwimmbädern, Hotels und großen Wohngebäuden, aber auch auf Mülldeponien und in Kläranlagen zur Anwendung.

Durch die Marktreife neuer Techniken und die Entwicklung von Anlagen mit kleinsten Leistungen ist die verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung auch in Wohngebäuden eine denkbare Möglichkeit. Jedoch sind eine energetische Bewertung und der Vergleich verschiedener KWK-Techniken aufgrund der Spannweite der Leistungsgrößen, der verschiedenen Einsatzbedingungen und der unterschiedlichen Marktreife nur schwer möglich. Zurzeit stehen zur Bewertung der KWK-Anlagen nur die Betriebserfahrungen von konkreten Anwendungsbeispielen und die technischen Angaben der Hersteller zur Verfügung. Diese lassen jedoch keine ausreichenden Aussagen über die Praxistauglichkeit, Wirtschaftlichkeit und die tatsächliche energetische Effizienz zu. Eine energiewirtschaftliche Betrachtung der kompletten KWK-Systeme erfolgt nicht.

Deshalb wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Innovative KWK-Techniken zur Hausenergieversorgung“ an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) der TU München messtechnische Untersuchungen an KWK-Systemen unter Vorgabe reproduzierbarer und praxisnaher Einsatzbedingungen aus dem Haushaltssektor durchgeführt. Für diesen Bereich bieten sich verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke, Stirling-Motoren und Brennstoffzellen als technische Optionen für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in Wohngebäuden an.

Nach der Auswertung der Messungen steht eine belastbare Datenbasis als Ergebnis der Untersuchungen zur Verfügung, mit deren Hilfe ein technischer Vergleich der KWK-Systeme untereinander sowie eine primärenergetische Beurteilung im Vergleich zur getrennten Energieversorgung möglich sind /Arndt 07/.

Eine kritische Auseinandersetzung mit gängigen und in der Literatur genannten Bewertungsmethoden zeigt, ob die existierenden Methoden zur Beurteilung der KWK ausreichend sind oder ob ein neuer methodischer Ansatz gesucht werden muss, der für die Beurteilung des Primärenergieeinsatzes, der Emissionen und für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen genutzt werden kann.

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden die KWK-Systeme von den jeweiligen Herstellern für jeweils ein definiertes Wohngebäude konfiguriert. Durch eine gezielte Variati-

on relevanter Gebäude-, Betriebs- und Anlagenparameter lassen sich Potenziale für eine Optimierung der KWK-Systeme hinsichtlich des Betriebsverhaltens und der Wirtschaftlichkeit aufzeigen. Da eine messtechnische Untersuchung der Variationen mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist, wurden die Ergebnisse der Messungen dahingehend ausgewertet, dass die KWK-Systeme in einer Simulation abgebildet werden, sodass Anpassungen der Systemkonfigurationen und der Anlagenparameter möglich werden. Damit steht ein leistungsfähiges Instrument für vielfältige Bewertungen und Analysen von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung zur Verfügung.

## 2 Vorgehensweise und Methodik

Im Forschungsvorhaben „Innovative KWK-Techniken zur Hausenergieversorgung“ wurden zunächst die zu testenden KWK-Systeme eingehend analysiert. Kriterien waren dabei die technischen Eigenschaften und die vom Hersteller empfohlenen Systemkonfigurationen. Da die zu untersuchenden KWK-Anlagen unterschiedliche Leistungsdaten aufweisen, wurde ein skalierbares Typgebäude definiert. So kann bei gleich bleibenden bauphysikalischen und spezifischen Eigenschaften die Größe und damit die Wärmelast verändert werden, wodurch eine Anpassung des Gebäudes an die technischen Daten der KWK-Anlage möglich wird. Als gemeinsame Auslegungsregel erfolgt die Dimensionierung der KWK-Anlage so, dass die thermische Leistung einen Anteil von 25 % der thermischen Gebäudeauslegungsleistung ausmacht /Arndt 07/.

Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen an KWK-Systemen werden in einem Systemvergleich mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme verglichen. Dazu existiert eine Reihe von Bewertungsmethoden, die im Abschnitt 2.2 dargestellt wird. Da keine dieser Methoden die Eigenschaften der KWK hinreichend bewertet, wird in Abschnitt 2.3 die Effizienzmethode hergeleitet, die sowohl für primärenergetische als auch für Emissions- und wirtschaftliche Bewertungen herangezogen werden kann.

In Abschnitt 3 werden die Rahmenbedingungen der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland analysiert. Die verschiedenen KWK-Technologien werden dargestellt. Die Bedarfscharakteristik der Wohngebäude wird analysiert, um technisch und wirtschaftlich richtige KWK-Systeme dimensionieren zu können. Dabei besteht die Notwendigkeit, Nutzungsmodelle für die Produkte Strom und Wärme der KWK-Systeme in Wohngebäuden zu definieren und zu diskutieren. Des Weiteren werden die gesetzlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen der KWK dargestellt.

Das Kernstück der Arbeit ist eine Simulation zur Darstellung der dynamischen Vorgänge, die sich aus der Interaktion der einzelnen Elemente des KWK-Systems und der Reaktion des KWK-Systems auf die Anforderungen aus Heizwärme-, Warmwasser- und elektrischer Last in Wohngebäuden ergeben. Dazu wird zunächst das methodische Simulationskonzept erarbeitet, in dem die relevanten Parameter von KWK-Anlagen und den zusätzlichen Komponenten analysiert werden. Für jede Komponente des KWK-Systems zur Energieerzeugung, Wärmespeicherung sowie -verteilung werden Modelle aufgestellt und in Abschnitt 4.2 beschrieben. Mithilfe der Prüfstandsergebnisse aus /Muehl 07/ wurde in Abschnitt 5 die Simulation validiert und kalibriert. Hier wurden sowohl „optische“ Plausibilitätsprüfungen durchgeführt als auch Energiemengen über definierte Zeiträume bilanziert und verglichen.

Die Simulation dient der schnellen Durchführung von Systemveränderungen und -optimierungen, was, im Vergleich zu Prüfstandsversuchen, mit relativ geringem Aufwand möglich ist. In Abschnitt 6 sind Variationsmöglichkeiten der KWK-Systeme und deren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten, die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit dokumentiert.

Abschließend werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Fazit gezogen. Ausführungen über den weiteren Forschungsbedarf im Bereich der KWK für die Energieversorgung von Wohngebäuden sind Bestandteil des Ausblicks.

## 2.1 Definitionen

In diesem Abschnitt werden Begriffe und Kennzahlen zur Kraft-Wärme-Kopplung definiert, KWK-Anlagen und deren Betriebsweise beschrieben und gegeneinander abgegrenzt sowie mathematisch-physikalische Zusammenhänge und Formeln aufgeführt, die für Berechnungen und die Datenauswertung verwendet werden.

### Dezentrale Erzeugung

Unter dezentraler Energieversorgung versteht man die Energiebereitstellung durch Anlagen in Verbrauchernähe bzw. dargebotsabhängig (regenerative Energien). Bei dezentraler Erzeugung wird die Energie nicht durch zentrale Großkraftwerke, sondern durch wesentlich kleinere, dafür aber verhältnismäßig mehr Energieumwandlungsanlagen zur Verfügung gestellt. Somit befindet sich eine Vielzahl kleiner Kraftwerke in der Nähe der Verbraucher. Die Folge ist eine sich verändernde Kraftwerksstruktur sowie geänderte Anforderungen an Netzbetrieb, Energiemanagement und Schutztechnik. Dabei schließen sich die zentrale und die dezentrale Energieversorgung keinesfalls aus. Beide Energiesysteme können nebeneinander bestehen und sich gegenseitig ergänzen.

Ein wesentlicher Unterschied bei der Unterteilung der dezentralen Erzeugungsanlagen liegt in der Prognostizierbarkeit bzw. der Planbarkeit der Erzeugung. Gerade erneuerbare Energieerzeugungsanlagen haben eine geringe Planbarkeit der erzeugten Energiemengen. Mit wachsender Prognostizierbarkeit (Wetter-, Wind- bzw. Einstrahlungsvorhersagen) steigt die Verlässlichkeit der Energieerzeugung dieser Anlagen.

### Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Umwandlung von zugeführten Energien in einer Energieanlage in mehrere Zielenergien, d.h. mechanische, elektrische Energie, Wärme und Kälte, wobei diese Zielenergien an Endverbraucher abgegeben werden /VDI 2067-1/.

Die KWK wird im hohen Leistungsbereich (Mega- bis Gigawatt) in der Industrie, vor allem in wärmeintensiven Branchen, und zur Fernwärmeversorgung eingesetzt. Dort sind große Gegendruck- und Entnahmekondensationsturbinen seit Jahrzehnten ein fester Bestandteil der Energieversorgung. Im GHD-Sektor (Gewerbe, Handel, Dienstleistung) und in Wohngebäuden kommen KWK-Anlagen meist in Form von verbrennungsmotorischen Blockheizkraftwerken (BHKW) mit Leistungen von einigen Kilo- bis Megawatt zum Einsatz.

### Mikro-KWK

Der Begriff der Mikro-KWK ist nicht eindeutig definiert. In der Literatur gibt es unterschiedliche Aussagen zur Größe bzw. Leistung von Mikro-KWK-Anlagen. Die Abgrenzung nach der elektrischen Nennleistung erscheint sinnvoll, wenngleich die Festlegung der Obergrenze zu diskutieren ist.

Die Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) stellt fest, dass eine allgemein akzeptierte Definition des Leistungsbereiches für Mikro-KWK zurzeit noch nicht existiert. In der Mikro-KWK-Broschüre der ASUE werden neue Entwicklungen bei motorischen Anlagen und Brennstoffzellen mit Leistungen  $<10 \text{ kW}_{\text{el}}$  und bei Gasturbinenanlagen mit Leistungen  $<100 \text{ kW}_{\text{el}}$  vorgestellt /ASUE 01/.

Der Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung legt die Obergrenze für Mikro-KWK-Anlagen bei einer elektrischen Leistung von 15 kW fest /BKWK 05/.

In /Pehnt 04/ verbindet der Autor die Leistung mit der Versorgungsaufgabe der KWK-Anlagen und definiert die Mikro-KWK als die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung in einem einzelnen Versorgungsobjekt auf Basis einer kleinen Energieumwandlungseinheit mit einer elektrischen Leistung unter 15 kW.

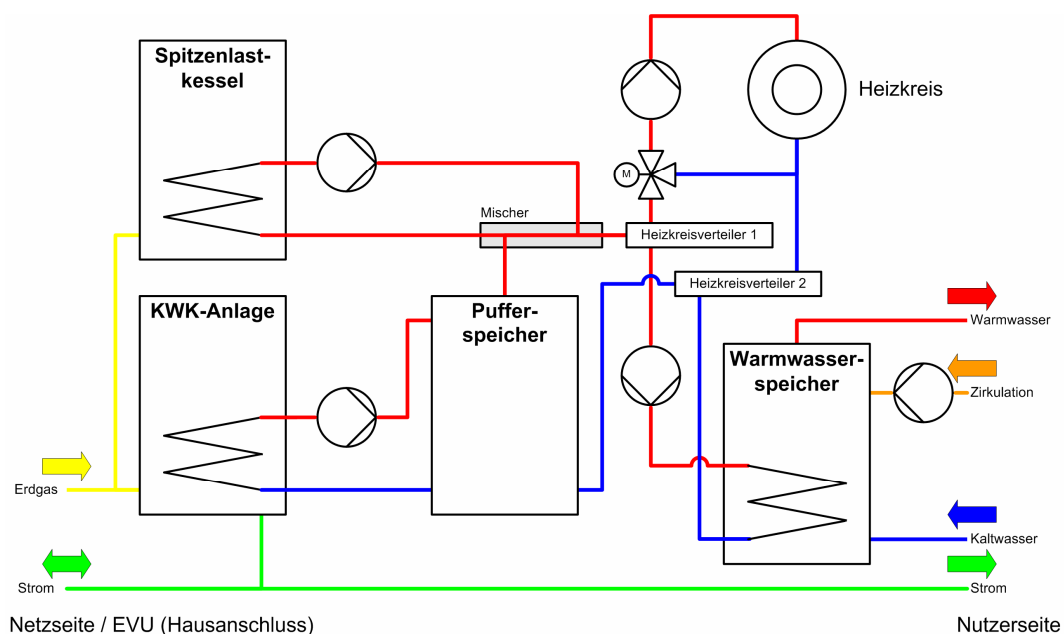
Eine andere Definition liefert die KWK-Richtlinie 2004/8/EG, Artikel 3, des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates. Dort bezeichnet der Ausdruck „KWK-Kleinstanlage“ (engl.: micro-cogeneration unit) eine KWK-Anlage mit einer Höchstkapazität von weniger als 50 kW<sub>el</sub> /RL 04/8/EG, BRL 04/8/EG/.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Festlegung der Leistungsobergrenze für Mikro-KWK-Anlagen in Abhängigkeit der betrachteten Anlagen-Technologie nicht zielführend ist. /Pehnt 04/ liefert den interessanten Aspekt der Objektversorgung, lässt aber eine gewisse Unschärfe zu, weil er die einzelnen Versorgungsobjekte nicht näher erläutert. Deshalb erscheint die Abgrenzung der Mikro-KWK-Anlagen allein nach ihrer elektrischen Leistung sinnvoll:

Anlagen zur Stromerzeugung, bei denen die anfallende Wärme komplett einer Versorgungsaufgabe zugeführt wird und die eine elektrische Nennleistung von maximal 15 kW aufweisen, werden Mikro-KWK-Anlagen genannt.

## KWK-System

Ein KWK-System besteht aus der KWK-Anlage selbst, einem Zusatz- oder Spitzenlastkessel (SLK) zur Deckung thermischer Leistungsspitzen, i.d.R. einem oder mehreren Pufferspeichern, die entweder kombiniert oder getrennt Wärme für die Raumwärme- bzw. Warmwasserbereitung bevorraten, und aus der Systemregelung.



**Abbildung 2-1:** Grafische Übersicht eines KWK-Systems

**Abbildung 2-1** zeigt ein allgemeines Hydraulikschema eines KWK-Systems, bei dem die KWK-Anlage den Pufferspeicher aufheizt und ggf. der Spitzenlastkessel die Temperatur im Vorlauf zum Heizkreisverteiler anhebt. Auf der elektrischen Seite bildet das allgemeine Stromnetz den Ausgleich zwischen Stromerzeugung der KWK-Anlage und dem Bedarf des

Gebäudes. Daneben ist eine Reihe von alternativen Anschlussmöglichkeiten vorhanden, die nach den Vorgaben der Anlagenhersteller realisiert werden.

### **Stromgeführter Betrieb**

Die KWK-Anlage folgt soweit wie möglich dem Strombedarf des zu versorgenden Objekts. Bei einem Stromverbrauch oberhalb ihrer elektrischen Nennleistung und unterhalb der Mindestleistung erfolgt Strombezug aus dem allgemeinen Stromnetz, Stromeinspeisung findet nicht statt. Diese Betriebsweise ist energiewirtschaftlich sinnvoll, solange die erzeugte Wärme im Objekt direkt oder in einem Wärmespeicher gepuffert genutzt werden kann.

### **Wärmegeführter Betrieb**

Die KWK-Anlage folgt soweit wie möglich dem Wärmebedarf des zu versorgenden Objekts. Bei einem Wärmebedarf oberhalb ihrer thermischen Nennleistung erfolgt die Wärmeversorgung durch einen Spitzenlastkessel. Gegebenenfalls erfolgt ein Strombezug aus dem allgemeinen Stromnetz bzw. eine Stromeinspeisung.

### **Vollbenutzungsstunden**

Die Vollbenutzungsstunden  $T_V$  ergeben sich als Quotient aus der Nutzenergieerzeugung und der Nennleistung der Anlagen bezogen auf einen vorgegebenen Zeitraum, in der Regel auf ein Jahr.

$$T_V = \frac{W_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Nenn}}} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

$W_{\text{Nutz}}$       Netto-Nutzenergieerzeugung in kWh

$P_{\text{Nenn}}$       Nennleistung in kW

### **Elektrischer / thermischer Systemwirkungsgrad**

Der elektrische Systemwirkungsgrad  $\eta_{\text{el}}$  bzw. thermische Systemwirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$  der KWK-Anlage und des Heizkessels beschreibt das Verhältnis von abgegebener elektrischer Nettoleistung bzw. thermischer Wärmeleistung zur jeweils eingesetzten Brennstoffleistung (Heizwert  $H_U$ ). Die elektrische Nettoleistung versteht sich als Klemmenleistung abzüglich der internen Verluste wie Umrichter und Hilfsenergiebedarf:

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el, netto}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{Q}_{\text{th}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

$P_{\text{el, netto}}$       elektrische Nettoleistung in kW<sub>el</sub>

$\dot{Q}_{\text{th}}$       thermisch nutzbare Wärmeleistung in kW<sub>th</sub>

$\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}$       Brennstoffleistung in kW<sub>Hu</sub>

### **Gesamtwirkungsgrad**

Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{ges}}$  errechnet sich als Summe aus elektrischem und thermischem Systemwirkungsgrad:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{el,netto}} + \dot{Q}_{\text{th}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

### Elektrischer / thermischer Nutzungsgrad

Der elektrische Nutzungsgrad der KWK-Anlage bzw. thermische Nutzungsgrad  $g_{\text{th}}$  der KWK-Anlage und des Heizkessels ist gleich dem Quotienten aus Netto-Stromerzeugung bzw. nutzbarer Wärmeerzeugung und dem jeweiligen Brennstoffwärmeverbrauch in der gleichen Zeitspanne:

$$g_{\text{el}} = \frac{W_{\text{el,netto}}}{Q_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

$$g_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{th}}}{Q_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

$W_{\text{el,netto}}$  Netto-Stromerzeugung in  $\text{kWh}_{\text{el}}$

$Q_{\text{th}}$  nutzbare Wärmeerzeugung in  $\text{kWh}_{\text{th}}$

$Q_{\text{Brennstoff}}$  Brennstoffwärmeverbrauch in  $\text{kWh}_{\text{Hu}}$

Im betrachteten Zeitraum sind alle An- und Abfahrvorgänge berücksichtigt.

### Gesamtnutzungsgrad

Der Gesamtnutzungsgrad  $g_{\text{ges,KWK}}$  (auch Brennstoffausnutzung) der KWK-Anlage ist das Verhältnis von Netto-Stromerzeugung und nutzbarer Wärmeerzeugung zum Brennstoffwärmeverbrauch in der gleichen Zeitspanne:

$$g_{\text{ges,KWK}} = \frac{W_{\text{el,netto}} + Q_{\text{th}}}{Q_{\text{Brennstoff}}} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

### Stromkennzahl

Die Stromkennzahl  $\sigma$  entspricht bei der Kraft-Wärme-Kopplung dem Quotienten aus der elektrischen Nettoleistung und der thermisch nutzbaren Wärmeleistung:

$$\sigma = \frac{P_{\text{el,netto}}}{\dot{Q}_{\text{th}}} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Der Kehrwert wird als Wärmekennzahl bezeichnet.

### Elektrischer KWK-Bedarfsdeckungsgrad

Der elektrische KWK-Bedarfsdeckungsgrad  $d_{\text{el,KWK,Bedarf}}$  beschreibt den Anteil der durch die KWK-Anlage erzeugten nutzbaren Stromerzeugung  $W_{\text{el,KWK,nutzbar}}$  (dunkelrote Kurve in **Abbildung 2-2**) am gesamten Strombedarf in der gleichen Zeitspanne:

$$W_{\text{el,KWK,nutzbar}} = \int_0^t (P_{\text{el,KWK}} - P_{\text{Rückspeisung}}) dt \quad \text{Gleichung 2-9}$$

$$d_{el,KWK,Bedarf} = \frac{W_{el,KWK,nutzbar}}{W_{el,Gebäude}} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

$P_{Rückspeisung}$  elektrische Rückspeiseleistung in das allgemeine Netz in kW<sub>el</sub>

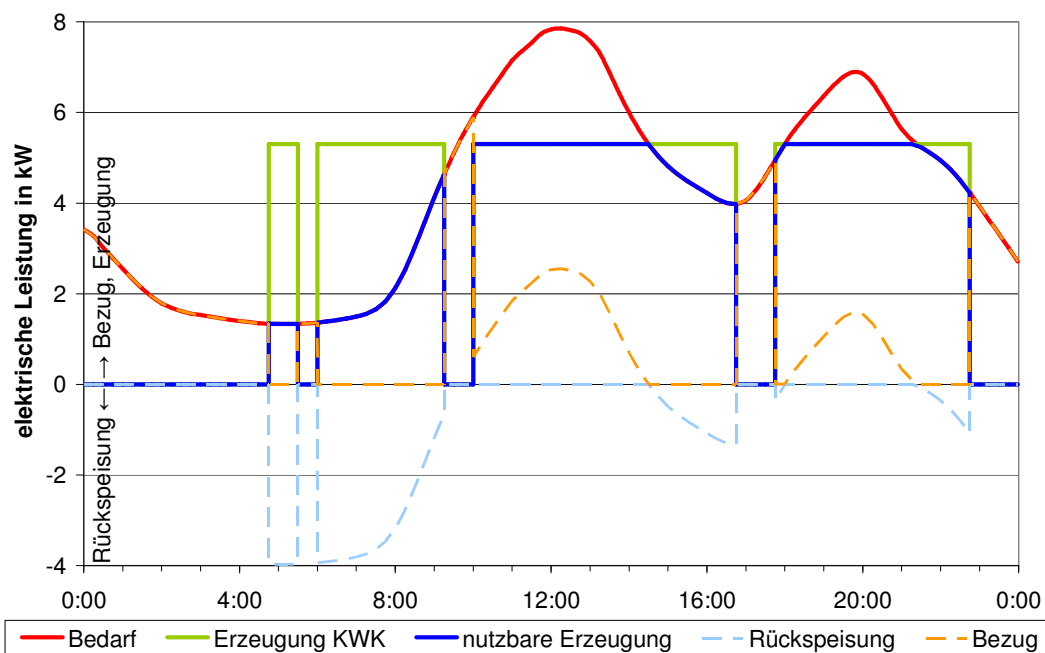
$W_{el,Gebäude}$  Stromverbrauch des Versorgungsobjekts in kWh<sub>el</sub>

### Elektrischer KWK-Produktionsdeckungsgrad

Der elektrische KWK-Produktionsdeckungsgrad  $d_{el,KWK,Produktion}$  beschreibt den Anteil der durch die KWK-Anlage erzeugten nutzbaren Stromerzeugung  $W_{el,KWK,nutzbar}$  (dunkelrote Kurve in **Abbildung 2-2**) an der von der KWK-Anlage produzierten Strommenge in der gleichen Zeitspanne:

$$d_{el,KWK,Produktion} = \frac{W_{el,KWK,nutzbar}}{W_{el,netto}} \quad \text{Gleichung 2-11}$$

Die rote Kurve in **Abbildung 2-2** zeigt den Strombedarf eines Gebäudes über einen beispielhaften Tag. Die hellgrün dargestellte Stromerzeugung der KWK-Anlage kennzeichnet den wärmegeführten Betrieb. Nur der Anteil der KWK-Erzeugung, der unter dem Bedarf des Gebäudes liegt, kann in die elektrischen KWK-Deckungsgrade einfließen. Die blaue Kurve zeigt die Rückspeisung, die orange Kurve den Reststrombezug.



**Abbildung 2-2:** Nutzbare Stromerzeugung der KWK-Anlage, Rückspeisung und Strombezug

### Thermischer KWK- und SLK-Deckungsgrad

Der thermische Deckungsgrad  $d_{th,KWK}$  bzw.  $d_{th,SLK}$  beschreibt den Anteil der durch die KWK-Anlage bzw. den Spitzenlastkessel (SLK) erzeugten nutzbaren Wärmemenge  $Q_{th,KWK}$  bzw.  $Q_{th,SLK}$  am gesamten Wärmebedarf in der gleichen Zeitspanne. Der thermische KWK-Deckungsgrad  $d_{th,KWK}$  errechnet sich wie folgt:



$$d_{th,KWK} = \frac{Q_{th,KWK}}{Q_{HK} + Q_{WWSP-Ladung}} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

$Q_{HK}$  Raumwärmeverbrauch des Versorgungsobjekts in kWh

$Q_{WWSP-Ladung}$  Energiemenge zur Warmwasserspeicherladung in kWh

Der thermische SLK-Deckungsgrad  $d_{th,SLK}$  errechnet sich analog. Da auch innerhalb des KWK-Systems Verluste auftreten (z.B. Pufferspeicher) ist die Summe aus  $d_{th,KWK}$  und  $d_{th,SLK}$  immer über 1.

### Systemnutzungsgrad

Der Systemnutzungsgrad ist der Quotient aus nutzbaren Energiemengen des KWK-Systems und den eingesetzten Endenergien wie z.B. Brennstoff.

$$g_{System} = \frac{W_{el,KWK} + Q_{HK} + Q_{WWSP-Ladung}}{Q_{Brennstoff,KWK} + Q_{Brennstoff,SLK}} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

## 2.2 Gängige Bewertungsmethoden

Da in KWK-Anlagen aus einem einzigen Energiewandlungsprozess gleichzeitig die beiden Produkte Wärme und Strom gewonnen werden, stellt sich die Frage, wie der notwendige Primärenergieeinsatz, die auftretenden Emissionen und die Kosten den beiden Produkten zugeordnet werden können. Die Bewertung der KWK kann je nach gewählter Methode zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die in der Literatur genannten Methoden lassen sich grundsätzlich nach ihren Ansätzen unterscheiden:

- Gesetze der Physik und Thermodynamik;
- energiewirtschaftliche Ansätze und Methoden der Investitionsrechnung.

Bei der Diskussion der unterschiedlichen Ansätze wird in den folgenden Abschnitten zum Vergleich eine Beispiel-KWK-Anlage betrachtet, die über einen elektrischen Nutzungsgrad von  $g_{el} = 27 \%$  und einen thermischen Nutzungsgrad von  $g_{th} = 63 \%$  verfügt.

### 2.2.1 Energetische Ansätze

Die energetischen Methoden beruhen auf den Gesetzmäßigkeiten der Physik und der Thermodynamik. Die Energieströme werden anhand ihres Energiegehalts bewertet, was zunächst auch als folgerichtig betrachtet werden muss. Als Beispiel der energetischen Ansätze soll die exergetische Methode näher vorgestellt werden. Hier erfolgt eine Bewertung der mithilfe des Exergiegehalts ausgedrückten Qualität der Koppelprodukte. Der Exergiegehalt des erzeugten Stroms beträgt 100 %. Bei der Bestimmung des Exergiegehalts der Wärme ist der Carnot-Wirkungsgrad zu berücksichtigen. Bei einer Umgebungstemperatur von  $T_0 = 293 \text{ K}$  ( $20 \text{ °C}$ ) und einer Heizwasseraustrittstemperatur von  $T = 348 \text{ K}$  ( $75 \text{ °C}$ ) errechnet sich der Exergiegehalt des Heizwassers zu 15,8 %.

$$\frac{\dot{E}}{\dot{Q}} = 1 - \frac{T_0}{T} = 1 - \frac{293 \text{ K}}{348 \text{ K}} = 0,158 \quad \text{Gleichung 2-14}$$

$\dot{E}$  Exergie des Stoffstroms

$\dot{Q}$  übertragene thermische Leistung

Bewertet man nun die Nutzungsgrade mit dem jeweiligen Exergiegehalt, kann nach Gleichung 2-15 der Anteil des Primärenergieeinsatzes für die Stromerzeugung errechnet werden. Die Berechnung des Anteils der Wärmeerzeugung erfolgt analog.

$$a_{el} = \frac{g_{el} \cdot 100\%}{g_{el} \cdot 100\% + g_{th} \cdot 15,8\%} = 73,1\% \quad \text{Gleichung 2-15}$$

In der Beispiel-KWK-Anlage sind nach der exergetischen Methode 73,1 % des Primärenergieeinsatzes der Stromerzeugung und 26,9 % der Wärmeerzeugung zuzurechnen.

### 2.2.2 Ökonomische Ansätze

Unter den ökonomischen Bewertungen werden die energiewirtschaftlichen Ansätze und Methoden der Investitionsrechnung zusammengefasst. Teilweise werden die Ansätze kombiniert, um die Bewertungsmethode in die jeweils gewollte Richtung zu lenken.

Neben den bekannteren Ansätzen, wie der Wirkungsgrad-, der Substitutions- und der Stromgutschriftmethode, werden zunächst weitere ökonomische Bewertungsmethoden auf ihre Eignung überprüft.

Bei der zielproduktorientierten Methode werden alle Aufwendungen einem Zielprodukt zugeordnet. Aufgrund der Tatsache, dass mehrere Zielprodukte entstehen, ist diese Methode für die Bewertung von KWK ungeeignet.

Die quantitative Methode ist frei zu definieren. Bei dieser Bewertung erfolgt eine gleichmäßige Aufteilung nach festzulegenden Kriterien. Diese Methode ist aus zwei Gründen für die KWK-Bewertung nicht geeignet: zum einen spiegelt sie die Wertigkeit der Zielprodukte nicht wider und zum anderen ist sie in der Wahl des Kriteriums so beliebig, dass eine Belastbarkeit der Ergebnisse infrage gestellt werden kann.

Bei der Allokationsmethode findet eine Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Prozesses auf die Zielprodukte statt. Da bei der KWK alle Inputflüsse notwendig sind, um alle Outputflüsse zu realisieren, bedarf es einer Konkretisierung der Allokationskriterien. Damit besteht aber weiterhin das Bewertungsproblem.

#### 2.2.2.1 Wirkungsgradmethode

Die Berechnung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland wird wegen internationaler Vergleichbarkeit seit 1990 nach der Wirkungsgradmethode dargestellt. Bei der Wirkungsgradmethode wird entsprechend dem Vorgehen bei internationalen Organisationen (IEA, EUROSTAT, ECE) angenommen, dass zur Stromerzeugung der Energiegehalt der eingesetzten Kernenergie zu 33 %, der Wasser- und Windkraft sowie der Photovoltaik zu 100 % und des Stromimports ebenfalls zu 100 % genutzt wird.

Wird diese Methode auf die KWK angewendet, so werden aus dem Verhältnis von elektrischem zu thermischem Nutzungsgrad auch die Primärenergieanteile bestimmt. Die Qualität der erzeugten Energien bleibt unberücksichtigt. Das bedeutet bei der Beispiel-KWK-Anlage, dass nach der Wirkungsgradmethode der Primärenergieeinsatz zu 30 % der Stromerzeugung und zu 70 % der Wärmeerzeugung zugerechnet wird.

#### 2.2.2.2 Substitutionsmethode

Bei der Substitutionsmethode wird vom gesamten Brennstoffeinsatz des KWK-Prozesses  $B_{\text{gesamt, KWK}}$  der Brennstoffeinsatz  $B(Q_{\text{th, Referenz}})$  subtrahiert, der bei der ungekoppelten Erzeugung der gleichen Wärmemenge gebraucht worden wäre. Der verbleibende Brennstoffein-

satz  $B(W_{el,KWK})$  wird der Stromerzeugung zugerechnet. Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$$B(W_{el,KWK}) = B_{gesamt,KWK} - B(Q_{th,Referenz}) \quad \text{Gleichung 2-16}$$

Bei der Substitutionsmethode wird die KWK-Anlage als Kombination einer durchschnittlichen Wärmeerzeugungsanlage und eines sehr effizienten Referenzkraftwerks aufgefasst.

Wendet man die Substitutionsmethode auf die Beispiel-KWK-Anlage an, so werden 11,2 % des Primärenergieeinsatzes der Stromerzeugung und 88,8 % der Wärmeerzeugung zugerechnet<sup>1)</sup>.

Die Substitutionsmethode wurde in Deutschland bis 1994 für Energiebilanzen angewendet. Dabei wurde angenommen, dass die Stromerzeugung in konventionellen Wärmekraftwerken ersetzt (substituiert) und somit genauso wie die Brennstoffe in diesen konventionellen Wärmekraftwerken ausgenutzt wird. Die Substitutionsmethode führt im Vergleich zur Wirkungsgradmethode bei Kernenergie zu einem niedrigeren, bei den anderen Energiequellen zu einem höheren Primärenergieanteil /BMU 05/.

### 2.2.2.3 Stromgutschriftmethode

Die Stromgutschriftmethode hat einen analogen Ansatz wie die Substitutionsmethode. Bei der Stromgutschriftmethode wird der Brennstoffeinsatz der Wärmeproduktion  $B(Q_{th,KWK})$  ermittelt, indem vom gesamten Brennstoffeinsatz der KWK-Anlage  $B_{gesamt,KWK}$  die Brennstoffmenge  $B(W_{el,Referenz})$  subtrahiert wird, die in einem Referenzkraftwerk benötigt würde, wenn dort die gleiche Menge elektrischer Energie wie in der KWK-Anlage produziert würde.

$$B(Q_{th,KWK}) = B_{gesamt,KWK} - B(W_{el,Referenz}) \quad \text{Gleichung 2-17}$$

In der DIN V 4701-10 wird als Referenz der Primärenergiefaktor der deutschen Stromerzeugung von  $f_{p,el} = 3$  angesetzt. Abhängig vom elektrischen und thermischen Nutzungsgrad der KWK-Anlage ergibt sich die Aufwandszahl der Wärmeerzeugung nach folgender Gleichung:

$$e_{g,Wärme} = \frac{f_p - g_{el,KWK} * f_{p,el}}{g_{th,KWK}} \quad \text{Gleichung 2-18}$$

$f_p$	Primärenergiefaktor des in der KWK-Anlage verwendeten Brennstoffs, z.B. $f_p = 1,1$ für Erdgas, nach DIN V 4701-10
$g_{el,KWK}$	elektrischer Jahresnutzungsgrad der KWK-Anlage
$g_{th,KWK}$	thermischer Jahresnutzungsgrad der KWK-Anlage

Die KWK-Anlage wird bei der Stromgutschriftmethode als Kombination eines durchschnittlich effizienten Referenzkraftwerks und einer dementsprechend sehr effizienten Wärmeerzeugungsanlage aufgefasst. Je nach Verhältnis der elektrischen Nutzungsgrade der KWK-Anlage und des Referenzkraftwerks kann der Fall eintreten, dass die Aufwandszahl  $e_g$  der Wärmeerzeugung in der KWK-Anlage zu Null berechnet wird oder sogar negative Werte annimmt. In der Beispiel-KWK-Anlage werden nach der Stromgutschriftmethode 79,1 % des

<sup>1)</sup> Die Referenz bei der Wärmeversorgung bildet bei dieser Rechnung der Bestand der Wärmeerzeuger in Deutschland im Jahr 2004, vgl. Abschnitt 3.2.4.1

Primärenergieeinsatzes der Stromerzeugung und 20,9 % der Wärmeerzeugung zugerechnet<sup>2)</sup>.

### 2.2.3 Zusammenfassung der bisherigen Bewertungsmethoden

In **Tabelle 2-1** sind die Bewertungsmethoden aufgeführt, deren Eignung für die energetische Bewertung von KWK-Anlagen bisher diskutiert wurde. Die exergetische Methode ist naturwissenschaftlich begründet und kommt ohne eine Referenztechnologie aus. Durch die Bewertung des Exergiegehalts der Produkte tritt die Wärmeerzeugung zu sehr in den Hintergrund. Die Wirkungsgradmethode behandelt die erzeugten Produkte Strom und Wärme qualitativ gleichwertig, was im Sinne eines primärenergetischen Ansatzes zu einer Überbewertung der Wärme führt. Die Stromgutschriftmethode und die Substitutionsmethode sind weit verbreitet, haben aber den Nachteil, dass ein Ungleichgewicht zwischen der Bewertung der Wärme- und Stromerzeugung besteht.

/Dief 02/ geht sogar davon aus, dass es sich bei der Zuordnung des Brennstoffverbrauchs einer KWK-Anlage um ein Bewertungsproblem handelt, für das es keine naturwissenschaftlich begründete Lösung gibt. Es gilt also ein Verfahren zu suchen, welches die Eigenschaften der KWK angemessen wiedergibt.

**Tabelle 2-1:** Bewertungsmethoden für KWK-Anlagen

Methode	Charakteristik	Kommentar
<b>Exergetische Methode</b>	Zielprodukte werden anhand des Exergiegehalts bewertet	Exergieanteil im Heizungswasser gering
<b>Zielproduktorientierte Methode</b>	alle Aufwendungen werden dem Zielprodukt zugeordnet	für KWK ungeeignet da mehrere Zielprodukte
<b>quantitative Methode</b>	gleichmäßige Aufteilung nach zu wählendem Kriterium	spiegelt die Wertigkeit der Zielprodukte nicht wider
<b>Allokationsmethode</b>	Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Prozesses auf die Zielprodukte	Konkretisierung der Allokationskriterien nötig
<b>Wirkungsgradmethode</b>	Bewertung mit festen Wirkungsgraden (z.B. Kernkraft 33%, erneuerbare Energien 100%)	für KWK ungeeignet wegen Überbewertung der Wärme
<b>Stromgutschriftmethode</b>	Berücksichtigung der Stromproduktion wie im Referenzkraftwerk	Betrachtung der KWK als durchschnittliches Kraftwerk und sehr guter Wärmeerzeuger
<b>Substitutionsmethode</b>	Berücksichtigung der Wärmeproduktion wie im Referenzwärmeerzeuger	Betrachtung der KWK als durchschnittlicher Wärmeerzeuger und sehr gutes Kraftwerk

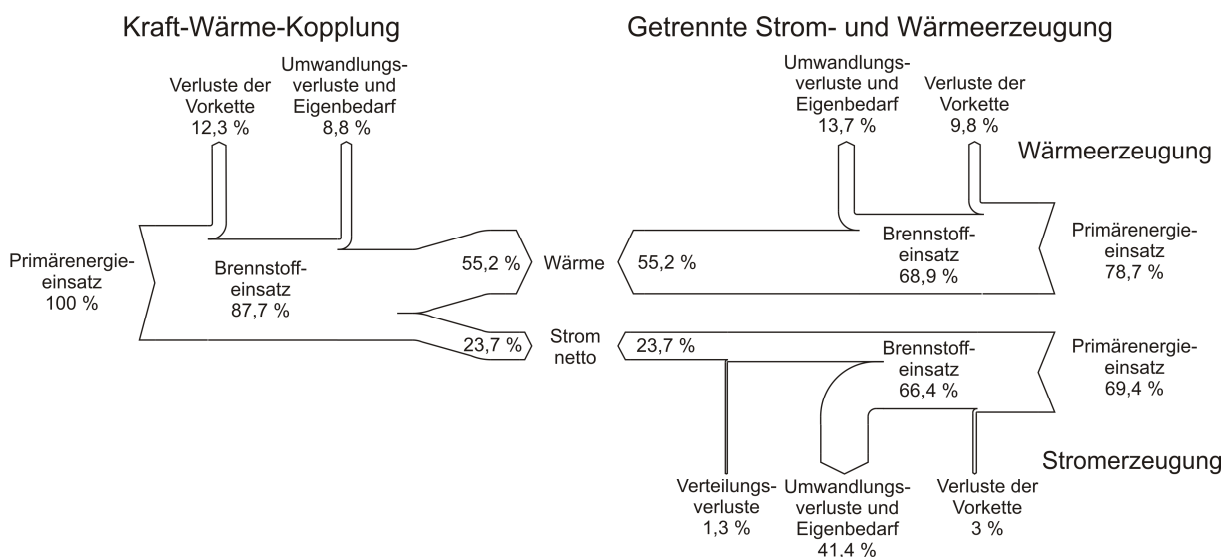
<sup>2)</sup> Die Referenz bei der Stromversorgung bildet bei dieser Rechnung der Kraftwerksmix in Deutschland im Jahr 2004, vgl. Abschnitt 3.2.4.2

## 2.3 Neue Bewertungsmethode: die Effizienzmethode

Um die Nachteile der bisher erläuterten Methoden auszugleichen, wird in Anlehnung an /Wagner 04, Dief 02/ ein alternatives Bewertungsverfahren vorgestellt. Dieses soll die Auswirkungen widerspiegeln, die der Einsatz der KWK-Anlage insgesamt auf die Brennstoffeffizienz der Energieversorgung hat.

### 2.3.1 Herleitung

In **Abbildung 2-3** ist die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in der Beispiel-KWK-Anlage aus Abschnitt 2.2 dargestellt. Aus 100 % Primärenergieeinsatz werden unter Berücksichtigung der Vorkette, der Umwandlungsverluste und der Nutzungsgrade 55,2 % Wärme und 23,7 % Strom. Würden die gleichen Energieanteile ungekoppelt, d.h. in konventionellen Kraftwerken und mit einem Heizkessel erzeugt, wäre ein Primärenergiebedarf von insgesamt 148,1 % notwendig, der sich in 78,7 % für die Wärme- und 69,4 % für die Stromerzeugung aufteilt<sup>3)</sup>. Bezieht man diese Werte wieder auf 100 %, so teilt sich der Primärenergieeinsatz bei der getrennten Erzeugung im Verhältnis von 78,7 % / 148,1 % = 53,1 % für die Wärme- zu 69,4 % / 148,1 % = 46,9 % für die Stromerzeugung auf. Dieses Verhältnis wird nun auf den Primärenergieeinsatz der KWK-Anlage übertragen, sodass auch von diesem 53,1 % der Wärme- und 46,9 % der Stromerzeugung zugerechnet werden.



**Abbildung 2-3:** Strom- und Wärmeerzeugung in einer KWK-Anlage und der gleichen Energiemengen in getrennter Erzeugung /Wagner 04/

Zusammengefasst lässt sich das Vorgehen bei der Effizienzmethode in folgende Schritte unterteilen:

- Berechnung der Anteile von Wärme und Strom aus der KWK-Anlage unter Berücksichtigung der Vorkette und der Umwandlungsverluste;
- Berechnung, welche Primärenergie zur Wärmeerzeugung in Heizkesseln und zur Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken derselben Energieanteile nötig wäre (ebenfalls unter Berücksichtigung der Vorkette und der Umwandlungsverluste der Referenzvarianten getrennter Energieversorgung);

<sup>3)</sup> Referenzvarianten „Bestand der Wärmeerzeuger“ und „Strommix Deutschland“ aus Abschnitt 3.2.4

- Ermittlung der Aufteilung des Primärenergieeinsatzes der Wärme- und Stromerzeugung getrennter Erzeugung;
- Übertragung des Verhältnisses auf den Primärenergieeinsatz der KWK-Anlage;
- Ausweisung des Primärenergieeinsatzes zur Wärme- und Stromerzeugung in der KWK-Anlage.

Setzt man den Anteil des Primärenergieeinsatzes ins Verhältnis zu den erzeugten Energieanteilen, so erhält man Kennwerte, die im Folgenden Stromerzeugungsgüte  $G_{\text{Strom}}$  bzw. Wärmeerzeugungsgüte  $G_{\text{Wärme}}$  genannt werden. In diesem Beispiel beträgt  $G_{\text{Strom}} = 23,7 \% / 46,9 \% = 50,5 \%$  und  $G_{\text{Wärme}} = 55,2 \% / 53,1 \% = 104 \%$ .

Diese Herleitung führt zu den Berechnungsvorschriften nach Gleichung 2-19 bzw. Gleichung 2-20, in welche die Bereitstellungsnutzungsgrade der getrennten Erzeugung einfließen. Beispielsweise werden bei der Stromerzeugungsgüte  $G_{\text{Strom}}$  der elektrische Nutzungsgrad der KWK-Anlage und ein mithilfe des Quotienten der Referenzvarianten-Nutzungsgrade bewerteter Anteil des thermischen Nutzungsgrades der KWK-Anlage addiert.

$$G_{\text{Strom}} = \frac{1}{f_p} * \left( g_{\text{el,KWK}} + \frac{g_{\text{el,Ref}}}{g_{\text{th,Ref}}} \cdot g_{\text{Vert.}} \cdot g_{\text{th,KWK}} \right) \quad \text{Gleichung 2-19}$$

$$G_{\text{Wärme}} = \frac{1}{f_p} * \left( g_{\text{th,KWK}} + \frac{g_{\text{th,Ref}}}{g_{\text{el,Ref}}} \cdot \frac{1}{g_{\text{Vert.}}} \cdot g_{\text{el,KWK}} \right) \quad \text{Gleichung 2-20}$$

$f_p$  Primärenergiefaktor des in der KWK-Anlage verwendeten Brennstoffs

$g_{\text{el,KWK}}$  elektrischer Jahresnutzungsgrad der KWK-Anlage

$g_{\text{th,KWK}}$  thermischer Jahresnutzungsgrad der KWK-Anlage

$g_{\text{Vert.}}$  Verteilungsnutzungsgrad für Nah- und Fernwärmenetze

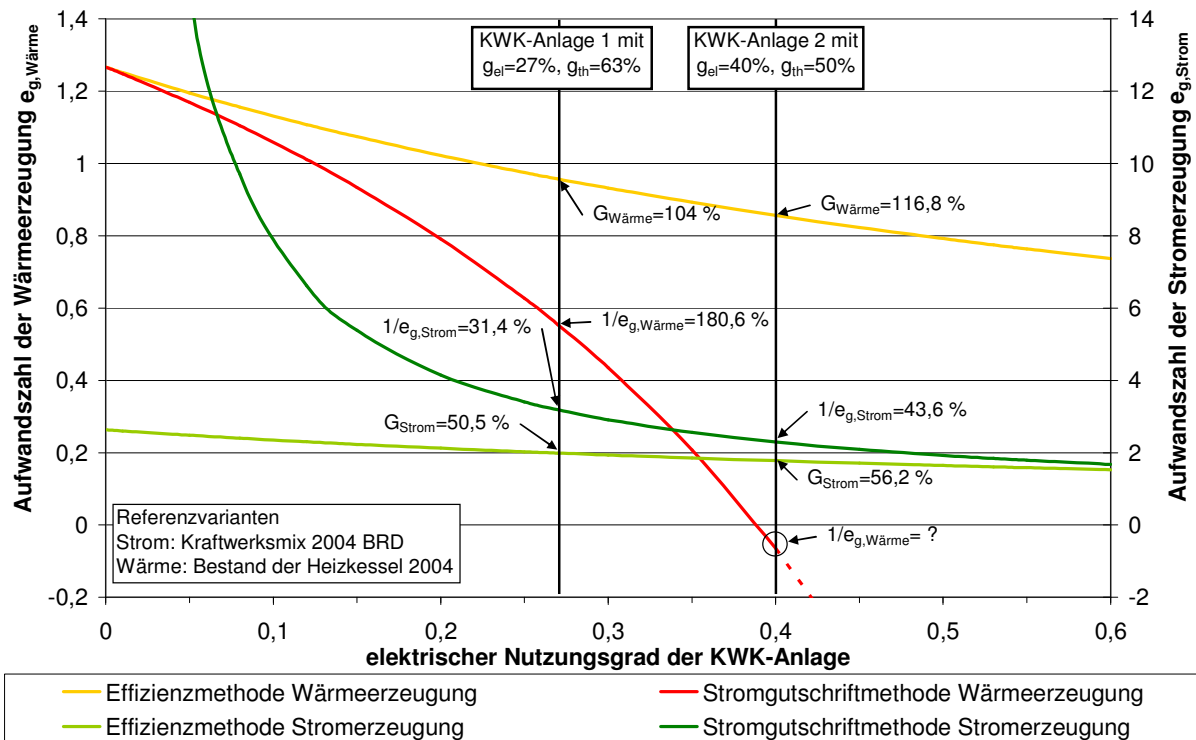
Für eine primärenergetische Betrachtung erfolgt die Berücksichtigung des Primärenergiefaktors von Erdgas für Haushaltskunden  $f_p$ . Wird die KWK-Anlage in einem Nah- oder Fernwärmenetz eingesetzt, kann dies über den Wärmeverteilungsnutzungsgrad  $g_{\text{Vert.}}$  berücksichtigt werden. Die Referenzvarianten der getrennten Erzeugung, gegenüber denen der Effizienzfortschritt ausgedrückt werden soll, werden ausführlich in Abschnitt 3.2.4 beschrieben.

### 2.3.2 Gegenüberstellung von Effizienzmethode und Stromgutschriftmethode

In **Abbildung 2-4** wird die Effizienzmethode im Vergleich zur Stromgutschriftmethode beispielhaft anhand von zwei KWK-Anlagen dargestellt. Dort sind die Aufwandszahlen der Wärme- und Stromerzeugung über den elektrischen Nutzungsgrad der KWK-Anlage aufgetragen. Betrachtet werden zwei KWK-Anlagen mit einem Gesamtnutzungsgrad von jeweils 90 % und für die getrennte Energieerzeugung der Bestand der Wärmeerzeuger bzw. der Kraftwerksmix 2004 als Referenzvarianten (vgl. Abschnitt 3.2.4.1 bzw. 3.2.4.2).

Im Extremfall bei  $g_{\text{el}} = 0$ , was einem Heizkessel mit 90 % thermischem Nutzungsgrad entspricht, stimmen die beiden Bewertungsmethoden überein. Mit zunehmendem elektrischen Nutzungsgrad  $g_{\text{el}}$  nehmen die Aufwandszahlen  $e_g$  ab, d.h. die der KWK-Anlage zugerechnete Effizienz der Wärmeerzeugung nimmt zu. Bei der KWK-Anlage 1 mit  $g_{\text{el}} = 0,27$  wird bei der Stromgutschriftmethode der gesamte Effizienzvorsprung der Wärmeerzeugung zuge-

rechnet. Die Kehrwerte der Aufwandszahlen<sup>4)</sup> ergeben sich zu 31,4 % bei der Strom- bzw. 180,6 % bei der Wärmeerzeugung. Bei gleichmäßiger Berücksichtigung des Effizienzgewinns bei der Effizienzmethode ergeben sich eine Stromerzeugungsgüte von 50,6 % bzw. Wärmeerzeugungsgüte von 103,9 %, sodass die KWK-Anlage als eine Kombination eines effizienten Wärmeerzeugers und einer gleichermaßen effizienten Stromerzeugungsanlage dargestellt wird.



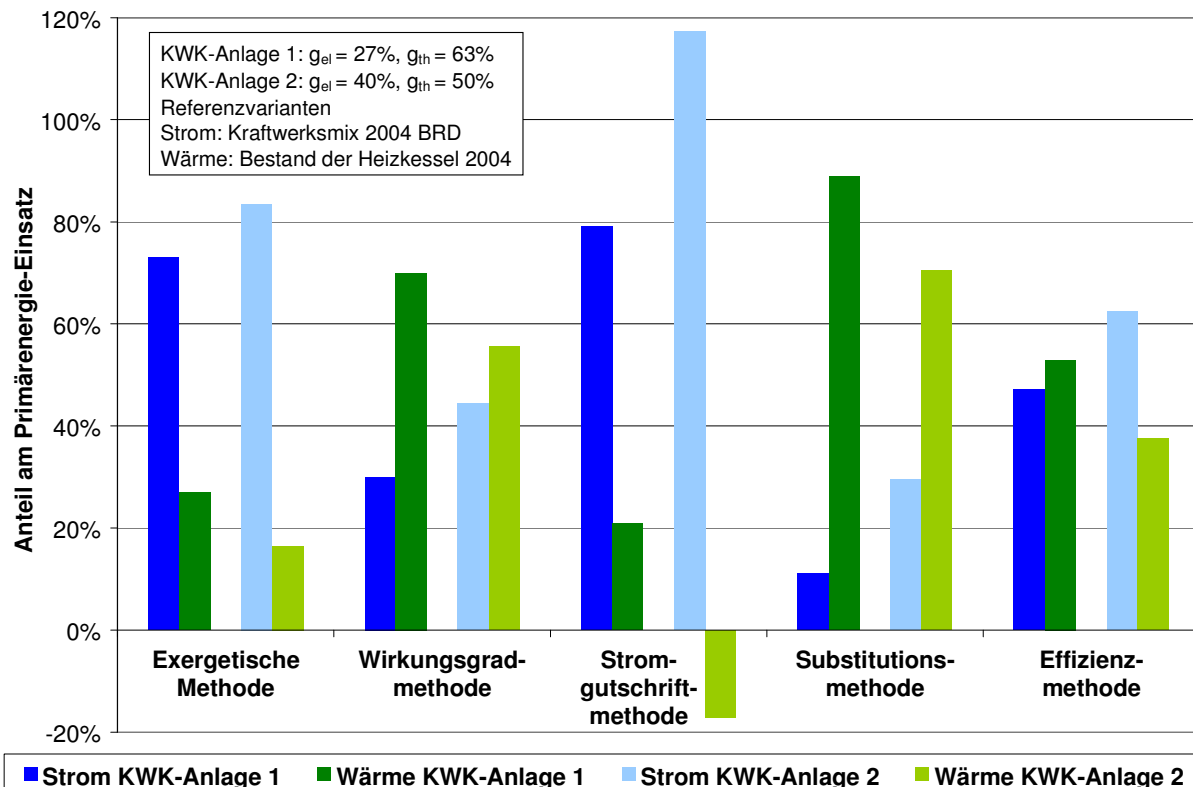
**Abbildung 2-4:** Vergleich der Stromgutschrift- und der Effizienzmethode zur Bewertung von KWK-Anlagen mithilfe der Aufwandszahlen

Die Stromgutschriftmethode kommt an ihre Plausibilitätsgrenze, wenn der elektrische Nutzungsgrad der KWK-Anlage den der Referenzvariante übersteigt. Wie bei der KWK-Anlage 2 in Abbildung 2-4 dargestellt, wird dann die Aufwandszahl der Wärmeerzeugung negativ. Hier liefert die Effizienzmethode weiterhin plausible Ergebnisse.

## 2.4 Vergleich der Bewertungsmethoden und Fazit

In **Abbildung 2-5** sind die Bewertungsmethoden von KWK-Anlagen anhand der Aufteilung des Primärenergieeinsatzes vergleichend aufgeführt. Neben der in den letzten Abschnitten eingeführten Beispiel-KWK-Anlage wurden die Methoden auch für eine KWK-Anlage mit  $g_{el} = 0,40$ ,  $g_{th} = 0,50$  angewendet. Die bereits in Abschnitt 2.2.3 angesprochenen Kritikpunkte werden noch deutlicher sichtbar.

<sup>4)</sup> Der Kehrwert der Aufwandszahl bei der Stromgutschriftmethode entspricht der Erzeugungsgüte bei der Effizienzmethode. Damit ist eine Vergleichbarkeit der beiden Bewertungsmethoden möglich.



**Abbildung 2-5:** Vergleich der Bewertungsmethode von KWK-Anlagen anhand der Aufteilung des Primärenergieeinsatzes

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Excel-Tool entstanden, welches die Auswirkungen der hier vorgestellten Bewertungsmethoden auf die Aufteilung der Primärenergie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellt. Neben der Eingabe des elektrischen und thermischen Nutzungsgrades sowie des Brennstoffbedarfs der KWK-Anlage können Referenzvarianten der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung ausgesucht werden. Je nach gewählter Bewertungsmethode ergibt sich die zugehörige Aufteilung des Primärenergieeinsatzes auf die in der KWK-Anlage produzierten Produkte Strom und Wärme. In Diagrammen werden sowohl der Primärenergieeinsatz als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der KWK-Anlage mit der getrennten Energieerzeugung dargestellt und bilanziert. Ein Screenshot des Excel-Tools ist in **Abbildung 10-1** im Anhang 10.1 dargestellt.

Aus den beschriebenen Gründen wird in dieser Arbeit die Effizienzmethode zur Bewertung der KWK Anwendung finden. Der methodische Ansatz, die Aufteilung einer Größe im Verhältnis der gleichen Größen der Referenztechnologien, wird analog auch für die Bewertung der Emissionen und die Ermittlung der Energiegestehungskosten genutzt. Dadurch wird eine hohe Nachvollziehbarkeit und Transparenz bei der Bewertung der KWK gegenüber den Referenztechnologien erreicht.



### 3 Rahmenbedingungen der KWK

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen KWK-Technologien vorgestellt. Dabei finden sowohl etablierte Anlagenkonzepte als auch innovative Entwicklungen, die sich noch auf dem Weg zur Marktreife befinden, Beachtung. Des Weiteren werden die Rahmenbedingungen der Kraft-Wärme-Kopplung diskutiert, die bei der Dimensionierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung beachtet werden müssen. Dazu gehören die Bedarfscharakteristik der zu versorgenden Gebäude, Kenngrößen für die Dimensionierung der KWK-Systeme und die Definition von Referenzvarianten der getrennten Energieversorgung, um Primärenergie- und Emissionsreduzierungen ausweisen zu können. Abschließend werden Grundvoraussetzungen für den Betrieb von KWK-Anlagen definiert. Ein zentraler Punkt ist dabei die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen. Die bei Wirtschaftlichkeitsanalysen angewendete VDI-Richtlinie 2067 wird im Anhang 10.4 beschrieben. Eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen, die die KWK betreffen und Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen hat, wird im Anhang 10.5 aufgeführt.

#### 3.1 KWK-Technologien

Im Gegensatz zu herkömmlichen thermischen Großkraftwerken, die nur auf die Stromproduktion ausgelegt sind, wird bei KWK-Anlagen durch die gleichzeitige Nutzung der Abwärme ein höherer Gesamtnutzungsgrad erreicht.

##### 3.1.1 *Verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke*

Als konventionelle Technologien zur Nutzung des KWK-Prinzips stehen seit Anfang der 1980er Jahre verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke (BHKW) und seit ca. 1990 auch Mikro-KWK-Anlagen im Leistungsbereich mit wenigen kW<sub>el</sub> zur Verfügung. Die elektrische Energie wird mit einem von einem Diesel- oder Ottomotor angetriebenen Generator erzeugt. Die anfallende Wärmeenergie wird in verschiedenen Wärmeübertragern dem Abgas des Motors, dem Motorkühlwasser, dem Motoröl und ggf. der Ladeluft entzogen und auf einem Temperaturniveau von bis zu 100 °C, i.d.R. aber unter 85 °C, zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt. Die elektrischen Anschlussleistungen der motorischen BHKW beginnen bei wenigen Kilowatt und reichen weit in den MW-Bereich hinein. BHKWs im Bereich der Mikro-KWK erreichen Gesamtwirkungsgrade von bis zu 95 %, bei thermischen Wirkungsgraden zwischen 52 % und 68 % und elektrischen Wirkungsgraden zwischen 25 % und 32 %. Bei der Nutzung der Kondensationswärme des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs (Brennwertnutzung) ist es möglich den thermischen und damit auch den Gesamtwirkungsgrad noch zu steigern. Die Stromkennzahl, die das Verhältnis zwischen elektrischen Nettoleistung und der thermisch nutzbaren Wärmeleistung ausdrückt, liegt zwischen 0,35 und 0,5. Für die Lebensdauer geben die Hersteller Werte von bis zu 80.000 Betriebsstunden an, was bei einer mittleren Nutzungsdauer von 5.000 h/a rund 16 Jahren entspricht. Bei motorischen BHKW wird der Lastzustand entweder leistungsmodulierend oder durch Ein-Aus-Betrieb realisiert.

##### 3.1.2 *Mikrogasturbinen*

Seit einigen Jahren haben aeroderivate Mikrogasturbinen die Marktreife in stationären KWK-Anwendungen erreicht. Als Mikrogasturbinen werden kleine, schnelllaufende Gasturbinen mit niedrigen Brennraumtemperaturen, geringen Brennkammerdrücken und einer Leistung

von 30 bis 500 kW definiert /Diel 01/. Mikrogasturbinen weisen auf Grund ihrer einfachen Konstruktion relativ geringe spezifische Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten auf. Laut Herstellerangaben haben die Anlagen elektrische Wirkungsgrade von 25 bis 30 % und erreichen im KWK-Betrieb Brennstoffausnutzungen von 70 bis 85 % /ASUE 01/. Im Vergleich zu motorischen BHKW haben Mikrogasturbinen i.d.R. einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad und damit verbunden eine kleinere Stromkennzahl /Diel 01/.

### **3.1.3 Stirling-Motoren**

Beim Stirling-Motor findet keine interne Verbrennung statt, wodurch nahezu jede Wärmequelle genutzt werden kann. Im Stirling-BHKW treibt ein Kolbenmotor mit äußerer Verbrennung einen angekoppelten Generator zur Stromerzeugung an. Das im Zylinder befindliche Arbeitsgas wird ständig zwischen einem heißen und einem kalten Reservoir bewegt. Ein Verdrängerkolben ändert zudem das Volumen des Arbeitsgases. Nach Durchlaufen der vier Takte befindet sich das Gas wieder am Ausgangspunkt, es handelt sich um einen geschlossenen Kreisprozess, bei dem Energie frei wird. Die anfallende Wärmeenergie wird dem Abgas des Motors, dem Motorkühlwasser und dem Motoröl entzogen und zur Nutzung ausgekoppelt.

### **3.1.4 Brennstoffzellen**

Brennstoffzellen funktionieren auf der Basis elektrochemischer Reaktionen, welche im Prinzip eine Umkehr der Wasserelektrolyse darstellen. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff verläuft in der Brennstoffzelle kontrolliert ("kalte Verbrennung"), sodass Strom und freiwerdende Wärme genutzt werden können.

Für den Einsatz in der Hausenergieversorgung und hier insbesondere im Bereich kleiner elektrischer Leistungen eignen sich zwei Brennstoffzellentypen, die Protonen Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) und die Solid Oxide Fuel Cell (SOFC). Als zukünftiges Serienprodukt müssen letztendlich beide Technologien den Anforderungen der Hausenergieversorgung entsprechen.

Für den Betrieb mit kohlenstoffhaltigen Brennstoffen benötigen PEMFC-Systeme einen Reformer zur Wasserstofferzeugung, der bei etwa 800 °C arbeitet. Daran anschließend befindet sich eine Gasreinigungsstufe, die insbesondere den Kohlenmonoxidgehalt im Reformat-Gas bis auf ca. 20 ppm reduziert /Mahl 00/. Bei den betrachteten Brennstoffzellenanlagen ist der Reformer bereits integriert.

Die PEM-Brennstoffzellenanlage als „Heizgerät“ für die Hausenergieversorgung befindet sich in der Entwicklungsphase. Im Rahmen von Feldversuchen wird der Betrieb einer größeren Anzahl von Anlagen bereits getestet. Die Ergebnisse der Feldversuche werden den Zeitpunkt der Markteinführung dieser Geräte bestimmen, der nach Aussage der Hersteller jedoch nicht vor 2008 liegen dürfte.

Bei der SOFC wird der feste Elektrolyt aus Oxidkeramik im Betriebstemperatur-Bereich von 900 bis 1.000 °C ionenleitend, so dass die  $O^{2-}$ -Ionen von der Kathode zur Anode wandern können. Er besteht üblicherweise aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonium-Dioxid und ist nicht elektrisch leitfähig. Die Sauerstoff-Ionen verbinden sich auf der Anodenseite mit den Wasserstoff-Protonen. Als Brennstoff können bei der SOFC infolge der höheren Betriebstemperatur im Vergleich zur PEM neben Wasserstoff auch Kohlenwasserstoff-Verbindungen ( $C_mH_n$ ) genutzt werden. Diese Brennstoffe, wie z.B. Erdgas, Biogas oder Deponiegas, werden intern reformiert, d.h. Wasserstoff wird abgespalten, sodass der Wasserstoff der Anode zugeführt werden kann.

## 3.2 KWK zur Hausenergieversorgung

Theoretisch ist das Potenzial für den Einsatz von KWK-Anlagen zur Hausenergieversorgung zunächst nur durch die Anzahl der zu beheizenden Wohngebäude begrenzt. Realistischer wird die Potenzialbetrachtung, wenn man technische und strukturelle Randbedingungen berücksichtigt. Die in dieser Arbeit betrachteten KWK-Anlagen nutzen ausnahmslos Erdgas als Brennstoff, sodass sich das Einsatzpotenzial auf die Anzahl der mit Erdgas versorgten bzw. versorgbaren Gebäude reduziert. KWK-Anlagen sind eine Option bei Neubauten und im Rahmen von Modernisierungen und Sanierungen im Gebäudebestand, wenn die Heizungstechnik erneuert bzw. ergänzt werden soll. So kann das technische Potenzial durch die jährlichen Verkaufszahlen von Erdgasheizungen angenähert werden. Betrachtet man auch die Ergänzung von Heizanlagen mit KWK-Anlagen, so liegt das technische Potenzial noch über den jährlichen Verkaufszahlen.

Weitere Einschränkungen des KWK-Einsatzpotenzials ergeben sich durch die Voraussetzung, dass für die jeweiligen Versorgungsobjekte passende KWK-Anlagen am Markt verfügbar sind, mit denen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Langfristig können nur wirtschaftlich darstellbare Lösungen ein maßgebliches Potenzial erschließen. Dezierte Betrachtungen zum Einsatzpotenzial wurden in /Schr 07/ diskutiert.

Neben der Wirtschaftlichkeit können mit dem Einsatz von KWK-Anlagen auch andere Ziele verfolgt werden, die im Abschnitt 3.2.5 erörtert werden. Sollen Emissionen oder Primärenergie eingespart werden, stellt sich sofort die Frage nach dem Referenzsystem, in diesem Fall die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme. Hierzu werden im Abschnitt 3.2.4 Referenzvarianten definiert. Darüber hinaus gibt es weitere Bedingungen, die für einen wirtschaftlichen Betrieb der KWK-Anlagen erfüllt werden müssen und die in Abschnitt 3.3.1 erörtert werden.

### 3.2.1 Dimensionierung von KWK-Systemen

Die konventionelle Methode zur Auslegung von KWK-Systemen erfolgt mithilfe der Dauerlinie des zu versorgenden Objektes. Dafür ist jedoch die Kenntnis des Energiebedarfs i.d.R. in Stundenmittelwerten über ein ganzes Jahr notwendig. Diese Angaben können aus Planungsunterlagen und einem angenommenen, ggf. statistikgestütztem Nutzerverhalten ermittelt werden, was bei zu erstellenden Gebäuden die einzige Möglichkeit ist. Bei bestehenden Objekten lassen sich diese aus historischen Energieverbräuchen ableiten.

Die KWK-Anlage wird dann so ausgelegt, dass ein wirtschaftlicher Kompromiss aus thermischer Leistung und Anlagenlaufzeit getroffen wird. Die drei gängigen Verfahren sind:

- Vorgabe einer gewünschten Volllaststundenzahl pro Jahr;
- Bemessung der thermischen Leistung der KWK-Anlage auf einen bestimmten Prozentsatz der Gebäudeauslegungsleistung;
- Bestimmung des größtmöglichen Rechtecks unter der Dauerlinie und Festlegung der thermischen Leistung der KWK-Anlage.

Durch den Einsatz eines Wärmespeichers kann die Laufzeit bei gleicher thermischer Leistung der KWK-Anlage noch verlängert werden. Leistungen oberhalb der thermischen Leistung der KWK-Anlage werden durch einen ausreichend dimensionierten Heizkessel abgefahren.

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Energiebedarfe analysiert und Kennzahlen als Dimensionierungshilfe zur Verfügung gestellt. Dabei soll die Frage beant-

wortet werden, welche Bedarfscharakteristik Auswirkungen auf welche Anlagenparameter hat.

### **3.2.2 Bedarfscharakteristik**

Der Energiebedarf eines Versorgungsobjekts lässt sich generell in den Raumwärme-, Warmwasser- und Strombedarf aufteilen. Um die in /Muehl 07/ gemessenen und in Abschnitt 5.2 analysierten KWK-Anlagen mit unterschiedlichen Leistungen vergleichend bewerten zu können, besteht die Notwendigkeit, die jeweilige Gebäudegröße nach definierten Kriterien der Anlagengröße anzupassen. Je nach erforderlicher Größe können die Gebäude zusammengestellt und sowohl die Wärmebedarfe für Raumheizung und Warmwasser als auch die Verluste für Heizungs- und Warmwasserverteilung sowie Zirkulation ausgewiesen werden. Damit ist eine eindeutige Dokumentation der gebäude- und anlagenseitigen Einflüsse möglich. Tabelle 10-1 im Anhang 10.3 enthält die detaillierten Daten der Dimensionierung und Auslegung einer Auswahl der Typgebäude. Im MFH-10 werden die KWK-Systeme von SenerTec und Ecopower eingesetzt, das SOLO-KWK-System findet im MFH-20 Anwendung.

In /Schr 07/ wurden Typgebäude vom Einfamilienhaus bis zum MFH-24 jeweils in den Dämmstandards „ENEV Neubau“, „WSV 95 Neubau“, „ENEV renoviert“ und „unrenoviert“ entwickelt, dimensioniert und ausgelegt. Auf diese kann im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen werden, um die Einflüsse unterschiedlicher Dämmstandards und Über- bzw. Unterdimensionierung auf die Betriebscharakteristik der KWK-Anlage bewerten zu können.

#### **3.2.2.1 Raumwärme**

Der Raumwärmebedarf stellt sowohl bei Betrachtung von Energiemengen als auch von Leistungswerten i.d.R. den höchsten Bedarf dar. Im Tageslastgang auftretende Sprünge sind nur durch Regelungseinstellungen (z.B. Übergang von Nacht- auf Tagbetrieb, Warmwasservorrangschaltung) induziert. Eine verzögerte Bedarfsdeckung ist als unkritisch einzustufen, solange in absehbarer Zeit der Bedarf gedeckt oder aufgrund der thermischen Trägheit des Gebäudes ausgeglichen werden kann. Die jahreszeitliche Schwankung des Raumwärmebedarfs ist in unseren Breiten groß und variiert zwischen Null im Sommer und der Gebäudeauslegungsleistung am kältesten Tag im Jahr. Die charakteristischen Daten sind der Jahreslastgang und die Jahressumme des Heizwärmebedarfs sowie die Gebäudeauslegungsleistung für die Raumheizung.

Die für die Validierung der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Simulation (vgl. Abschnitt 4 und 1) herangezogenen KWK-Anlagen weisen unterschiedliche Leistungsdaten auf. Die Nennleistungen variieren zwischen 4,5 und 7,5 kW<sub>el</sub> bzw. 9 und 22 kW<sub>th</sub>. Würden nun alle KWK-Anlagen mit den gleichen Bedarfslastgängen für Raumheizung und Warmwasser für ein bestimmtes Gebäude beaufschlagt, so wären die Ergebnisse für einen Vergleich der KWK-Systeme untereinander nicht geeignet. Deshalb wurde ein „skalierbares“ Typgebäude definiert, dessen bauphysikalische und spezifische Eigenschaften gleich bleiben, dessen Größe und damit auch die Bewohnerzahl aber verändert werden kann. Damit ist eine Anpassung des Gebäudes und des damit verbundenen Heizenergiebedarfes an die gegebenen Leistungsdaten der zu untersuchenden KWK-Anlagen möglich. Bei den messtechnischen Untersuchungen wurde das Gebäude so gewählt, dass als gemeinsames Merkmal die thermische Leistung der KWK-Anlage einen Anteil der thermischen Gebäudeauslegungsleistung von 25 % ausmacht. Aufgrund der Leistungsgröße der KWK-Anlagen handelt es sich beim skalierbaren Typgebäude um ein Mehrfamilienhaus. Eine ausführliche Beschreibung des skalierbaren Typgebäudes erfolgte in /Arndt 07/. Eine Übertragung dieser Methodik fand in /Schr 07/ statt, bei der zusätzlich verschiedene Sanierungs- (saniert, unsaniert)

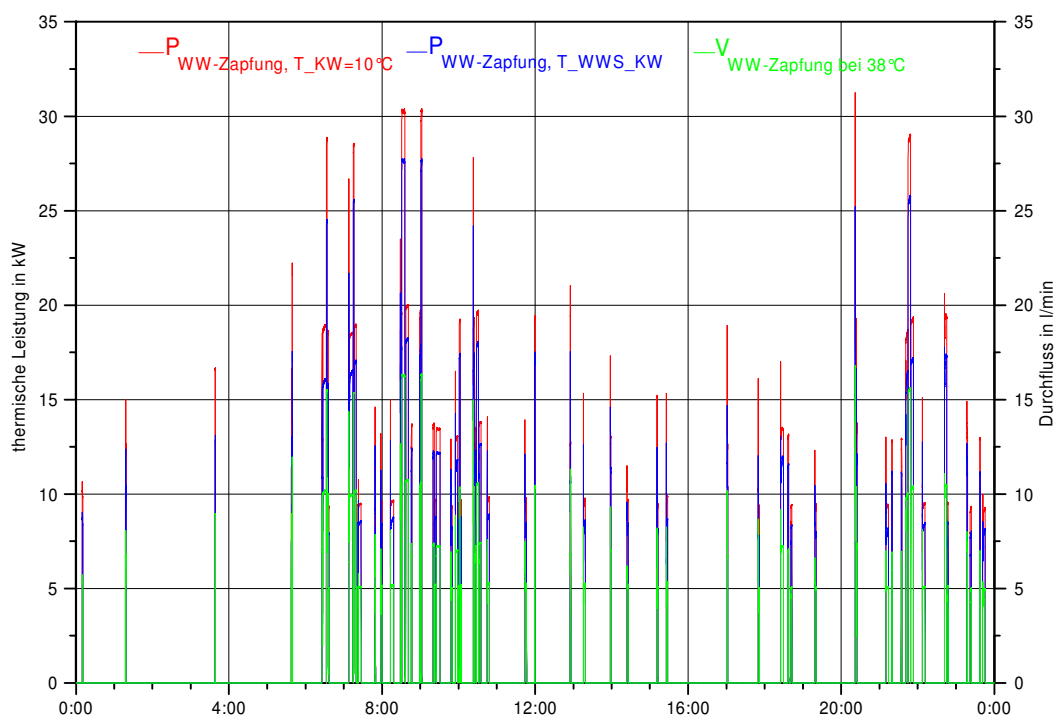
bzw. Neubaustandards (WSV'95, EnEV) für Gebäude vom Einfamilienhaus bis zum Mehrfamilienhaus mit 24 Wohneinheiten (WE) berücksichtigt wurden.

### 3.2.2.2 Warmwasser

Neben dem Heizwärmebedarf muss auch der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung berücksichtigt werden. Dieser setzt sich nach Gleichung 3-1 aus einem Anteil für die Warmwasserbereitung und der Zapfenergie zusammen. Die Bereitstellungsverluste sind vom Dämmstandard, der Größe und Dämmung des Warmwasserspeichers sowie vom Zirkulationsbetrieb abhängig. Im Gegensatz dazu beschreibt die Zapfenergie die Menge an Warmwasser bei 38 °C, die von den Gebäudenutzern nachgefragt wird und nicht von technischen Maßnahmen beeinflusst werden kann.

$$Q_{TW} = Q_{Zapf} + Q_{Zirk} + Q_{Zirkstart} + Q_{Speicher} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Ausgehend von einem spezifischen Rohrleitungsverlust von 8 W/m können für die jeweiligen Typgebäude die Warmwasser- und Zirkulationsleitungsverluste ausgewiesen werden. Die spezifischen Zirkulationsverluste bezogen auf die Rohrleitungslänge liegen bei  $Q_{Zirk, spez.} = 52,6 \text{ kWh}/(\text{m a})$  und die spezifischen Aufheizverluste für den täglichen Zirkulationsstart bei  $Q_{Zirkstart, spez.} = 6,33 \text{ kWh}/(\text{m a})$ . Berücksichtigt man nun noch die Speicherverluste der Brauchwasserspeicher  $Q_{Speicher}$ , kann man aus der Zapfenergie und der Summe der Verluste den für das jeweilige Typgebäude charakteristische Brauchwasserwärmeverbrauch  $Q_{TW}$  gemäß Gleichung 3-1 bestimmen.



**Abbildung 3-1:** Bedarfsprofil für die Warmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus mit 10 WE /Muehl 07, eigene Berechnungen/

Das am KWK-Prüfstand hinterlegte und in **Abbildung 3-1** blau dargestellte Warmwasserzapfprofil gibt die Energiemenge eines Mehrfamilienhauses mit 10 WE an, die dem Warmwasserspeicher entnommen wird. Zirkulations- und Speicherverluste werden dort nicht berücksichtigt. Die Temperatur des in den Warmwasserspeicher nachströmenden Kaltwas-

sers liegt beim Prüfstand bei durchschnittlich 18 °C. Um eine Allgemeingültigkeit des Zapfprofils zu erhalten, wird in einem ersten Auswertungsschritt das vorhandene Profil auf eine konstante Kaltwassertemperatur von 10 °C umgerechnet (rote Kurve). Für die Simulation wird das Zapfprofil als Volumenstrom mit einer Zapftemperatur von 38 °C benötigt und entsprechend auf das grün dargestellte Profil umgerechnet.

Der Warmwasserbedarf als Zapfprofil ist durch kurzzeitige Leistungsspitzen während der Warmwasserzapfungen gekennzeichnet. Dabei ist eine kurzfristige Bedarfsdeckung zu gewährleisten, um Komforteinbußen zu vermeiden. Dies kann einerseits durch leistungsstarke Wärmeerzeuger (z.B. Durchlauferhitzer, Wärmeübertrager) oder andererseits durch die Speicherung von Warmwasser erreicht werden. Die Zapfcharakteristik hat eine nur geringe jahreszeitliche Abhängigkeit. Die charakteristischen Daten sind der Jahreslastgang und die Jahressumme des Trinkwarmwasserbedarfs.

### 3.2.2.3 Strom

Der durchschnittliche Haushaltsstromverbrauch im Jahr 2004 ist der Quotient aus dem auf die Haushalte entfallenen Stromverbrauchs von 140,1 TWh /VDEW 06/ und der Anzahl der Haushalte von 39,1 Mio. /Stat 05/. Im Stromverbrauch enthalten ist der Anteil für Elektro-Speicherheizungen, der jedoch bei der Betrachtung von Gebäuden, die mit KWK-Anlagen beheizt werden sollen, abgezogen werden muss, sodass nur 115,7 TWh anzusetzen sind. Dadurch ergibt sich der durchschnittliche Netto-Stromverbrauch pro Haushalt zu 2.957,4 kWh/(WE a). Bei personenweiser Betrachtung beläuft sich der Pro-Kopf-Verbrauch auf 1402,4 kWh/(Pers. a).

Das Tagesprofil des Strombedarfs lässt sich anhand der standardisierten Bedarfslastgängen für Haushaltskunden des Verbandes der Netzbetreiber (VdN) darstellen /Fünf 99, VDEW 85/. Die Lastgänge in **Abbildung 10-2** bis **Abbildung 10-4** in Anhang 10.1 beschreiben den zeitlichen Verlauf des Strombedarfs von Haushalten ohne Heizstrombedarf bezogen auf den Maximalbedarf am jeweiligen Typtag und können mit Hilfe dieses Maximalbedarfs bzw. mit Hilfe des Jahresstromverbrauchs eines Wohngebäudes entnormiert werden.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen stellen diese Lastgänge trotz der bei ihrer Ermittlung vorgenommenen Mittelung über eine Vielzahl von Haushalten eine ausreichende Datengrundlage dar, weil die KWK-Anlagen nicht stromgeführt betrieben werden (vgl. Abschnitt 2.1). Für detaillierte Betrachtungen, insbesondere für Analysen der Netzauswirkungen, muss auf zeitlich hoch aufgelöste Lastgänge zurückgegriffen werden, die dynamische Vorgänge, wie z.B. Bezugsspitzen, widerspiegeln.

### 3.2.3 Kenngrößen

Für die Planung und Dimensionierung von KWK-Systemen gibt es momentan kein allgemeines Regelwerk. Zumeist machen die Hersteller Dimensionierungsvorgaben oder geben Empfehlungen ab. Im Oktober 2006 hat sich zu dieser Thematik der VDI-Richtlinienausschuss 4656 gegründet. Für die wichtigsten Elemente der KWK-Systeme werden im Folgenden gängige Dimensionierungsregeln aus der Praxis und „Daumenwerte“ zusammengetragen. Insbesondere sind dies die thermische Leistung<sup>5</sup> der KWK-Anlage und die Wärmespeichergrößen.

---

<sup>5)</sup> Die thermische Leistung ist für den i.d.R. wärmegeführten Betriebsweise der KWK-Anlage entscheidender als die elektrische Leistung.

### 3.2.3.1 Thermische Leistung

Für KWK-Anlagen gilt als landläufige Richtgröße, dass ab einer jährlichen Laufzeit von 4.500 bis 5.000 Stunden ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Hinter dieser pauschalen Aussage steckt die Vermutung, dass sich diese KWK-Anlage auch irgendwann rechnen wird, wenn sie nur ausreichend lange läuft. Die Wirtschaftlichkeit ist aber von viel mehr Parametern als der Laufzeit abhängig, womit diese lediglich als grober Anhaltswert dienen kann.

Als weiterer Ansatz gilt, die KWK-Anlage so auszuwählen, dass ihre thermische Leistung einem bestimmten Anteil der Gebäudeauslegungsleistung entspricht, wobei hier 25 % ein gängiger Wert ist.

Letztlich muss man sich aber die Jahresdauerlinien des Wärme- und Strombedarfs des zu versorgenden Objekts ansehen und kann dann errechnen, welche Energiemengen von der KWK-Anlage bereitgestellt werden können. Der Anteil der thermischen Leistung der KWK-Anlage an der Gebäudeauslegungsleistung und die zu erwartende Laufzeit ergeben sich daraus und können abgelesen werden. Ob der Betrieb der KWK-Anlage dann wirtschaftlich darstellbar ist, muss gesondert analysiert werden.

Je nach thermischer Leistung der KWK-Anlage muss die Differenz zur Gebäudeauslegungsleistung durch einen Spitzenlastkessel bereitgestellt werden können.

### 3.2.3.2 Wärmespeicher

In jedem KWK-System sind ein oder mehrere Wärmespeicher verbaut, um die Dynamik der Wärmebedarfsanforderung (z.B. Warmwasserbedarf) zu gewährleisten und von der stetigen Wärmeerzeugung der KWK-Anlage zu entkoppeln. Um diesen Unterschied auszugleichen, bieten sich Wärmespeicher als Ausgleich zwischen dem „Dauerläufer“ KWK-Anlage und der Anforderung „Durchlauferhitzer“ auf der Bedarfsseite an.

#### Pufferspeicher

Die Daumenwerte bei der Auslegung von Pufferspeichern reichen von der großzügigen Bandbreite von 50 bis 100 l/kW<sub>th</sub> bis zu enger gefassten 60 bis 70 l/kW<sub>th</sub>. Dies würde bei einer gewählten KWK-Anlage mit 12,5 kW<sub>th</sub> einem Pufferspeichervolumen von 625 bis 1.250 l bzw. 750 bis 875 l entsprechen.

Dabei muss man analysieren, welche Aufgabe der Pufferspeicher in einem KWK-System übernimmt. Einerseits dient er der Speicherung der von der KWK-Anlage erzeugten Wärme, um Wärmebedarfsspitzen (z.B. beim Übergang von Nacht- in Tagbetrieb) auszugleichen, die nicht gleich vom Spitzenlastkessel zu decken sind. Andererseits sind Pufferspeicher dafür geeignet, kurzzeitige Schwankungen in der Wärmenachfrage auszugleichen. Im Fall von nicht-modulierenden KWK-Anlagen sind Pufferspeicher die einzige Möglichkeit, die Wärmebereitstellung an den -bedarf anzupassen.

Des Weiteren können Vorgaben gemacht werden, innerhalb welcher Zeit eine bestimmte Temperaturdifferenz im Speicher ausgeglichen werden soll. Eine Temperaturerhöhung von beispielsweise 10 K/h erreicht man bei einem spezifischen Volumen von 86 l/kW<sub>th</sub>.

Pufferspeicher sind zumeist einbautenfreie Behälter, die mit Heizungswasser gefüllt sind und an denen die KWK-Anlagen direkt angeschlossen sind. Die im Pufferspeicher enthaltene Wärme hat eine hohe Einsatzflexibilität, da sie sowohl zur Raumwärmedeckung als auch zur Warmwasserbereitung genutzt werden kann. Auf einen Pufferspeicher kann nur verzichtet werden, wenn an seiner Stelle eine hydraulische Weiche eingebaut wird. Dafür müssen die beiden Wärmeerzeuger einen weiten Modulationsbereich aufweisen, um die große Band-

breite der Lastanforderung decken zu können, und das Warmwasserspeichervolumen entsprechend größer sein.

### Warmwasserspeicher

KWK-Systeme verfügen i.d.R. über einen Brauchwasserspeicher (vgl. Abbildung 5-3, Abbildung 5-7 und Abbildung 5-12). In Warmwasserspeichern wird Trinkwasser mithilfe von Wärmeübertragern auf eine Temperatur von ca. 60 °C aufgeheizt und den Nutzern zur Verfügung gestellt.

Die Auslegung erfolgt nach DIN 4708, Teil 2. Das Verfahren beruht darauf, dass man den Warmwasserbedarf eines Gebäudes durch die Bedarfskennzahl  $N$  ausdrückt, die mit der Gleichung 3-2 ermittelt werden kann.

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot p_i \cdot v_i \cdot w_{v,i}}{p_e \cdot w_{v,e}} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

$i$	Anzahl verschiedener Wohnungstypen (Belegung, Ausstattung)
$m_i$	Anzahl gleicher Wohnungen eines Wohnungstyps
$p_i$	Anzahl der Personen
$v_i$	Anzahl der Zapfstellen
$w_{v,i}$	Zapfstellenbedarf
$p_e$	Anzahl der Personen der Einheitswohnung
$w_{v,e}$	Zapfstellenbedarf der Einheitswohnung

In /DIN 4708-2/ werden Literaturwerte für die Anzahl der Personen in Abhängigkeit von der Wohnungsgröße und Zapfstellenbedarfe in Abhängigkeit der Zapfstellenausstattung angegeben. Für den Nenner in Gleichung 3-2 wird das Produkt für eine so genannte Einheitswohnung gewählt ( $p_e = 3,5$  Personen,  $w_{v,e} = 5.820$  Wh).

Die Wahl des passenden Brauchwasserspeichers ist mit der Forderung verknüpft, dass die vom Hersteller angegebene Leistungskennzahl  $N_L$  mindestens gleich groß wie die ermittelte Bedarfskennzahl  $N$  sein muss. Des Weiteren muss die Kesselleistung  $Q_K$  mindestens gleich groß wie die Dauerleistung des Brauchwasserspeichers  $Q_D$  sein. Die Dauerleistung  $Q_D$  bezieht sich auf eine Warmwassertemperatur von 45 °C und eine Kaltwassertemperatur von 10 °C, während die Speichertemperatur 60 °C beträgt.

Die in /DIN 4708-2/ für konventionelle Heizsysteme entwickelten Zusammenhänge lassen sich nicht direkt auf die Auslegung von Warmwasserspeichern in KWK-Systemen übertragen, weil dort der Aspekt der zusätzlichen Wärmespeicherung nicht ausreichend gewichtet wird. Es ist also theoretisch möglich, relativ kleine Warmwasserspeicher einzusetzen, weil im Pufferspeicher noch zusätzlich Wärme zur Verfügung steht, die in Abhängigkeit von der Wärmeübertragerleistung kurzfristig abgerufen werden kann. Auf einen Warmwasserspeicher kann verzichtet werden, wenn zur Warmwasserbereitung die so genannte Frischwassertechnologie genutzt wird (vgl. Abschnitt 5.2.3.1). Entsprechend größer muss dann der Pufferspeicher dimensioniert werden.



Für die Warmwasserverteilung schreibt das Arbeitsblatt 551 der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) für Mehrfamilienhäuser (Großanlagen<sup>6)</sup>) den Betrieb von Zirkulationsleitungen vor. Die wesentlichen Forderungen zur Erhaltung der Trinkwasserhygiene daraus sind /DVGW 551/:

- Das Wasser am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers muss stets eine Temperatur von  $\geq 60$  °C aufweisen. Eine systematische Unterschreitung ist nicht akzeptabel.
- Der gesamte Wasserinhalt ist mindestens einmal am Tag auf  $\geq 60$  °C zu erwärmen.
- Zirkulationssysteme sind so zu betreiben, dass die Wassertemperatur im System um nicht mehr als 5 K gegenüber der Warmwasseraustrittstemperatur des Trinkwassererwärmers unterschritten wird.
- Die Zirkulationspumpe darf maximal für eine Dauer von 8 Stunden täglich abgeschaltet werden.

Von den Zirkulationsleitungen gehen (möglichst) kurze Stichleitungen zu den Verbrauchsstellen in den einzelnen Wohnungen ab. I.d.R. wird die Zirkulation in Zeiten ohne oder mit geringem Warmwasserbedarf für eine Dauer von maximal 8 Stunden pro Tag unterbrochen. Bei Bedarf (z.B. uneinheitliches Nutzerverhalten im Gebäude) kann die Zirkulation auch während der Nacht in Betrieb sein, sodass ein ständiger elektrischer Verbrauch durch die Zirkulationspumpe aber auch Wärmeverluste im Verteilsystem auftreten. Bei den messtechnischen Untersuchungen am Prüfstand wurde ein Zirkulationsbetrieb von 18 Stunden pro Tag zwischen 6 und 24 Uhr definiert.

### **3.2.4 Referenzvarianten getrennter Energieversorgung**

Zur energiewirtschaftlichen und ökonomischen Beurteilung der verschiedenen KWK-Technologien stellt sich die Frage nach der Referenztechnologie, die als Vergleichsbasis dient. In /AGFW 01/ wird hervorgehoben, dass es für die Wahl eines Referenzsystems keine physikalisch oder technisch eindeutige Grundlage gibt, da es sich um einen theoretischen Ansatz handelt. Es gibt keine empirische Antwort, sodass das Referenzsystem notwendigerweise ein Konstrukt darstellt und nicht von einem eindeutig richtigen Referenzsystem ausgegangen werden kann.

Die KWK-Richtlinie 2004/8/EG, Artikel 4 bzw. Anhang III, des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der Effizienz des KWK-Prozesses. Darin wird herausgestellt, dass der Wirkungsgrad der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme zu ermitteln ist, die durch die KWK ersetzt werden soll. Dabei ist darauf zu achten, dass die gleichen Kategorien von Primärenergieträgern verglichen werden und dass jede KWK-Anlage „mit der besten, im Jahr des Baus dieses KWK-Blocks auf dem Markt erhältlichen und wirtschaftlich vertretbaren Technologie für die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom verglichen“ wird /RL 04/8/EG/. Für diesen Vergleich werden in den Abschnitten 3.2.4.1 bzw. 3.2.4.2 Varianten der jeweils besten verfügbaren Technik beschrieben.

Für den Systemvergleich der KWK-Technologien mit getrennter Energieerzeugung wurden in /Arndt 07/ mehrere Vergleichsvarianten mit ungekoppelter Wärme- und Stromversorgung als Referenz zur Bewertung der Energiewandlung in KWK-Anlagen definiert, methodisch

---

<sup>6)</sup> Zu Großanlagen zählen Wassererwärmungsanlagen mit Speicherinhalten über 400 l und Rohrleitungsinhalten größer 3 l.

entwickelt und beschrieben. Diese werden für diese Arbeit übernommen und im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

#### **3.2.4.1 Varianten der Wärmeversorgung**

Die Vergleichsvarianten der Wärmeversorgung basieren auf konventionellen Zentralheizungssystemen, die sowohl den Raumwärme- als auch den Warmwasserbedarf decken. Als Wärmeversorgungsvarianten werden der gesamte Bestand der erdgas- und heizölbefeuerten Zentralheizungen von 2003 in der Bundesrepublik Deutschland und die beste verfügbare Technik zur Wärmeversorgung (Erdgas-Brennwerttechnik) behandelt.

#### **Bestand der Wärmeerzeuger in Deutschland**

Diese Versorgungsvariante beschreibt die heute übliche Form der Wärmeversorgung in Deutschland. Es sind Erdgas- und Heizölkessel mit unterschiedlichem Technikstand und Alter verbaut, die in jährlich erscheinenden Kesselstatistiken der Schornsteinfegerinnung veröffentlicht werden /BVS 03, ConGB 03/. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Wärme mit dem Bestand der Wärmeerzeuger müssen 5,08 MJ Primärenergie (entspricht 1,41 kWh) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 70,9 %

#### **Beste verfügbare Technik Wärme: Erdgas-Brennwertgeräte**

Die technische Entwicklung der Brennwerttechnik gilt bis auf Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Regelung als weitestgehend abgeschlossen. Bei Erdgas-Heizanlagen lag der Marktanteil von Brennwertgeräten in Deutschland im Jahr 2003 bei 57,7 %, 19 von 20 Geräten waren wandhängende Thermen, der Rest bodenstehende Kessel /ConGB 03/. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Wärme mit der besten verfügbaren Technik müssen 4,36 MJ Primärenergie (entspricht 1,21 kWh) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 82,6 %

#### **3.2.4.2 Varianten der Stromversorgung**

Bei der Stromversorgung steht als Alternative zur Eigenerzeugung in KWK-Anlagen nur die zentrale Erzeugung in Großkraftwerken zur Verfügung.

In dieser Arbeit werden drei Varianten der Stromerzeugung vorgestellt und im Systemvergleich angewendet. Die Bandbreite reicht dabei von einem energiewirtschaftlichen Ansatz, dem Kraftwerksmix, der durch den Einsatz von KWK-Anlagen im Kraftwerkseinsatzplan verdrängt wird, über den Stromerzeugungsmix in Deutschland bis zur besten verfügbaren Technik der zentralen Stromerzeugung mittels Gas-und-Dampf-Kraftwerken.

#### **Verdrängungsmix durch die Einspeisung von KWK-Strom**

An der FfE wurde hierfür der Kraftwerkseinsatz stundenscharf modelliert. Anhand erhobener Daten zur KWK-Stromerzeugung konnte diese ebenfalls stundenscharf abgebildet werden. Somit wurde ein durch KWK verdrängter Kraftwerksmix bestimmt. Die hierbei angewendete Methodik ist in /CO2KWK 05/ dargestellt.

Für die Ermittlung der ungekoppelten Referenz wurde der Jahreslastgang der deutschen Stromerzeugung mit Hilfe der vertikalen Netzlast<sup>7)</sup> und der Netto-Stromerzeugung erstellt. Mit Hilfe der so genannten Mittwochsbilanzen des Jahres 2002 /VIK 04/ konnte der Kraft-

---

<sup>7)</sup> Vorzeichenrichtige Summe aller Übergaben aus dem Übertragungsnetz über direkt angeschlossene Transformatoren und Leitungen zu Verteilungsnetzen und Endverbrauchern.

werkseinsatz im Sinne von Grund-, Mittel- und Spitzenlastkraftwerken abgebildet werden. Es wurden darüber hinaus Anteile an Erdgaskraftwerken identifiziert, die aufgrund durchzuführender Leistungsregelung als nicht verdrängbar betrachtet werden können.

Das entwickelte Modell basiert auf einer anteiligen Verdrängung der zu jeder Stunde vorzufindenden energieträgerspezifischen Kraftwerksleistung durch KWK-Strom. Hierbei werden zunächst die Kraftwerke basierend auf Steinkohle mit einem Anteil von 78,6 %, Erdgas (13,4 %) und Mineralöl (0,8 %) verdrängt. Nur wenn die verdrängbaren Kapazitäten dieser Kraftwerke nicht ausreichen, werden zu gleichen Teilen Braunkohle- und Kernkraftwerke (jeweils 3,6 %) durch den KWK-Strom verdrängt. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom mit dem Verdrängungsmix müssen 10,35 MJ Primärenergie (entspricht 2,76 kWh) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 36,2 % /CO<sub>2</sub>KWK 05/.

### Deutscher Strommix

Seit der Liberalisierung des Strommarktes 1998 ist eine regionale Bilanzierung der Stromerzeugung mit größeren Zuordnungsproblemen verbunden. Durch die Einführung des Stromhandels können zusätzlich erzeugte Mengen in ganz Deutschland bzw. Europa abgesetzt werden. Zusätzlicher Bedarf kann in gleicher Weise über den Börsen- und OTC<sup>8)</sup>-Handel gedeckt werden. Im Jahr 2005 wurden über die Grenzen der Bundesrepublik 53,4 TWh ein- und 61,9 TWh ausgeführt. Bei einem Stromverbrauch von 611,8 TWh macht dies einen Anteil von 8,7 % (Einfuhr) bzw. 10,1 % (Ausfuhr) aus /AGEB 06/. Dennoch gibt der Stromerzeugungsmix einen guten Überblick über die Art und Weise, wie der in der Bundesrepublik Deutschland genutzte Strom erzeugt wird. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom mit dem Strommix 2005 müssen 11,54 MJ Primärenergie (entspricht 2,93 kWh) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 34,2 %.

### Beste verfügbare Technik Strom: Erdgas-GuD-Kraftwerk

Die beste verfügbare Technik sind derzeit mit Erdgas betriebene Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) mit einem Netto-Nutzungsgrad von 55 % /GEMIS 4.2/. Bei GuD-Anlagen wird durch eine Gasturbine Strom erzeugt und das heiße Abgas aus dieser in einem Abhitze- und Dampferzeuger direkt zur Erzeugung von Dampf genutzt, der in einer Dampfturbine weitere Elektrizität produziert. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom mit der besten verfügbaren Technik müssen 7,78 MJ Primärenergie (entspricht 2,16 kWh) eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 46,2 %.

#### 3.2.4.3 Zusammenfassung und Kombinationsmöglichkeit der Referenzvarianten

Alle in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Referenzvarianten der getrennten Wärme- und Stromversorgung werden anhand des spezifischen Energieaufwands und der CO<sub>2</sub>-Emissionen in **Tabelle 3-1** zusammengefasst.

Aus den möglichen sechs Kombinationen der zwei Wärme- und drei Stromversorgungsvarianten werden drei plausible Paarungen ausgewählt, die in **Tabelle 3-2** dargestellt sind. Es wurde als sinnvoll erachtet, nur die energiewirtschaftlichen, die Bestands- und die „Beste verfügbare Technik“-Varianten miteinander zu kombinieren, um sie mit der Wärme- und Stromerzeugung in den verschiedenen KWK-Systemen zu vergleichen.

---

<sup>8)</sup> Beim OTC(Over-the-counter)-Handel werden Handelsgeschäfte direkt miteinander abgewickelt, wobei die Preise selbst festgelegt werden (keine Börse, ohne Makler).

**Tabelle 3-1:** Zusammenfassung der Referenzvarianten der getrennten Energieerzeugung im Systemvergleich

		Vorkette/Verteilung		Nutzung		gesamt	
		spez. Energieaufwand	CO <sub>2</sub> -Emis.	spez. Energieaufwand	CO <sub>2</sub> -Emis.	spez. Energieaufwand	CO <sub>2</sub> -Emis.
Einheit		kWh <sub>PE</sub> /kWh <sub>EE</sub>	g/kWh <sub>EE</sub>	kWh <sub>EE</sub> /kWh <sub>NE</sub>	g/kWh <sub>NE</sub>	kWh <sub>PE</sub> /kWh <sub>NE</sub>	g/kWh <sub>NE</sub>
Wärmeversorgung	Aktueller Bestand der Heizanlagen	1,13	26,0	1,25	286,1	1,41	312,1
	BVT Wärme (Erdgas-BW)	1,14	21,9	1,06	211,3	1,21	233,2
Stromversorgung	KWK-Verdrängungsmix	1,13	87,9	2,45	818,6	2,76	906,5
	Strommix in Deutschland	1,10	61,9	2,66	559,9	2,93	621,8
	BVT Strom (Erdgas-GuD-KW)	1,19	49,3	1,82	361,0	2,16	410,3

Bei der Kombination „EW“ wird die Einspeisung der KWK-Anlage mit dem KWK-Verdrängungsmix, der Strombezug mit dem Deutschlandmix bewertet. Bei der Kombination „Bestand“ erfolgt eine Verrechnung mit dem Deutschlandmix sowohl für die KWK-Stromeinspeisung als auch für den Strombezug. Die Bewertung der KWK-Stromeinspeisung bei der Kombination „BVT“ erfolgt mit dem Deutschlandmix, der Strombezug wird mit dem BVT-Strom verrechnet.

**Tabelle 3-2:** Kombinationsmöglichkeiten der Wärme- und Stromversorgungsvarianten im Systemvergleich

		Wärmeversorgung	
		Aktueller Bestand der Heizanlagen	Beste verfügbare Technik (Erdgas-Brennwertgeräte)
Stromversorgung	Verdrängungsmix durch KWK-Stromeinspeisung	EW	-
	Strommix in Deutschland	Bestand	-
	Beste verfügbare Technik (Erdgas-GuD-Kraftwerke)	-	BVT

Die hier vorgestellte Methodik des Systemvergleichs und die Definitionen der Referenzvarianten werden im Abschnitt 6 für die vergleichende Bewertung der KWK-Systeme mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme gebraucht.

### **3.2.5 Dimensionierungsziele**

Für eine technisch richtige Auslegung und Dimensionierung eines für ein bestimmtes Gebäude passenden KWK-Systems ist die in Abschnitt 3.2.2 erörterte Bedarfscharakteristik allein nicht ausreichend. Je nach Anforderungen können grundsätzlich verschiedene KWK-Systeme für das gegebene Gebäude ausgelegt werden. Als Bedingungen soll dabei gelten, dass die Wärmeversorgung zu 100 % durch das KWK-System erfolgt, keine Wärme vernichtet wird sowie die Summe der thermischen Nennleistungen der KWK-Anlage und des Spitzenlastkessels der Gebäudeauslegungsleistung entsprechen.

In Abhängigkeit von den Zielen und Vorgaben, die mit dem Betrieb des KWK-Systems verfolgt werden sollen, sind weitere Angaben, wie z.B. Kosten und Erlöse (siehe Abschnitt 3.3) notwendig. Die unterschiedlichen Optimierungsziele werden in den nächsten Abschnitten diskutiert. Häufig stellt sich dabei die Frage nach Referenzvarianten, damit Einsparungen und Reduzierungen im Verhältnis dazu ausgewiesen werden können (vgl. Abschnitt 3.2.4).

#### **3.2.5.1 Minimaler Primärenergieverbrauch**

Ein mögliches Ziel bei der Dimensionierung einer KWK-Anlage kann ein möglichst geringer Primärenergieeinsatz für die Strom- und Wärmeversorgung eines Gebäudes sein. Diese Argumentation zielt auf das derzeit in der Politik aktuelle Thema Energieeffizienz bei der Nutzung stetig knapper werdenden Energieressourcen. Daher ist ein möglichst intelligenter Umgang mit Energie gefordert, wozu der Einsatz der KWK einen Beitrag leisten kann.

Wenn jedoch ein minimaler Primärenergieverbrauch das alleinige Dimensionierungsziel ist, kann dies zu einer sehr großen Auslegung der KWK-Anlage bis hin zu einer monovalenten Energieerzeugung ohne Spitzenlastkessel führen.

#### **3.2.5.2 Emissionsreduzierung**

Der Einsatz von KWK verspricht, Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. Besonders hier stellt sich die Frage der Reduzierung im Vergleich zu einer Referenzvariante. Des Weiteren muss eine Lokalisierung der Emissionen stattfinden, weil die dezentrale Erzeugung eben auch mit dezentralen Emissionen verbunden ist. Dies ist aufgrund der globalen Wirkung bei CO<sub>2</sub> weniger relevant, muss jedoch bei den sonstigen Emissionen (CO, CH<sub>4</sub>, NMVOC, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>) berücksichtigt werden.

#### **3.2.5.3 Wirtschaftlicher Betrieb**

In den meisten Fällen werden nur solche Energieversorgungsvarianten zum Einsatz kommen, die wirtschaftlich darstellbar sind. Die Bandbreite der Deutungsmöglichkeiten, was unter einer wirtschaftlichen Lösung zu verstehen ist, variiert stark. Wählt man hingegen den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Ansatz der Annuitätenmethode aus /VDI 2067-1/, so kann gezeigt werden, welche Kosten und Erlöse über einen Betrachtungszeitraum zu erwarten sind. Nur wenn man alle Kosten und Erlöse zum Ansatz bringt, kann eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden.

#### **3.2.5.4 „Weiche“ Ziele**

Wie in /Schr 07/ umfassend dargestellt, sind die wirtschaftliche Attraktivität oder Preise allgemein bei Innovationen nicht die einzigen Faktoren, die bei einer Markterschließung relevant sind. Im Zusammenhang mit KWK sind die Argumente Energieautarkie und Technikbegeisterung wahrscheinlich eher zutreffend als die KWK als Statussymbol zu betrachten, da die Anlagen im Allgemeinen nicht von außen sichtbar sind. Die Gruppe derer, für die

oben genannte Ziele relevant sind und die trotz eines unwirtschaftlichen Betriebs in ihren Gebäuden KWK einsetzen, ist nicht zu unterschätzen. Nach /Schr 07/ liegt der Anteil der „Pioneers“ und „Early Adopters“, also derer, denen ein wirtschaftlicher Betrieb nicht wichtig ist, bei zusammen 16 % des gesamten Marktes.

Dennoch hat die KWK in der öffentlichen Meinung ein geringeres positives Image als z.B. erneuerbare Energien, weil zumeist der fossile Energieträger Erdgas in Verbrennungsmotoren eingesetzt wird, was beides in der öffentlichen Meinung als nicht sehr attraktiv angesehen wird. Dies kann sich ändern, wenn die mit einem positiven Image besetzte Brennstoffzelle ihre Marktreife erreicht hat und aus Biomasse hergestelltes Biomethan (Biogas in Erdgasqualität) zum Einsatz kommt.

### 3.3 Wirtschaftlichkeit der KWK

Die Energieversorgung von Wohngebäuden erfolgt i.d.R. durch konventionelle Heizungen zur Wärmebereitstellung und Strombezug aus dem allgemeinen Netz. Im Vergleich dazu muss eine Versorgungsvariante mit einem KWK-System einige Voraussetzungen erfüllen, damit ein wirtschaftlicher Betrieb möglich wird. Dazu zählen neben einer richtigen Auslegung des KWK-Systems auf das zu versorgende Objekt auch die ggf. erzielbaren wirtschaftlichen Vorteile. Deshalb stellt die ökonomische Betrachtung der Versorgungssysteme ein wesentliches Kriterium bei möglichen Entscheidungen für KWK-Anlagen dar. Im Abschnitt 3.3.1 werden Varianten entwickelt, wie die erzeugte Wärme und der Strom im Versorgungsobjekt genutzt werden können.

Um eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Versorgungssysteme treffen zu können, ist es hilfreich, Kennwerte zu bilden, die miteinander verglichen werden und anhand derer erste Abschätzungen erfolgen können. Dies sind beispielsweise die auf die installierte Leistung bezogenen Investitionskosten oder die Energiegestehungskosten. Voraussetzung für eine vergleichende Betrachtung ist, dass die Rahmenbedingungen für die verschiedenen Versorgungssysteme gleich sind. Um belastbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Systeme treffen zu können, ist eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unabdingbar.

Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung lassen sich in statische und dynamische Verfahren gliedern. Die dynamischen Verfahren sind zwar aufwendiger, führen jedoch insbesondere bei langen Nutzungsdauern von Anlagen zu sinnvollerem Ergebnissen. Ein übliches dynamisches Verfahren zur Berechnung der „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ ist in /VDI 2067-1/ enthalten und wird in Anhang 10.3 beschrieben. Das dort dargestellte Berechnungsverfahren nach der Annuitätenmethode wird im Folgenden zur ökonomischen Analyse der ausgewählten Versorgungssysteme angewendet.

#### 3.3.1 Varianten zur Nutzung der Koppelprodukte im Versorgungsobjekt

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt. Die Wärme dient bei der Hausenergieversorgung zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs und wird i.d.R. durch die Wärmeerzeugung eines Spitzenlastkessels ergänzt. Grundvoraussetzung für eine effiziente Energieversorgung ist, dass die erzeugte Wärme komplett genutzt und nicht über Rückkühlanlagen an die Umgebung abgegeben wird.

Eine andere Situation bietet sich bei der Nutzung des erzeugten Stroms. Die Führungsgröße der eingesetzten KWK-Systeme ist im Regelfall der Wärmebedarf des Versorgungsobjekts. Das Koppelprodukt Strom entsteht unabhängig vom Strombedarf im Gebäude. Deshalb findet physikalisch ein Ausgleich über das Niederspannungsnetz statt: Ist der Strombedarf

höher als die KWK-Stromerzeugung, wird zusätzlicher Strom bezogen, ist der Bedarf im Versorgungsobjekt geringer als die Erzeugung, wird der Strom ins Niederspannungsnetz eingespeist. Da sich die Bedarfslastgänge für Wärme und Strom zumindest tageszeitlich decken, wird physikalisch auch ein Großteil der elektrischen Energie im Gebäude genutzt. Dafür muss eine entsprechend geeignete Infrastruktur errichtet werden, die sich, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, bei verschiedenen Nutzungsmodellen deutlich unterscheiden können.

Der Ausgleich des Strombedarfs und der -erzeugung innerhalb des Versorgungsobjektes lässt sich nur mit einem hohen technischen Aufwand vermeiden (Speicher für elektrische Energie, Inselbetrieb) und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Eine Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft zu den Auswirkungen der Stromeinspeisung dezentraler KWK-Systeme auf die Stromnetze zeigt, dass die Restlastgänge von mit KWK-Anlagen versorgten Objekten eine eigene Charakteristik aufweisen. Aufgrund der Einspeisung des KWK-Stroms werden Leistungsflüsse in beide Richtungen verzeichnet. Im dort betrachteten 6-Familienhaus mit Brennstoffzellen-System verringerte sich das Maximum des Strombezugs bei Eigenerzeugung im Vergleich zum reinen Strombezug je nach Referenztag um 15,4 bis 89,5 %. Der Einsatz dezentraler KWK-Anlagen bewirkt eine deutliche Entlastung des Niederspannungsnetzes und einen spannungssteigernden Effekt /wiba 04/. Nachteilig können sich die aufgrund der Eigenerzeugung geringeren Energiemengen, die über das bestehende Stromverteilnetz transportiert werden müssen, auf die Strompreiskalkulation des örtlichen Versorgers auswirken. Bei der derzeitigen Verbreitung von Eigenerzeugungsanlagen dürfte der Effekt jedoch marginal sein.

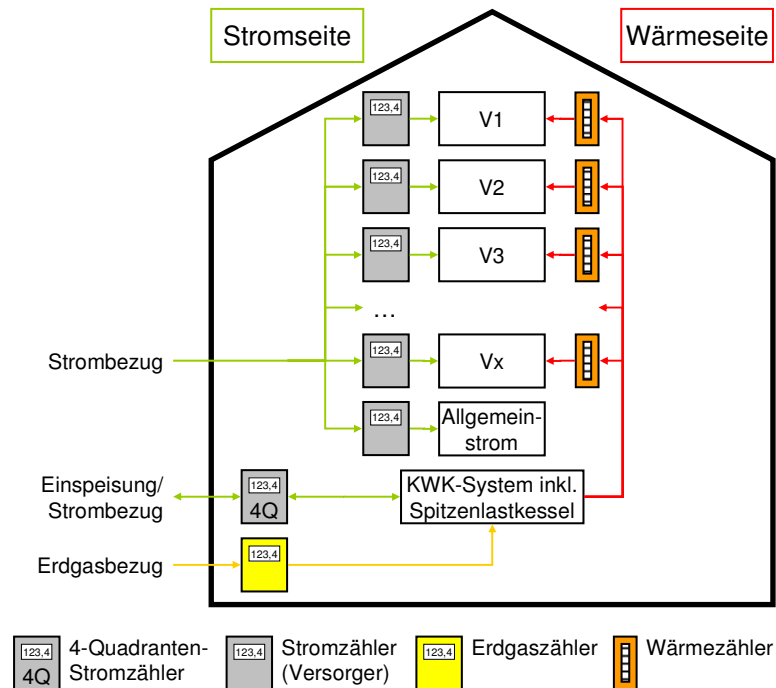
Wie in Abschnitt 10.5.2 erläutert, wird nach dem KWK-Gesetz für den in KWK-Anlagen erzeugten und in das Niederspannungsnetz eingespeisten Strom in Abhängigkeit von der Anlagengröße und -art eine Vergütung gewährt /KWKModG/. Da dieser Vergütungssatz unter dem Preis liegt, den Endkunden für elektrische Energie entrichten, lässt sich der größte wirtschaftliche Vorteil beim Betrieb einer KWK-Anlage mit einem vermiedenen Strombezug erzielen. Dafür ist sicherzustellen, dass ein möglichst großer Anteil des erzeugten KWK-Stroms im Versorgungsobjekt nicht nur physikalisch sondern auch abrechnungstechnisch genutzt werden kann und dass alle Verbraucher im Versorgungsobjekt Zugang zum KWK-Strom erhalten. Genau diese Voraussetzung zeigt eine gesetzliche Grauzone des EnWG (vgl. Abschnitt 10.5.1) und des Mietrechts auf. Hierzu gibt es unterschiedliche Auffassungen, zumal je nach betrachtetem Gebäudetyp (Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser) auch mehrere Parteien mit unterschiedlichen Interessen beteiligt sein können:

- Gebäudenutzer: Bewohner des Gebäudes, der Strom und Wärme nutzt;
- Hauseigentümer: meistens auch Betreiber der KWK-Anlage, nicht zwingend auch Gebäudenutzer, bei Wohneigentümergeinschaft (WEG) auch Gebäudenutzer;
- Örtlicher Netzbetreiber und Stromversorger: Netzanschluss des Gebäudes, Versorgung der und Abrechnung mit den Haushaltstarifkunden, Gewährung der Einspeisevergütung nach dem KWK-Gesetz.

Im Folgenden werden drei Varianten zur Nutzung des KWK-Stroms im Versorgungsobjekt dargestellt, welche die Extremfälle der Bandbreite möglicher Nutzungen zeigen. Die energiewirtschaftliche Machbarkeit aller Nutzungsmodelle ist gegeben, die rechtliche Machbarkeit des Betreiber-Modells ist jedoch nicht belegt (EnWG, Mietrecht).

### 3.3.1.1 Volleinspeisungsmodell

Das in **Abbildung 3-2** dargestellte Modell der Volleinspeisung des KWK-Stroms ist mit den wenigsten Veränderungen im Gebäude verbunden. Die KWK-Anlage wird an das Niederspannungsnetz angeschlossen und speist den gesamten KWK-Strom ein. Die Gebäudenutzer sind jeweils Tarifikunden eines Stromversorgers. Für den Allgemeinstrom ist ein eigener Anschluss vorhanden.

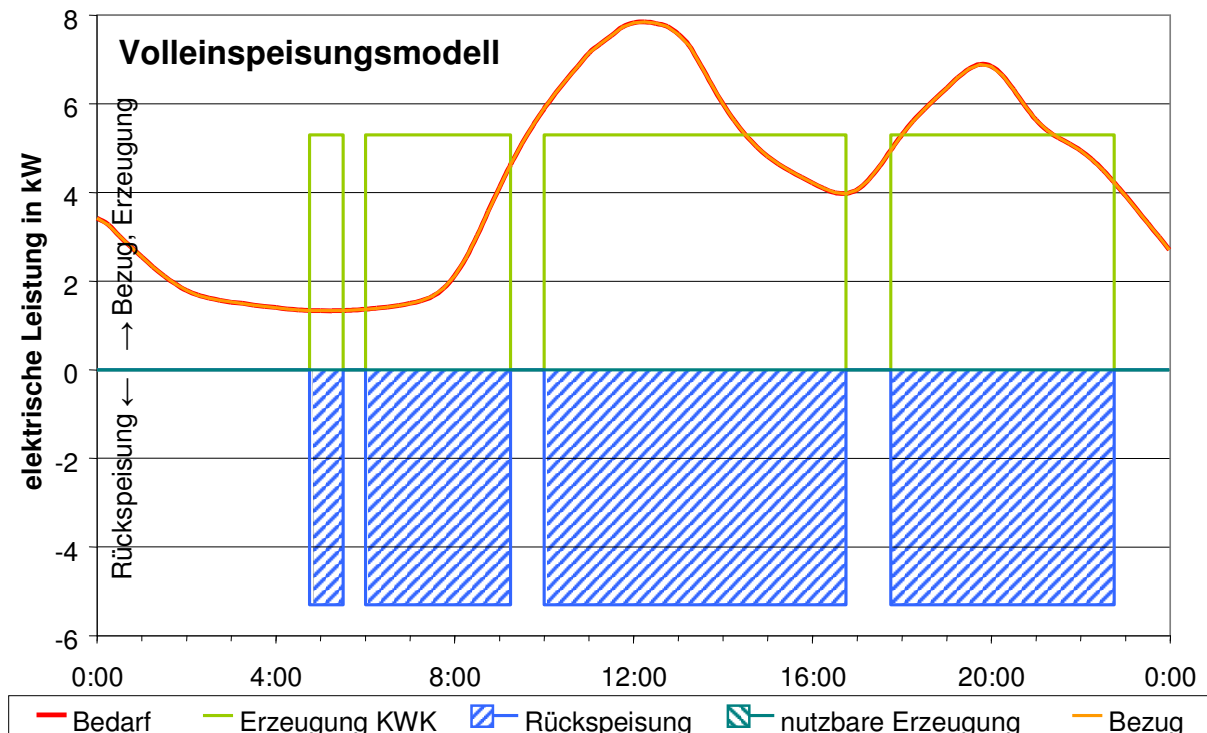


**Abbildung 3-2:** Variante zur Nutzung des KWK-Stroms: Volleinspeisungsmodell

Der Anschluss der KWK-Anlage erfolgt mit einem so genannten 4-Quadranten-Drehstromzähler zur Energiemengenmessung für Einspeisung und Bezug. Raumwärme und Warmwasser werden vom KWK-System bereitgestellt. Die Wärmeabrechnung erfolgt prinzipiell wie bei der konventionellen Heizung, nur ist zu regeln, wie die Brennstoffkosten der KWK-Anlage auf die Nutzer umgelegt werden können.

Aus dieser Konfiguration folgen die in **Abbildung 3-3** dargestellten Leistungsverläufe an der Bilanzgrenze „Gebäude“. Die rote Kurve zeigt den Strombedarf des Gebäudes über einen beispielhaften Tag. Die hellgrün dargestellte Stromerzeugung der KWK-Anlage kennzeichnet den Betrieb der wärmegeführten KWK-Anlage. Im Volleinspeisungsmodell wird die gesamte Stromerzeugung in das Stromnetz eingespeist (blau schraffierte Flächen), sodass der gesamte Bedarf des Gebäudes durch Strombezug gedeckt werden muss (orange Kurve).



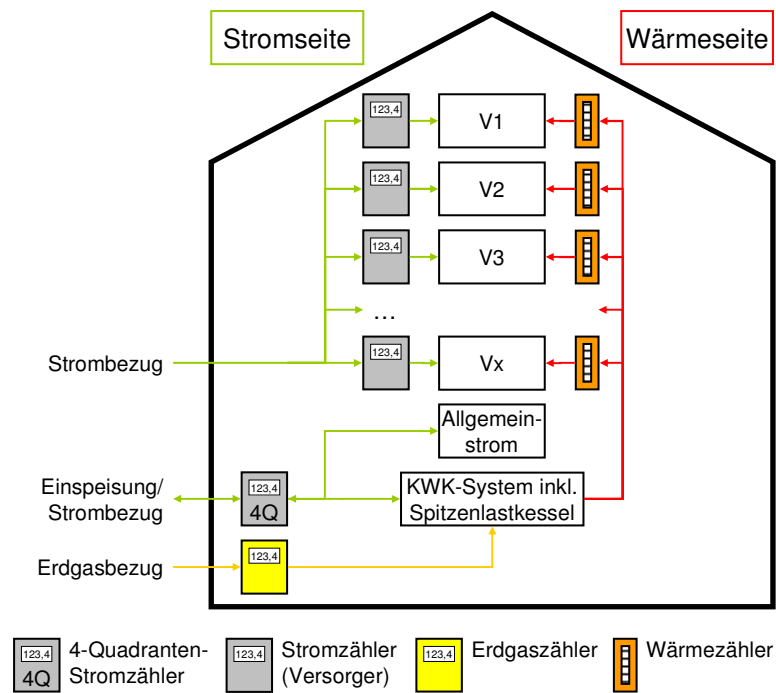


**Abbildung 3-3:** Elektrische Leistung und Flussrichtung beim Volleinspeisungsmodell

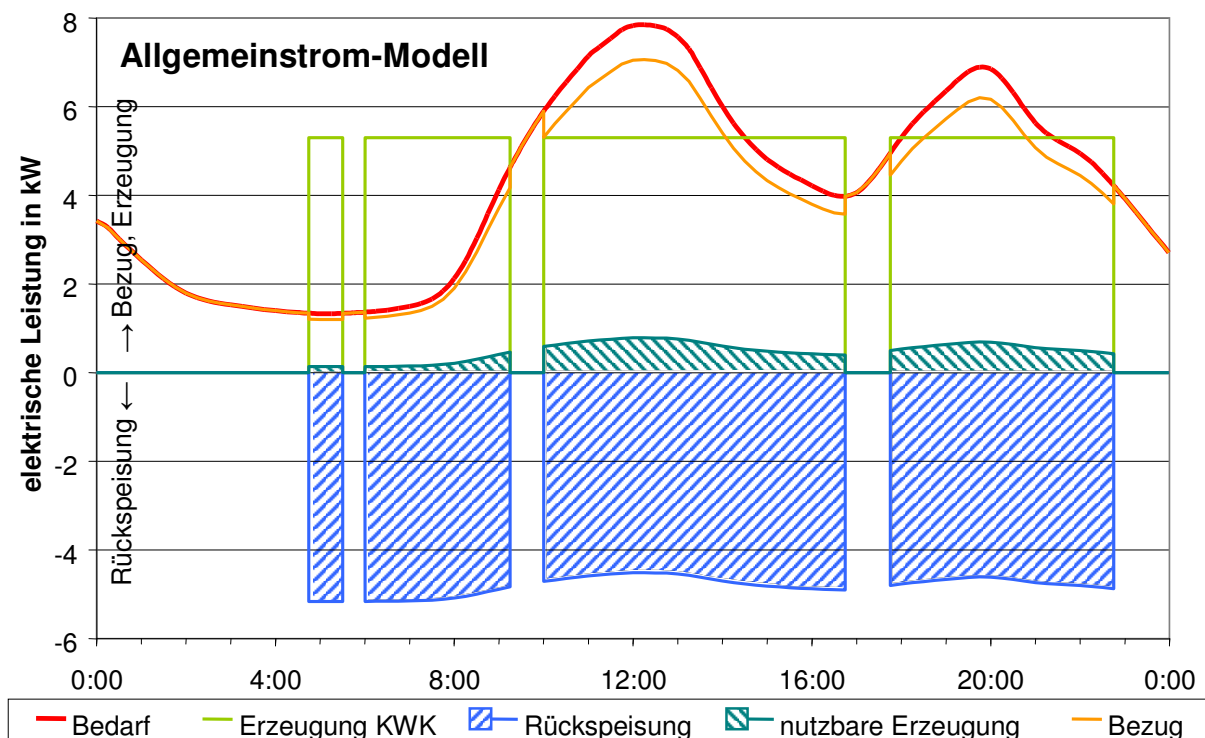
### 3.3.1.2 Allgemeinstrom-Modell

Auch beim Allgemeinstrom-Modell in **Abbildung 3-4** wird die KWK-Anlage mit einem 4-Quadranten-Drehstromzähler an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Da nach dem EnWG die Eigenstromversorgung mit KWK-Anlagen unproblematisch ist, wird im Mehrfamilienhaus nur der Allgemeinstrombedarf (Treppenhauslicht, Aufzug, Hilfsenergie der Heizung etc.), der i.d.R. unter 10 % des Gebäudebedarfs ausmacht, gedeckt und der Rest des KWK-Stroms ins Niederspannungsnetz eingespeist. Die Gebäudenutzer sind jeweils Tarfkunden eines Stromversorgers. Raumwärme und Warmwasser werden vom KWK-System bereitgestellt. Die Wärmeabrechnung erfolgt wie bei der konventionellen Heizung mit der im letzten Abschnitt erwähnten Einschränkung. Evtl. ist dieses Modell nur wirtschaftlich sinnvoll, wenn die KWK-Anlage auf den Allgemeinstrombedarf des Gebäudes dimensioniert wird. Dann ist nur eine im Verhältnis zur Gebäudegröße kleine KWK-Anlage einsetzbar.

**Abbildung 3-5** stellt die Leistungsverläufe für das Allgemeinstrom-Modell dar. Aus den Rahmenbedingungen resultiert, dass nur ein Teil des Strombedarfs durch die KWK-Stromerzeugung gedeckt werden kann (grün schraffierte Flächen). Der verbleibende Rest der KWK-Stromerzeugung wird in das Stromnetz eingespeist (blau schraffierte Flächen). Der Strombezug ist somit nur bei Betrieb der KWK-Anlage geringer als der Strombedarf im Gebäude.



**Abbildung 3-4:** Variante zur Nutzung des KWK-Stroms: Allgemeinstrom-Modell

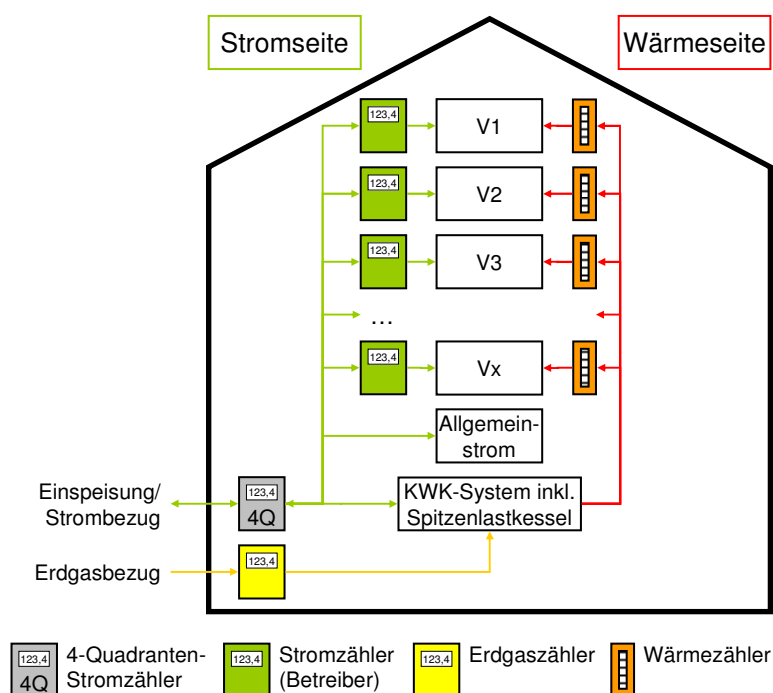


**Abbildung 3-5:** Elektrische Leistung und Flussrichtung beim Allgemeinstrom-Modell

### 3.3.1.3 Betreiber-Modell

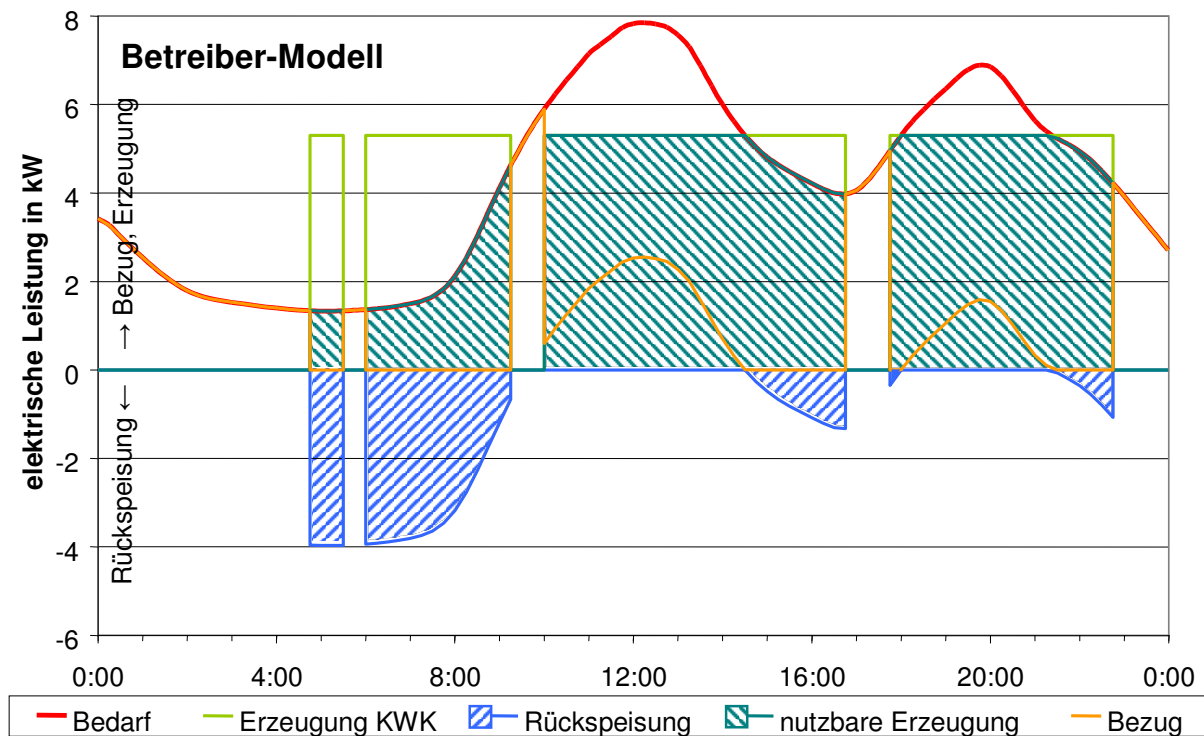
Aus Sicht eines KWK-Anlagenbetreibers ist die in **Abbildung 3-6** gezeigte Variante vorteilhaft. Dabei tritt das Gebäude mit allen Nutzern in der Gesamtheit als nur ein Kunde auf. So ist gewährleistet, dass der größtmögliche Anteil des KWK-Stroms im Gebäude selbst ge-

nutzt und damit der Fremdbezug minimiert wird. Auch hier kommt aufgrund der unterschiedlichen Tarife für Einspeisung und Bezug ein 4-Quadranten-Drehstromzähler zur Energiemengenmessung zum Einsatz. Zur internen Abrechnung des Stromverbrauchs werden anstelle der Haushaltstarifkundenanzähler des örtlichen Versorgers eigene geeichte Drehstromzähler montiert. Die Nebenkostenabrechnungen an die Gebäudenutzer werden um den Posten Strom erweitert, auf der Wärmeseite ändert sich nichts. Voraussetzung für ein solches Konstrukt ist, dass sich alle Nutzer im Gebäude zur Stromversorgung durch die KWK-Anlage entschließen. Diese Zustimmung kann der KWK-Anlagenbetreiber durch eine geeignete Strompreisgestaltung positiv beeinflussen. Das Risiko, dass sich einzelne Gebäudenutzer gegen den KWK-Strom entscheiden, ist aber immer vorhanden und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage negativ. Die technische Machbarkeit und rechtliche Durchführbarkeit wird durch einen Beschluss der Bundesnetzagentur bestätigt. Betreibergemeinschaften haben Anspruch auf Netzanschluss nach § 20 EnWG /BNetzA 07/.



**Abbildung 3-6:** Variante zur Nutzung des KWK-Stroms: Betreiber-Modell

Aus den beschriebenen Rahmenbedingungen folgen die in **Abbildung 3-7** dargestellten Leistungsverläufe an der Bilanzgrenze „Gebäude“. Die rote Kurve kennzeichnet wie schon in **Abbildung 3-3** und **Abbildung 3-5** den Strombedarf des Gebäudes. Liegt die KWK-Erzeugung über dem momentanen Bedarf des Gebäudes, wird der Rest ins Stromnetz eingespeist. Ist der Bedarf im Gebäude höher als die KWK-Erzeugung, muss zusätzlich Strom bezogen werden. Die grün schraffierten Flächen kennzeichnen die nutzbare KWK-Stromerzeugung, die deutlich größer als bei den vorher vorgestellten Modellen sind.



**Abbildung 3-7:** Elektrische Leistung und Flussrichtung beim Betreibermodell

### 3.3.2 Beispiele für Berechnungsansätze

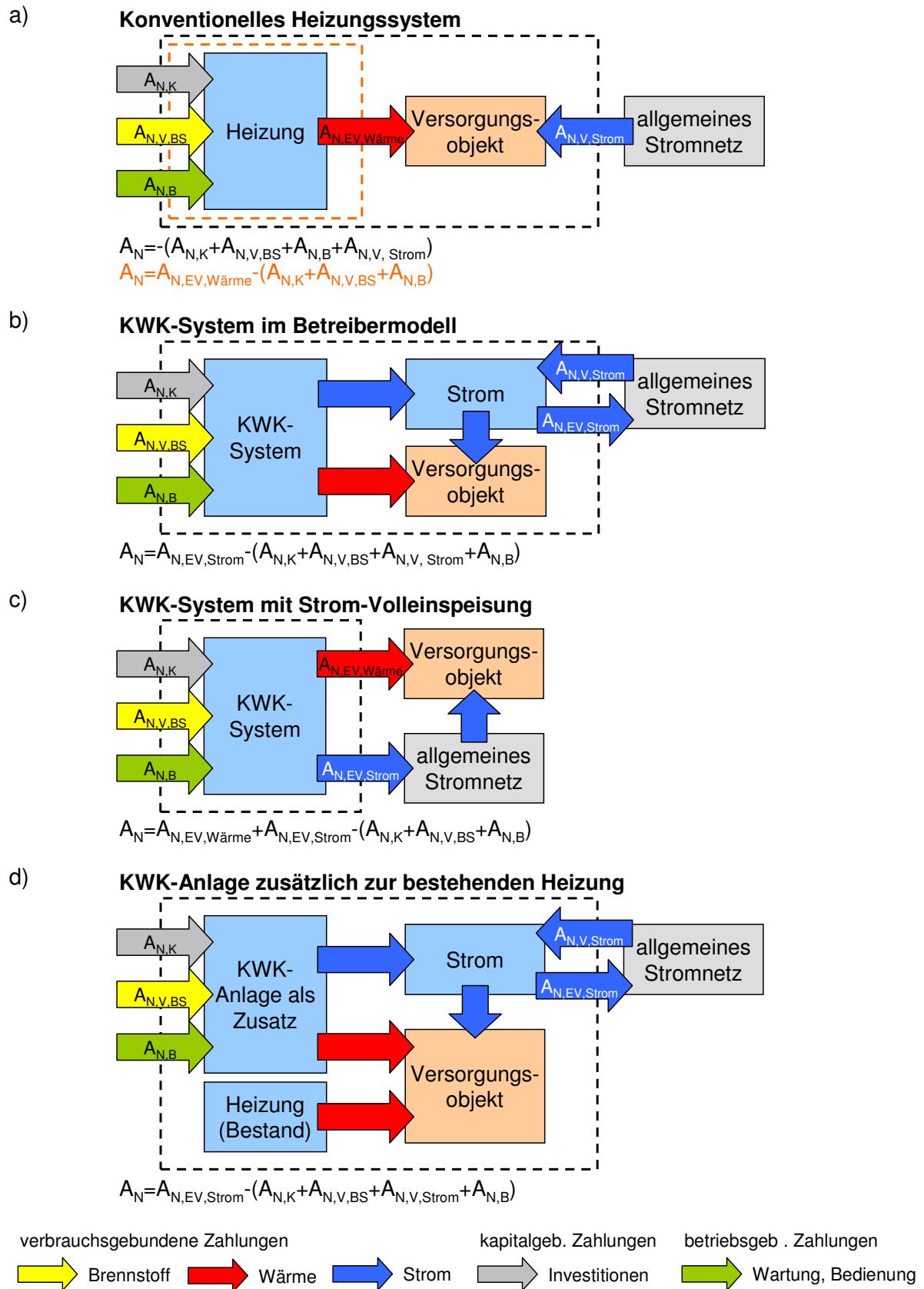
Bei der Berechnung der Gesamtannuität kommt es auf das gewählte Versorgungskonzept und die Abgrenzung (Bilanzraum) der zu bewertenden Maßnahme an, was in den Beispielen in **Abbildung 3-8** erläutert wird.

Die Betrachtung der Gesamtannuität wird zunächst in zwei Fälle unterschieden:

- Anlagen, mit denen durch Verkauf von Wärme, Kälte, Strom etc. Gewinn erwirtschaftet werden soll (z.B. Nahwärmenetze)
- Anlagen, bei denen keine Einzahlungen auftreten (z.B. Heizanlage in einem Einfamilienhaus)

Im ersten Fall muss  $A_N > 0$  sein, damit die Anlage wirtschaftlich ist, d.h. die Annuität der Einzahlungen ist größer als die Annuität aller Ausgaben. Werden in diesem Fall verschiedene Anlagen miteinander verglichen, ist diejenige vorzuziehen, für die die größere Gesamtannuität errechnet wird. Im zweiten Fall ist  $A_N < 0$ . Die günstigere Anlage ist dann diejenige, die am wenigsten Auszahlungen verursacht. Unter gleichen Randbedingungen können so für verschiedene Versorgungssystem-Varianten aus den unterschiedlichen Annuitäten die jeweiligen Gesamtannuitäten errechnet und verglichen werden.

Abbildung 3-8 a) zeigt ein konventionelles Heizungssystem, das die Wärmelieferung für ein Objekt sicherstellt. Der Strom wird aus dem allgemeinen Netz bezogen. Die Gesamtannuität ist negativ. Betrachtet man hingegen nur den orangenen Bilanzraum, sollten die Erlöse aus dem Wärmeverkauf die Kosten decken, sodass die Gesamtannuität mindestens ausgeglichen ist.



**Abbildung 3-8:** Berechnungsansätze der Gesamtannuitäten verschiedener Versorgungskonzepte mit KWK-Anlagen

Ein KWK-System im Betreibermodell ist in Abbildung 3-8 b) dargestellt. Als Einheit in einem gemeinsamen Bilanzraum beliefert ein KWK-System ein Versorgungsobjekt mit Strom und Wärme. Auf der Stromseite wird der überschüssige Strom in das allgemeine Stromnetz eingespeist, was zu verbrauchsgebundenen Erlösen für die Stromlieferung führt (Einspeisevergütung). Übersteigt der Bedarf die Eigenproduktion, wird Strom aus dem allgemeinen Netz bezogen. Die Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf die KWK-Anlage und den Spitzenlastkessel ist in diesem Fall für die Annuität unerheblich.

Es fallen keine verbrauchsgebundenen Erlöse für die Wärmelieferung sondern nur verbrauchsgebundene Kosten für den Brennstoffbezug an. Im Regelfall wird der größte Teil der Stromproduktion im Versorgungsobjekt selbst verbraucht, weshalb die Gesamtannuität negativ sein wird.

Berechnet man die Gesamtannuität für ein KWK-System mit Strom-Volleinspeisung (Wärmecontracting, Nahwärmenetze etc.), erhält man verbrauchsgebundene Erlöse für die Wärmelieferung und Stromeinspeisung (vgl. Abbildung 3-8 c)). Die Gesamtannuität muss mindestens ausgeglichen sein, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten.

Ein weiterer Aspekt fällt mit in die Betrachtung, wenn zusätzliche Maßnahmen bewertet werden sollen. Wie in Abbildung 3-8 d) dargestellt, wird eine bestehende Wärmeversorgung um eine KWK-Anlage ergänzt. Auf der Kostenseite fallen kapitalgebundene Auszahlungen für die Investitionen der zusätzlichen KWK-Anlage, verbrauchsgebunden der Mehreinsatz des Brennstoffs sowie die zusätzlichen betriebsgebundenen Kosten für die Wartung der KWK-Anlage an. Durch die Stromeigenproduktion werden die verbrauchsgebundenen Kosten für den Strombezug reduziert. Auf der Erlösseite ergeben sich wiederum verbrauchsgebundenen Einzahlungen für die Stromeinspeisung. Solche zusätzlichen Maßnahmen müssen eine positive Gesamtannuität ( $A_N > 0$ ) aufweisen, um wirtschaftlich sinnvoll zu sein.

### 3.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Finanz- und Investitionstheorie existieren verschiedene Methoden, die Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit von Investitionen geben können. Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebene Annuitätenmethode ist für Vergleiche verschiedener Versorgungssysteme geeignet, weil die jeweiligen Gesamtkosten unterschieden nach Kapital-, Betriebs- und Verbrauchskosten als Jahreskosten angegeben werden.

#### 3.3.3.1 Energiegestehungskosten

Bei der Ermittlung der Energiegestehungskosten werden die Kosten eines Versorgungssystems in Relation zur erzeugten Nutzenergiemenge gesetzt. Bei KWK-Systemen besteht das Problem, zu welchen Teilen die eingesetzte Energie und die Kosten auf die Produkte Strom und Wärme aufgeteilt werden. Generell stehen vier Varianten für die Beurteilung zur Verfügung:

- Variante 1: Bewertung der Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser mit Hilfe der Wärmegegestehungskosten eines konventionellen Heizsystems im gleichen Versorgungsobjekt und Division der verbleibenden Kosten mit der erzeugten KWK-Strommenge.

$$p_{\text{Strom}} = \frac{A_{N,\text{gesamt}} - A_{N,V,\text{Strom}} - (p_{\text{Wärme}} * Q_{\text{Wärme}})}{W_{\text{Strom}}} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

- Variante 2: Bewertung der erzeugten KWK-Strommenge mit Hilfe der Strombezugskosten (Mischpreis für Haushaltskunden) und Division der verbleibenden Kosten mit der vom KWK-System erzeugten Nutzenergiemenge für Raumwärme und Warmwasser.

$$p_{\text{Wärme}} = \frac{A_{N,\text{gesamt}} - A_{N,V,\text{Strom}} - (p_{\text{Strom}} * W_{\text{Strom}})}{Q_{\text{Wärme}}} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

- Variante 3: Ermittlung des Verhältnisses von marktüblichen Strombezugskosten  $p_{\text{Strom,konv.}}$  (Mischpreis für Haushaltskunden) und Wärmegestehungskosten  $p_{\text{Wärme,konv.}}$  eines konventionellen Heizsystems im gleichen, zu versorgenden Objekt, Aufteilung der Energiekosten des KWK-Systems im Verhältnis der Gestehungs- und Bezugskosten konventioneller Erzeugung.

$$p_{\text{Wärme}} = \frac{A_{N,\text{gesamt}} - A_{N,V,\text{Strom}}}{Q_{\text{Wärme}} + W_{\text{KWK-Strom}} * \text{Verhältnis} \left( \frac{p_{\text{Strom,konv.}}}{p_{\text{Wärme,konv.}}} \right)} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

$$p_{\text{Strom}} = p_{\text{Wärme}} * \text{Verhältnis} \left( \frac{p_{\text{Strom,konv.}}}{p_{\text{Wärme,konv.}}} \right) \quad \text{Gleichung 3-6}$$

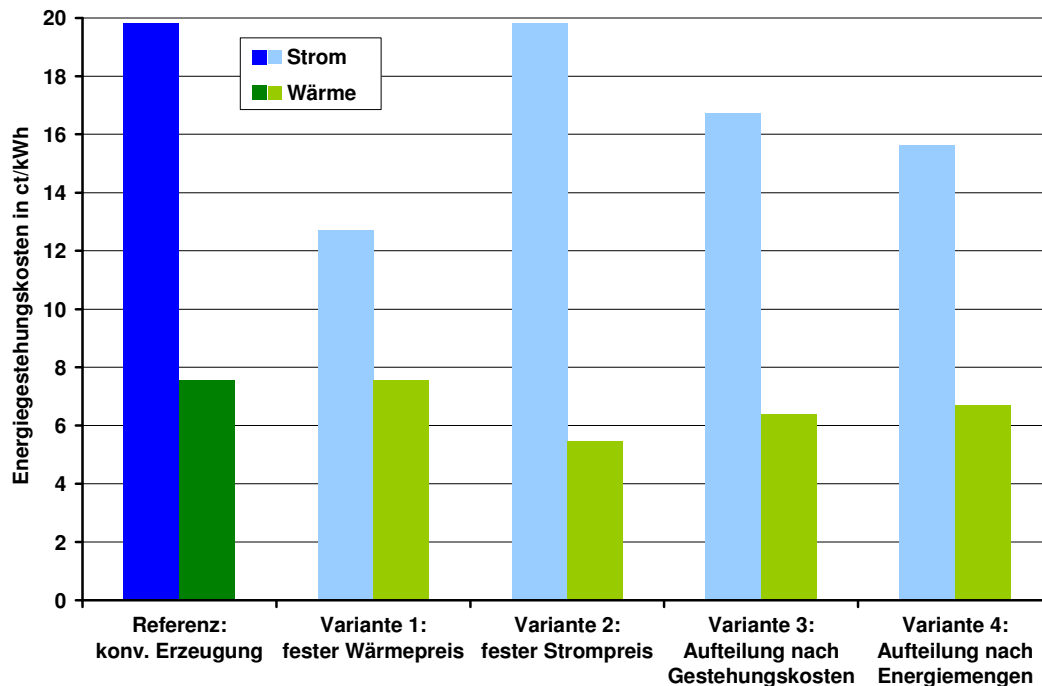
- Variante 4: Ermittlung des Verhältnisses von erzeugter KWK-Strommenge und Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser, Aufteilung der Energiekosten des KWK-Systems im Verhältnis der erzeugten Energiemengen.

$$p_{\text{Wärme}} = \frac{A_{N,\text{gesamt}} - A_{N,V,\text{Strom}}}{Q_{\text{Wärme}} + W_{\text{KWK-Strom}} * \text{Verhältnis} \left( \frac{Q_{\text{Wärme}}}{W_{\text{KWK-Strom}}} \right)} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

$$p_{\text{Strom}} = p_{\text{Wärme}} * \text{Verhältnis} \left( \frac{Q_{\text{Wärme}}}{W_{\text{KWK-Strom}}} \right) \quad \text{Gleichung 3-8}$$

In **Abbildung 3-9** sind zunächst die Energiegestehungskosten der konventionellen ungekoppelten Erzeugung dargestellt (Referenz: erstes Säulenpaar). Die Stromkosten sind als Mischpreis (Grund- und Arbeitskosten) errechnet. Bei den Varianten 1 und 2 wurde jeweils eine Kostengröße der Referenz festgehalten, sodass die errechneten Energiegestehungskosten weit von marktüblichen Werten abweichen.

Variante 3 (viertes Säulenpaar) greift den methodischen Ansatz der in Abschnitt 2.3 hergeleiteten Effizienzmethode auf und stellt einen Kompromiss der beiden ersten Varianten dar, weil hier das Verhältnis der marktüblichen Gestehungs- bzw. Bezugskosten auf die Energieerzeugung der KWK-Anlage projiziert wird. Von der Wahl eines Vergleichsobjekts mit konventioneller Heiztechnik ist nur die vierte Variante unabhängig, bei der aber die Endenergie Strom mit der Nutzenergie Wärme verglichen wird. Im Folgenden wird der Ansatz der dritten Variante nach Gleichung 3-5 und Gleichung 3-6 gewählt.



**Abbildung 3-9:** Varianten zur Aufteilung der Energiegestehungskosten bei KWK-Systemen

### 3.3.3.2 Kapitalwertmethode und Amortisation

Bei der Kapitalwertmethode werden die mit einem Kalkulationszinssatz abgezinnten Erlöse (Kapitalrückflüsse) gegen die Investition (Anschaffungsauszahlung) aufgerechnet. Der Kapitalwert am Ende der Laufzeit gibt den Betrag an, der weniger investiert werden müsste, um die gleichen Erlöse wie bei einer Verzinsung mit dem Kalkulationszinssatz zu erreichen. Ein positiver Kapitalwert sagt somit aus, dass die Investition gegenüber einer Geldanlage mit dem Kalkulationszinssatz wirtschaftlicher ist.

Die Amortisationszeit gibt Aufschluss darüber, nach wie vielen Jahren die Erlöse einer Investition die hierfür notwendigen Kosten ausgeglichen haben. Bei der statischen Amortisationsrechnung umfasst die Amortisationszeit die Zeitspanne, bis die Erlöse die Investition übersteigen. Bei der dynamischen Amortisationsrechnung werden die Erlöse wie bei der Kapitalwertmethode auf die jeweiligen Barwerte zum Zeitpunkt der Investition abgezinnt. Teilt man den Kapitalwert durch den Betrag des Kapitalwertes zu Beginn der Nutzungsdauer, erhält man den spezifischen Kapitalwert. Die Amortisationszeit lässt sich dann als die Zeit, in der der Kapitalwert negativ ist, ablesen /SchTer 97/.

### 3.3.3.3 Interner Zinsfuß

Der interne Zinsfuß ist der Kalkulationszinssatz, bei dem der Barwert am Ende der Laufzeit genau Null betragen würde. Liegt der interne Zinsfuß über dem vom Investor angestrebten Zinssatz, so ist die Investition vorteilhaft. Beachtet werden muss aber, dass es sich nur um die Verzinsung des im Investitionsobjekt gebundenen Kapitals handelt. Dies ist dann unerheblich, wenn die freigesetzten Beträge zum Konsum genutzt werden sollen /SchTer 97/.

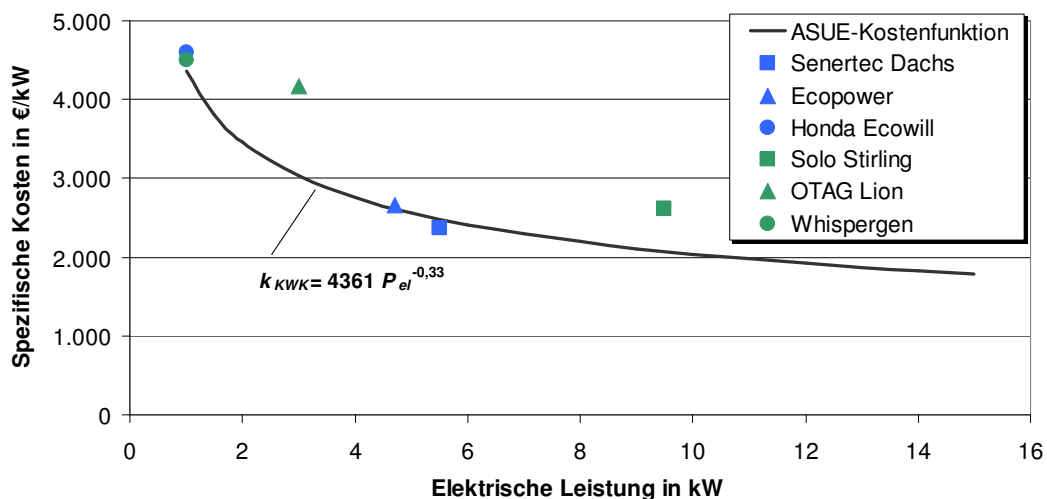


### 3.3.4 Kostenfunktionen

Für die Hauptkomponenten von KWK-Systemen lassen sich spezifische Investitions- und Montagekosten ermitteln, die in Abschnitt 6 bei den KWK-Systemen unterschiedlicher Größe zum Einsatz kommen.

#### Investitionskosten KWK-Anlage

In **Abbildung 3-10** sind die spezifischen Kosten pro  $\text{kW}_{\text{el}}$  (mit Installation, ohne Zusatzkomponenten) von verbrennungsmotorischen KWK-Anlagen über die elektrische Nennleistung bis 15 kW (Grenze der Mikro-KWK) aufgetragen. Für andere KWK-Technologien liegen die Kosten wesentlich höher.



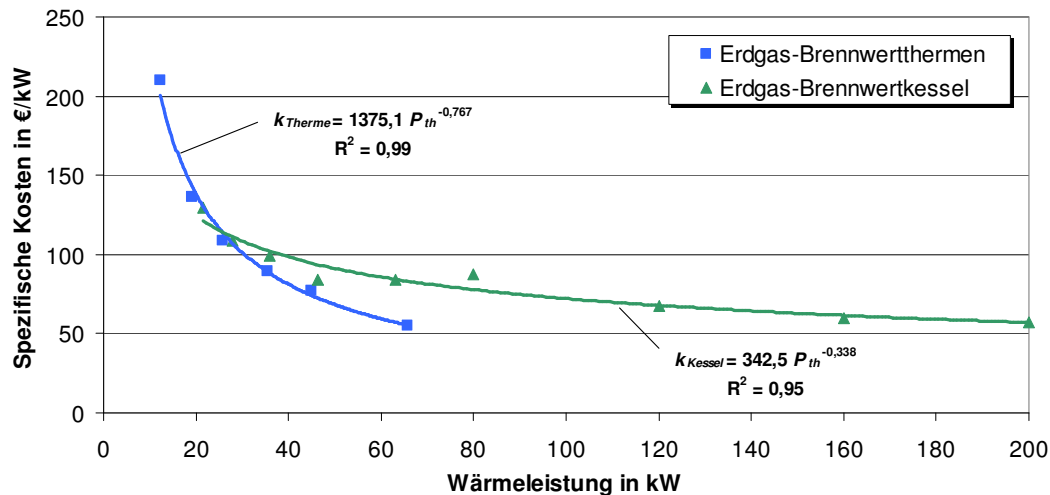
**Abbildung 3-10:** Spezifische Investitionskosten inkl. Installation von KWK-Anlagen  
/ASUE 01, Schr 07/

Deutlich zu erkennen ist der Rückgang der spezifischen Investitionskosten von ca. 4.500 €/kW<sub>el</sub> (1 kW) auf unter 2.000 €/kW<sub>el</sub> bei den größeren Anlagen (10 kW). Jedoch ist eine breite Streuung zu verzeichnen, die auf die unterschiedlichen KWK-Technologien zurückzuführen ist.

#### Investitionskosten Spitzenlastkessel

Für den Einsatz in KWK-Systemen haben sich Erdgas-Brennwertthermen als Spitzenlastkessel bewährt, weil diese aufgrund ihrer Erzeugungscharakteristik schnell und effizient Wärme liefern können.

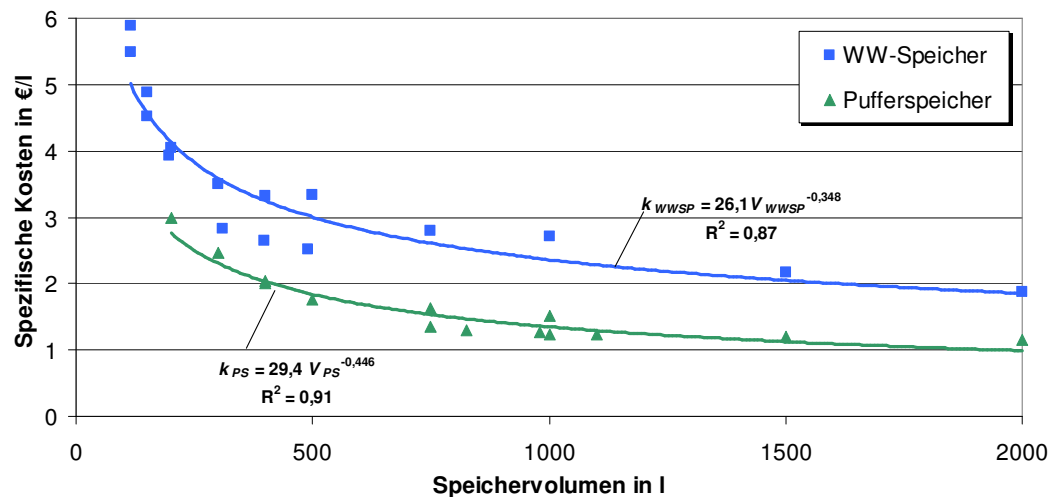
In **Abbildung 3-11** sind die spezifischen Kosten pro kW<sub>th</sub> von Brennwertthermen und -kesseln über die thermische Nennleistung aufgetragen.



**Abbildung 3-11:** Spezifische Investitionskosten von Spitzenlastkesseln /Schr 07/

### Investitionskosten Speicher

Die Kostenfunktion der Wärmespeicher in **Abbildung 3-12** zeigt, dass die spezifischen Kosten der Warmwasserspeicher ungefähr doppelt so hoch sind wie die der Pufferspeicher.



**Abbildung 3-12:** Spezifische Investitionskosten von Speichern /Schr 07/

Dies liegt einerseits an dem internen Heizwendelwärmeübertrager und andererseits an der speziellen Auskleidung der Speicherinnenseiten, die mit Trinkwasser in Berührung kommen. Die Pufferspeicher sind hingegen einbautenfrei und innenseitig roh belassen.

### Sonstige Kosten

Die sonstigen Kosten umfassen die Material- und Arbeitskosten zur Montage der weiteren Komponenten (Installation der KWK-Anlage ist in Abbildung 3-10 enthalten) und der Inbetriebnahme des KWK-Systems. Diese teilen sich in einen festen und einen variablen Bestandteil auf:

$$k_{\text{Montage,KWK}} = 700\text{€} + 11 \frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{th}}} * (P_{\text{th,KWK}} + P_{\text{th,SLK}}) \quad \text{Gleichung 3-9}$$

Dabei ist zu bemerken, dass die mithilfe von Gleichung 3-9 errechneten Montagekosten  $k_{\text{Montage,KWK}}$  nur einen groben Anhaltswert liefern und eine individuelle Kalkulation keineswegs ersetzen.

### 3.4 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen der KWK

Für die Planung und Dimensionierung von KWK-Systemen wurde die Bedarfscharakteristik der zu versorgenden Gebäude analysiert und Kenngrößen entwickelt. Je nach Vorgabe können sehr unterschiedliche KWK-Systeme für die gleichen Versorgungsobjekte geplant und dimensioniert werden.

Zusammenfassend lässt sich zu den beschriebenen Modellen zur Nutzung der Koppelprodukte im Versorgungsobjekt feststellen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb einer KWK-Anlage am ehesten mit dem Betreiber-Modell realisierbar ist. Um das Betreiber-Modell umsetzen zu können, müssen sowohl anschlusstechnische als auch rechtliche und steuerliche Möglichkeiten geprüft werden. In den folgenden Abschnitten wird von der Machbarkeit dieses Modells ausgegangen. Zum Vergleich werden aber auch das Modell mit KWK-Strom-Volleinspeisung sowie das Allgemeinstrom-Modell betrachtet. Die Positionen der verschiedenen Parteien sind in **Tabelle 3-3** aufgeführt und werden in den folgenden Absätzen detailliert erörtert.

Für den Eigentümer, der entsprechend der Besitzverhältnisse eine natürliche oder juristische Person oder eine Wohneigentümergeinschaft (WEG) ist, stellt sich die KWK-Stromnutzung je nach gewähltem Nutzungsmodell sehr unterschiedlich dar. Das Volleinspeisungsmodell ist dann sinnvoll, wenn der Eigentümer seinen Aufwand reduzieren möchte und die Wärmeversorgung an einen Contractor oder Energieversorger vergeben möchte. Das Allgemeinstrom-Modell ist dann wirtschaftlich darstellbar, wenn ein großer Anteil des Allgemeinstroms durch die KWK-Anlage gedeckt werden kann. Folglich kommen nur verhältnismäßig kleine Anlagen zum Einsatz. Die thermische Leistung der KWK-Anlage liegt dann weit unter den in dieser Arbeit vorgegebenen 25 % der Gebäudeauslegungsleistung. Im Betreiber-Modell kann ein wirtschaftlicher Vorteil durch die Vermeidung des Fremdstrombezugs bei einem hohen Anteil des KWK-Stroms am Gesamtstrombedarf im Gebäude erreicht werden. Die Risiken dieses Modells bestehen darin, dass die Nutzer nicht verpflichtet werden können, die KWK-Stromversorgung zu akzeptieren.

Aus der Sicht der Nutzer bzw. Mieter ergeben sich beim Volleinspeisungs- und beim Allgemeinstrom-Modell keine Veränderungen, da die KWK-Stromerzeugung keinen Einfluss auf die jeweiligen Stromlieferverträge der Tarifkunden hat. Das Betreiber-Modell hat jedoch nur Vorteile, wenn sich die Nutzer für die Versorgung mit KWK-Strom entscheiden. Jeder Nutzer, der Tarifkunde bleibt, schmälert die Wirtschaftlichkeit des Betreiber-Modells. Die notwendige Einigkeit der Nutzer bei der Entscheidung für den KWK-Strom stellt ein nicht zu unterschätzendes Risiko für den KWK-Anlagenbetreiber und damit auch ein Markthemmnis dar.

**Tabelle 3-3:** Diskussion der KWK-Strom-Nutzungsmodelle

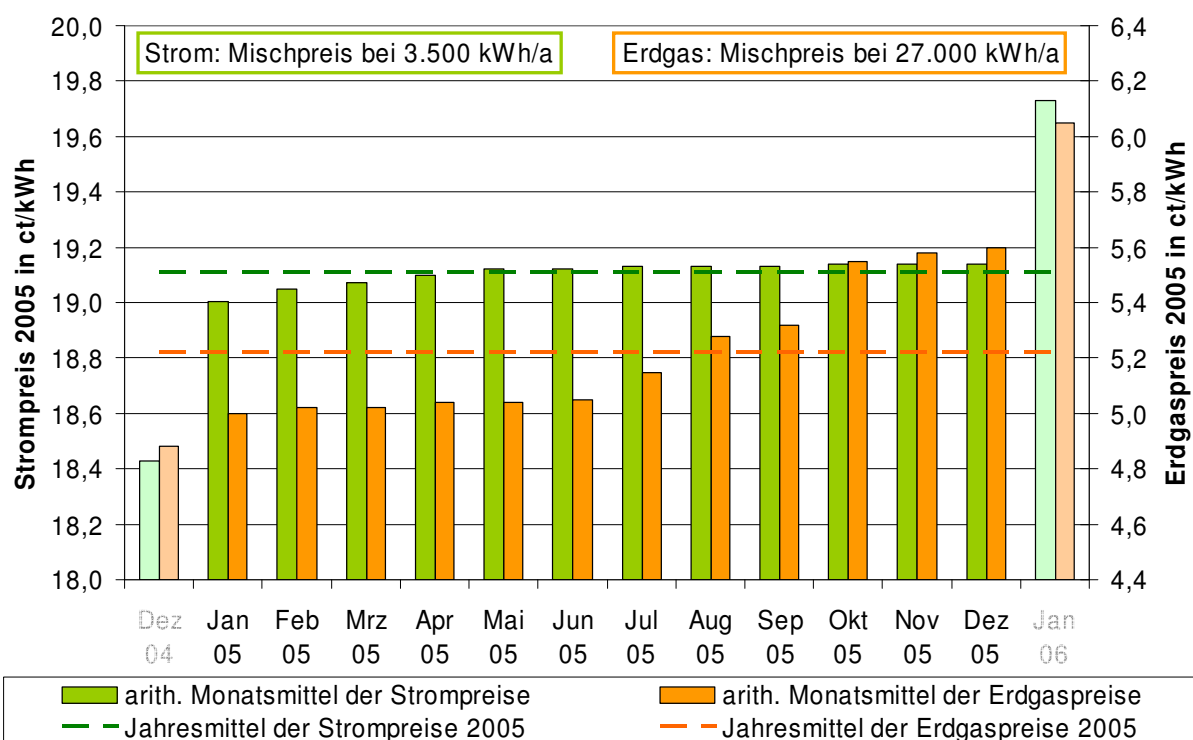
		<b>Volleinspeisungsmodell</b>	<b>Allgemeinstrom-Modell</b>	<b>Betreiber-Modell</b>
<b>Eigentümer / WEG</b>	<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bei Contractor / Versorger als Anlagenbetreiber keine Sorgen mit Heizung</li> <li>• unveränderter Abrechnungsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirtschaftlicher Vorteil ggf. nur bei Auslegung auf den Allgemeinstrombedarf</li> <li>• nahezu unveränderter Abrechnungsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. wirtschaftlicher Vorteil</li> </ul>
	<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. wirtschaftlich nicht darstellbar</li> <li>• höherer Wartungsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. nur verhältnismäßig kleine KWK-Anlage wirtschaftlich darstellbar</li> <li>• höherer Wartungsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höherer Abrechnungs- und Wartungsaufwand</li> <li>• Stromanbieterwechsel der Nutzer senkt Wirtschaftlichkeit</li> </ul>
<b>Nutzer / Mieter</b>	<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. Strompreisanreize</li> </ul>
	<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• freie Stromanbieterwahl ggf. eingeschränkt</li> </ul>
<b>Versorger</b>	<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfluss auf Erzeugungskapazität falls Versorger = Anlagenbetreiber</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfluss auf Erzeugungskapazität falls Versorger = Anlagenbetreiber</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kundenbindung Strom / Erdgas</li> </ul>
	<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. kein Einfluss auf Erzeugungskapazität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. kein Einfluss auf Erzeugungskapazität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringere zu liefernde Strommenge</li> </ul>

Sowohl beim Volleinspeisungs- als auch beim Allgemeinstrom-Modell kann der Energieversorger Einfluss auf die Erzeugungskapazität der KWK-Anlage nehmen, falls er als Anlagenbetreiber auftritt. Sofern es sich beim örtlichen Versorger um ein Energieversorgungsunternehmen handelt, das sowohl über einen Gas- und Stromvertrieb verfügt, kann es beim Betreiber-Modell sowohl vom erhöhten Erdgasabsatz profitieren als auch über die Reststromversorgung langfristig einen Kunden binden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen entwickelt. Dabei werden die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Aspekte aufgegriffen.

Als Eingangsdaten fließen einerseits die energiewirtschaftlichen Kennwerte und Ergebnisse aus den Prüfstandsuntersuchungen bzw. der Simulation und andererseits die mit den Anlagenherstellern abgestimmten Investitions-, Montage- und Wartungskosten ein. Der kalkulatorische Zinssatz beträgt 5 %.

Als Energiepreise werden die Mittelwerte der deutschen Erdgas- und Strompreise für Haushaltskunden des Jahres 2005 angesetzt. Diese wurden aus den vom /BdE 06/ veröffentlichten und in **Abbildung 3-13** dargestellten Mischpreisen (inkl. Grundpreis und Steuer) für Strom- und Erdgas-Haushaltskunden ermittelt.



**Abbildung 3-13:** Mischpreise (inkl. Grundpreis und Steuer) für Strom- und Erdgas-Haushaltskunden im Jahr 2005 /BdE 06/

Da sich die dort angegebenen Preise auf einen Jahresverbrauch von 3.500 kWh Strom bzw. 27.000 kWh Erdgas beziehen, musste eine jeweils übliche Aufteilung auf Basis-, Arbeits- und Leistungskosten gefunden werden. Die in **Tabelle 3-4** aufgeführten Energiekosten fließen als Grunddaten in die Wirtschaftlichkeitsanalysen in Abschnitt 6.2 ein.

**Tabelle 3-4:** Grunddaten der Wirtschaftlichkeitsanalyse (Mittelwerte 2005) /BdE 06, KWKModG, EEX 07/

	Arbeitskosten	Basiskosten	Leistungskosten	Einspeisevergütung
Einheit	ct/kWh	€/Monat	€/(kW·Monat)	ct/kWh
<b>Strom</b>	16,9	6,50	-	KWK-Zuschlag: 5,11 üblicher Preis: 4,59 Komp.-Zahlung: 0,38
<b>Gas</b>	HH-Kunden: 4,3 KWK-Kunden: 3,66	15,00	0,35	-

Von der gesetzlichen Seite<sup>9)</sup> lässt sich sagen, dass besonders das EnWG je nach Auslegung Schwierigkeiten bei der Errichtung einer KWK-Anlage bereiten kann, solange sie nicht der Deckung des Stromeigenbedarfs dienen soll und eine Leistung von 50 kW<sub>el</sub> bzw. 150 kW<sub>el</sub> überschreitet. Einen Beschluss der Bundesnetzagentur oder ein gerichtliches Urteil

<sup>9)</sup> Ausführliche Betrachtung der für die KWK relevanten Gesetze und Verordnungen erfolgt im Anhang 10.5

zur Klärung, welchen Status eine KWK-Anlage in einem Gebäude hat und welche Sachverhalte zu beachten sind, gibt es bislang noch nicht (vgl. Anhang 10.5.1).

Des Weiteren gibt es eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen, in denen die Belange und Eigenschaften der KWK erst noch Berücksichtigung finden müssen. Dazu gehört die Heizkosten-Verordnung, in der geregelt wird, welche Kosten des Heizungsbetriebs von wem zu tragen sind. Aktueller Stand ist, dass die Betriebs- und Verbrauchskosten von den Gebäudenutzern und die Investitionskosten vom Eigentümer getragen werden. Welcher Anteil des Brennstoffverbrauchs einer KWK-Anlage auf die Wärme angerechnet werden kann, ist (noch) nicht berücksichtigt /HeizV/.

Erst wenn die Errichtung von KWK-Anlagen zu einem verwaltungstechnischen Standardvorgang wird, lässt sich ein größerer Anteil des KWK-Potenzials als bisher erschließen. In diesem Zusammenhang steht noch eine Klärung der folgende Punkte aus (detaillierte Ausführungen in /Schr 07/):

- Welche gesetzliche Definition eines elektrischen Versorgungsnetzes liegt bei der Stromversorgung mit einer KWK-Anlage vor?
- Welche Regeln und tariflichen Konditionen gelten beim Netzanschluss für den Reststrombezug beim Betrieb einer KWK-Anlage?
- Wie können die Verbrauchs- und Betriebskosten eines KWK-Systems auf die Gebäudenutzer umgelegt werden?
- Wie können Gebäudenutzer von der Abnahme des KWK-Stroms überzeugt und an sie gebunden werden?

## 4 Entwicklung einer Simulation zur Abbildung von KWK-Systemen

Das Ziel der Simulation ist die Darstellung der dynamischen Vorgänge, die sich aus der Interaktion der einzelnen Elemente des KWK-Systems untereinander und der Reaktion des KWK-Systems auf die Anforderungen aus Heizwärme-, Warmwasser- und ggf. elektrischer Last ergeben. Damit werden zunächst die tatsächlichen Vorgänge in realen KWK-Systemen abgebildet, die in gleicher Systemkonfiguration am KWK-Prüfstand des IfE messtechnisch untersucht wurden. Damit besteht die Möglichkeit, die Simulation anzupassen, zu validieren und zu kalibrieren.

Des Weiteren kann die Simulation Ergebnisse für den Betrieb über ein ganzes Jahr liefern, die zur Überprüfung der aus einzelnen Typtagen hochgerechneten Jahreswerte der Prüfstandsversuche herangezogen werden können. Die Simulationsumgebung Matlab/Simulink hat sich als geeignetes Werkzeug bei der Entwicklung der Simulation erwiesen.

In einem weiteren Schritt werden mithilfe der Simulation Systemveränderungen durchgeführt, was im Vergleich zu Prüfstandsversuchen mit relativ geringem Aufwand möglich ist. Hier sollen Verbesserungen und Optimierungen des Betriebsverhaltens und der Energieeffizienz analysiert werden.

### 4.1 Bestandsaufnahme existierender Simulationen

Die bisher durchgeführten Simulationen von KWK-Systemen (z.B. virtuelles Kraftwerk, FfE in Zusammenarbeit mit der enwi.kon GmbH) beruhen auf „Energiemodellen“. Dabei werden für einen Zeitschritt von einer Stunde die ein- und ausgehenden Energieströme bilanziert. Diese Vorgehensweise lässt eine stationäre Betrachtung der KWK-Systeme zu, liefert aber bei Start- und Stoppvorgängen, die mit kurzzeitig überproportionalen Emissionen und Energiebedarf einhergehen, ein unscharfes Bild. Auch weitere, systeminterne Vorgänge, wie z.B. die Anlagenverschaltung, können mit dieser Herangehensweise nicht dargestellt werden.

**Tabelle 4-1:** Übersicht kommerzieller KWK-Simulationen

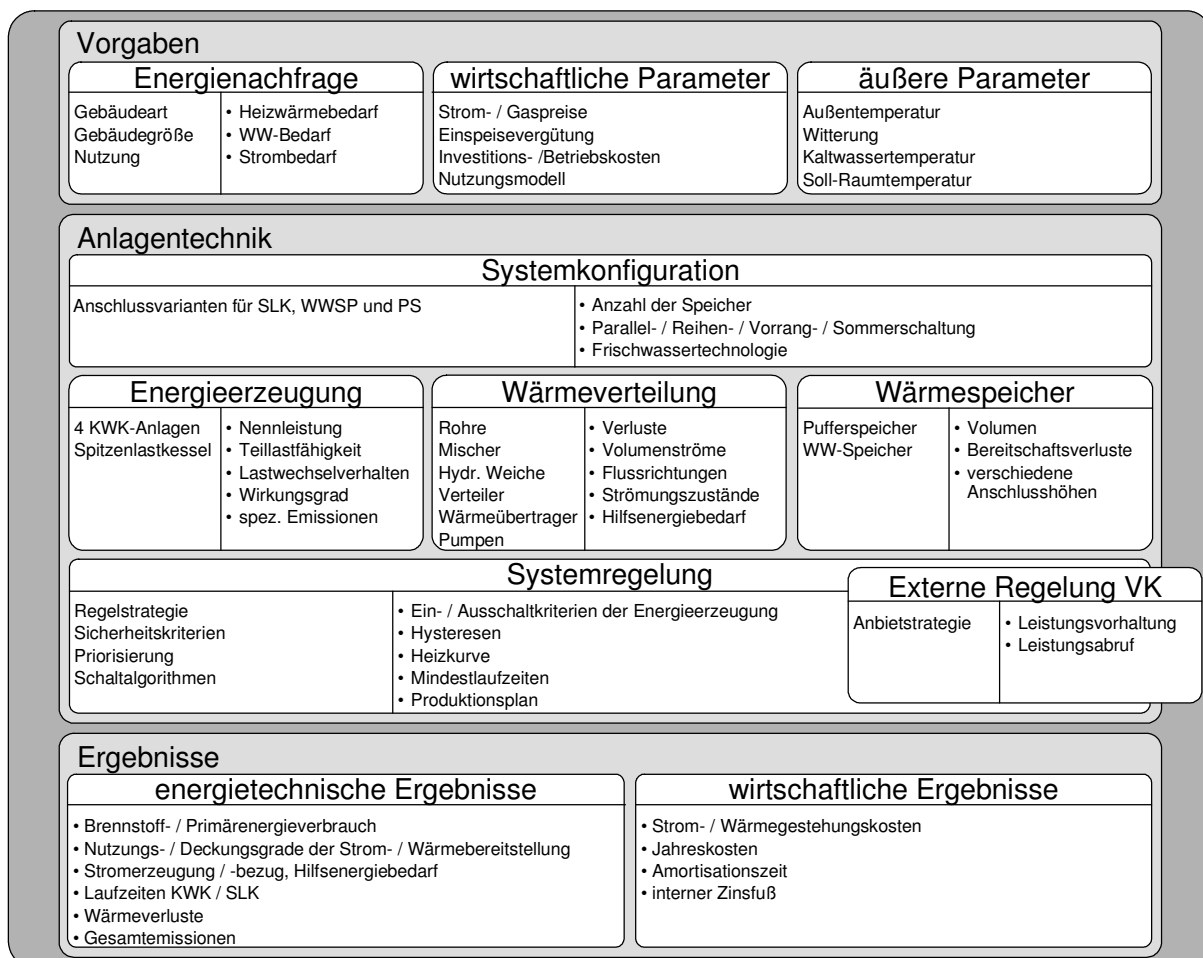
Name	Hersteller	Kurzcharakteristik
miniBHKW-Plan	Steinborn innovative Gebäude-Energieversorgung	MiniBHKW-Plan ermöglicht die Simulation des KWK-Betriebs mit fossilen Brennstoffen, Biogas und Biodiesel. Detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen ergeben eine Grundlage für die Planung und Auslegung des Mini-BHKW.
CHP Sizer	BRECSU, Cardiff University	Software zur Beurteilung des KWK-Einsatzes in Krankenhäusern und Hotels
EUSEBIA	RWTH Aachen, LST für technische Thermodynamik	Instrument zur zuverlässigen, schnellen und kosten-effizienten Analyse, Bewertung und Verbesserung der Energiesituation sowie Identifizierung von energetischen Optimierungspotenzialen in Industriebetrieben, Krankenhäusern, Schulen, öffentlichen Gebäuden etc.

Des Weiteren sind Simulationen von KWK-Systemen auch kommerziell erhältlich. Eine Übersicht zeigt **Tabelle 4-1**. Das relativ verbreitete, von Ingenieurbüros und Energieberatern genutzte Planungsprogramm miniBHKW-Plan liefert Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Planung und Auslegung von Mikro-KWK-Anlagen, berücksichtigt jedoch weder Tageslastgänge noch den Teillastbetrieb der KWK-Anlagen. Die Programme CHP Sizer und EUSEBIA sind für größere Objekte, wie Krankenhäuser und Hotels, konzipiert.

Da jedoch das Hauptaugenmerk bei dieser Arbeit auf der Variation der Anlagenkonfiguration, der Erzeugungsanlagen und insbesondere der Regelungsstrategien liegt, besteht die Notwendigkeit, selbst eine Simulation zu erstellen. Zudem ist bei der Abbildung der Funktionsweise eines KWK-Systems einer selbst entwickelten Simulation, bei der man die Folgen von Veränderungen der Parameter nachvollziehen kann, mehr zu vertrauen.

## 4.2 Simulationselemente

Die Simulation setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen, die einzeln entwickelt werden und über definierte Schnittstellen verfügen. Dadurch ist in den Grenzen des technisch Sinnvollen eine relativ freie Kombinationsmöglichkeit in Bezug auf die Systemkonfiguration gegeben. Generell lassen sich die Elemente der Simulation nach der in **Abbildung 4-1** dargestellten Struktur aufteilen.



**Abbildung 4-1:** Struktur der Simulation



### 4.2.1 Vorgaben und Rahmenbedingungen

Als Vorgaben erhält die Simulation die Energienachfrage, in der das zu versorgende Gebäude hinterlegt ist, die wirtschaftlichen Parameter aus Abschnitt 3.3 sowie äußere Parameter, wohinter sich klimatische Einflüsse und Temperaturvorgaben für Kaltwasser und die Soll-Raumtemperatur verbergen.

#### 4.2.1.1 Energienachfrage - Beschreibung des Gebäudes

Der Simulation werden in Abhängigkeit von der Gebäudegröße und des Dämmstandards die Profile für den Heizwärmebedarf, für die Warmwasserlast und der elektrische Lastgang übergeben. Im Startmenü kann zwischen den Typtagen „Wintertag“, „Übergangstag“ und „Sommertag“ ausgewählt werden. Die einzelnen Tage sind auch zu Wochenlastgängen kombiniert. Des Weiteren sind für die einzelnen Gebäude Jahreslastgänge hinterlegt.

#### Heizsystem im Gebäude

Die skalierbaren Typgebäude verfügen über Heizungssysteme, die über ein zentrales Wärme erzeugungssystem (Heizung bzw. KWK-System) versorgt werden und die Raumwärme- und Warmwasserversorgung sicherstellen. Die Gebäude werden über Zweirohrsysteme und Flachheizkörpern (Radiatoren) beheizt, die auf eine Temperaturpaarung im Vorlauf/Rücklauf von 55/45 °C ausgelegt sind. In der Heizungs- bzw. KWK-Systemsteuerung wird eine Nachtabsenkung von 22:00 bis 6:00 Uhr hinterlegt.

In der Matlab-Funktion „heizen.m“ wird die Wärmeübergabe zwischen dem Heizwasser und dem Gebäude simuliert. Dafür wird das Gebäude als Ein-Schicht-Speicher mit einem Volumen von 500 Litern abgebildet. Damit kann sowohl die Trägheit als auch die Wärmeübertragung des Heizsystems abgebildet werden. In Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur kann nur eine bestimmte thermische Leistung abgegeben werden. Die Richtgröße ist eine maximale thermische Leistung von 60 kW bei einer Temperatur von 55 °C.

#### Warmwassersystem im Gebäude

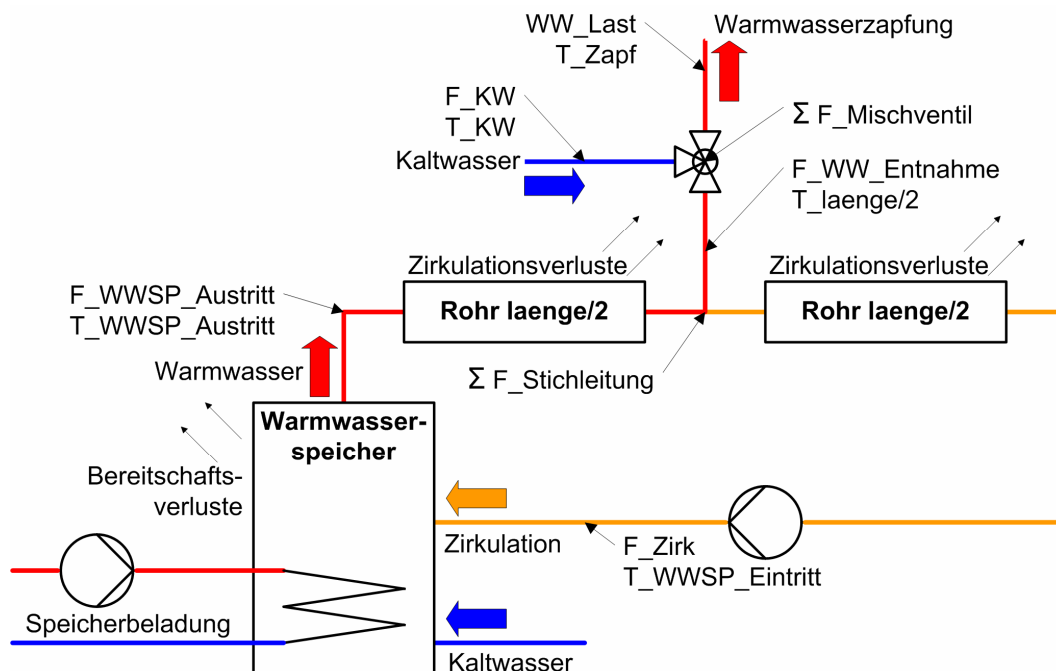
In der Matlab-Funktion „warmwasser.m“ wird die Warmwasserzapfung simuliert. Als Zapfprofil für die Warmwasserseite ist ein für alle Tagtypen gültiger Lastgang hinterlegt. Wie in **Tabelle 4-2** dargestellt, wird dieser Funktion als Parameter nur der Zeitschritt übergeben.

**Tabelle 4-2:** Übergabewerte und Parameter des Warmwassersystems

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	WW_Last	1	abgegebene Nutzenergie WW
2	T_Zirk_Austritt 1.Hälfte	2	F_WW-gezapft
3	F_Zirk_WWSP_Eintritt	3	T_Zirk_Eintritt 2.Hälfte
4	T_Umgebung	4	F_Zirk_Eintritt 1.Hälfte
5	T_Kaltwasser	5	Faktor_Zirkstart
<b>Parameter</b>	d_Rohr, l_Rohr, Zeitschritt, Dämmstandard		

**Abbildung 4-2** zeigt das Warmwassersystem, welches aus den beiden Zirkulationsleitungshälften und der dazwischen liegenden Zapfstelle besteht. Die Rohre haben jeweils die Hälfte der gebäudespezifischen bzw. im Startmenü ausgewählten Länge und werden als Modell mit

5 Schichten abgebildet. Als Eingangswerte sind zunächst die Warmwasserlast als 15-Sekunden-Werte in Liter bei einer Zapfsolltemperatur von 38 °C, die Temperatur bei Austritt aus der ersten Zirkulationsleitungshälfte, der Volumenstrom des Zirkulationsrücklaufs sowie die Umgebungs- und Kaltwassertemperatur bekannt. Aufgrund der Zirkulationsverluste in der ersten Leitungshälfte kann die Wassertemperatur am Abzweig zur Warmwasserzapfung ( $T_{\text{Zirk\_Eintritt 2.Hälfte}}$ ) ermittelt werden. Mithilfe dieser Temperatur wird der Kaltwasserbedarf berechnet, damit sich die Mischtemperatur von 38 °C an der Zapfstelle ergibt. An dieser Stelle gilt Gleichung 4-1. Falls das Wasser kälter als 38 °C ist, wird solange gezapft bis die Zapfsolltemperatur erreicht ist, ohne dass die benötigte Zapfmenge (= Zapfenergie) reduziert wird. Dies simuliert, dass der Nutzer im Gebäude bei Nichterreichen der gewünschten Temperatur das Wasser laufen lässt bis sich die gewünschte Temperatur einstellt. Ist die Temperatur größer als 38 °C wird genau so viel gezapft, dass sich gemäß Gleichung 4-2 als Mischtemperatur mit Kaltwasser (10 °C) eine Zapftemperatur von 38 °C und die gewünschte Zapfmenge ergibt. Gerade bei ausgeschalteter Zirkulation ist der Zapftemperaturverlauf bei Zapfbeginn von Interesse.



**Abbildung 4-2:** Aufbau und Simulationsgrößen des Warmwassersystems

$$\begin{aligned} \sum F_{\text{Stichleitung}} &= 0 \\ \Rightarrow F_{\text{WWSP\_Austritt}} &= F_{\text{WW\_Entnahme}} + F_{\text{Zirk}} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

$$\begin{aligned} \sum F_{\text{Mischventil}} &= 0 \\ \Rightarrow WW_{\text{Last}} &= F_{\text{WW\_Entnahme}} + F_{\text{KW}} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Damit liegt auch der Volumenstrom zur Zapfstelle fest. Der Volumenstrom in der ersten Zirkulationsleitungshälfte setzt sich aus der Warmwasserentnahme und dem Zirkulationsvolumenstrom zusammen. Aufgrund der Verluste kann die Temperatur bei WWSP-Eintritt bestimmt werden.

Die Höhe der Zirkulationsverluste ist von der WWSP-Austrittstemperatur und dem jeweiligen Volumenstrom abhängig. Dabei ist auch die Maßgabe aus /DVGW 551/ einzuhalten, dass die Temperatur des zirkulierenden Wassers um nicht mehr als 5 K gegenüber der Warmwasseraustrittstemperatur am Speicher unterschritten wird.

Am KWK-Prüfstand wird der Zirkulationsstart, bei dem die Rohre noch kalt sind, mit anfänglich erhöhten Verlusten abgebildet. Dies wird in der Simulation durch den Multiplikator der Verluste „Faktor\_Zirkstart“ über die Zirkulationsstartdauer erreicht. Die Summe der Zirkulationsverluste pro Tag kann gut mit den Messergebnissen vom KWK-Prüfstand abgeglichen werden.

In die Berechnung des Systemnutzungsgrades gehen die Warmwasserentnahme zwischen den Zirkulationsleitungshälften und die Kaltwasserzufuhr in den Warmwasserspeicher ein.

### **Elektrischer Strom im Gebäude**

Die Bedarfslastgänge des Gebäudes werden mit den Erzeugungslastgängen der KWK-Anlagen saldiert, sodass sich je nach gewähltem Nutzungsmodell (vgl. Abschnitt 3.3.1) unterschiedliche Reststromlastgänge ergeben. Falls die elektrische Erzeugung der KWK-Anlage über dem Bedarf im betrachteten Gebäude liegt, wird der überschüssige Strom in das allgemeine Netz eingespeist, anderenfalls erfolgt ein Reststrombezug. Diese Beträge müssen getrennt voneinander erfasst werden, da sie mit unterschiedlichen Tarifen bzw. der Einspeisevergütung für KWK-Strom (vgl. Abschnitt 10.5.2) abgerechnet werden.

Das Bedarfsprofil des elektrischen Stroms hat keinen Einfluss auf die Systemsteuerung des KWK-Systems. Da die KWK-Anlagen nicht stromgeführt fahren, dient der elektrische Lastgang ausschließlich der Saldierung der von der KWK-Anlage erzeugten elektrischen Leistung mit dem Bedarf des hinterlegten Gebäudes.

#### **4.2.1.2 Wirtschaftliche Parameter**

Die verschiedenen Energiemengen werden in der Simulation mithilfe von Preisen wirtschaftlich bewertet, die in Abschnitt 3.3.4 erörtert wurden. Die Brennstoffkosten werden anhand des Erdgasbedarfs der KWK-Anlage bzw. des Spitzenlastkessels und des Gaspreises (Arbeitspreis) ermittelt. Für den Reststrombezug werden Tarife von normalen Haushaltskundenverträgen vorausgesetzt. Die Stromrückspeisung wird mit der Einspeisevergütung bewertet.

#### **4.2.1.3 Äußere Parameter**

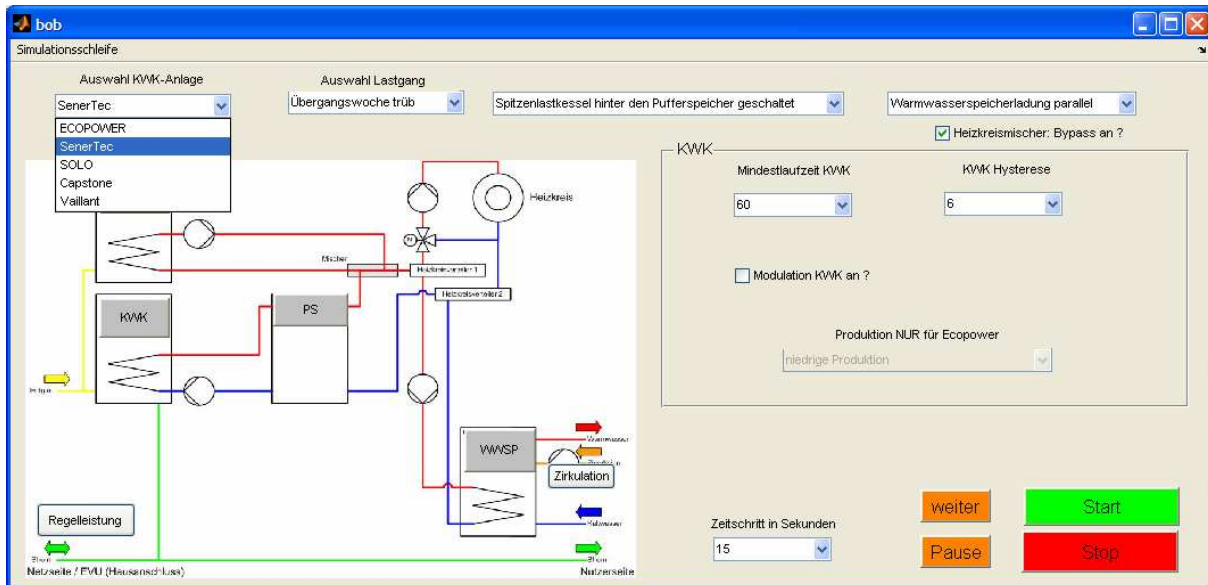
Im Block „Äußere Parameter“ ist das Außentemperaturprofil des jeweiligen, im Startmenü ausgewählten Lastgangs hinterlegt. Des Weiteren ist hier die Raum- (Heizungsraum und Gebäude) und die Kaltwassertemperatur angegeben, welche zum derzeitigen Stand beide konstant auf 20 bzw. 10 °C gehalten werden.

Bei manchen KWK-Systemsteuerungen lassen sich Tagesproduktionspläne vorgeben, in deren Abhängigkeit Regelparameter verändert werden und die in diesem Block eingelesen werden. Soll das KWK-System als Bestandteil eines virtuellen Kraftwerks betrieben werden, ist hier die Schnittstelle zu einer externen Regelung vorgesehen.

#### **4.2.1.4 Startmenü**

Bevor die Simulation gestartet wird, ermöglicht das in **Abbildung 4-3** dargestellte Startmenü „bob“ die übersichtliche Einstellung bzw. Auswahl verschiedener Simulationsparameter. Während der Initialisierung der Simulation wird „bob“ automatisch gestartet.

Die oberste Zeile beinhaltet dabei Pulldown-Menüs zur Auswahl der KWK-Anlage, des thermischen Lastprofils sowie zur hydraulischen Verschaltung. Abhängig von der gewählten KWK-Anlage wird die vom Hersteller vorgegebene hydraulische Verschaltung automatisch ausgewählt. Diese ist jedoch, soweit sinnvoll, vom Benutzer veränderbar.



**Abbildung 4-3:** Startmenü der KWK-Simulation

Zu jeder im Rahmen der Simulation veränderbaren Komponente erscheinen an der entsprechenden Stelle des abgebildeten hydraulischen Schaltschemas folgende Schaltflächen:

- SLK (Spitzenlastkessel)
- KWK (KWK-Anlage)
- PS (Pufferspeicher)
- WWSP (Warmwasserspeicher)
- Zirkulation (Zirkulation im Warmwasserverteilsystem)
- Gebäude (Raumwärmeverbrauchslastgänge)
- Regelleistung (externe Steuerung)

Durch Drücken der Schaltflächen erscheint rechts neben dem hydraulischen Schaltschema ein Panel mit den für die jeweilige Komponente veränderbaren Parametern. Für die aktuelle KWK-Anlage nicht wählbare Parameter werden grau dargestellt.

Im rechten unteren Bereich des Startmenüs sind Schaltflächen zum Einstellen des für die Simulation gültigen Zeitschritts sowie zum Starten und Stoppen der Simulation angeordnet. Nach drücken von „Start“ wird eine Excel-Datei erstellt, in der die eingestellten Parameter gespeichert werden. Hierdurch ist eine Dokumentation für jeden Simulationsdurchlauf möglich.

In der Menüleiste können durch Wählen von „Simulationsschleife“ mehrere Simulationsdurchläufe hintereinander für verschiedene Lastgänge und Regelleistungsvorhaltungsprofile durchgeführt werden. Eine Excel-Datei mit den eingestellten Parametern wird hierbei ebenfalls erstellt.

Zu Beginn der Simulation kann ein fester Zeitschritt gewählt werden. Zwar verfügt Matlab auch über die Funktion des variablen Zeitschritts, der z.B. bei der Messwertverarbeitung nützlich ist. Bei der KWK-Simulation werden jedoch ständig Energiemengen ausgetauscht (Verluste der Speicher etc.), auch wenn augenscheinlich keine Lastanforderung vorliegt. Aus diesem Grund wird der Simulation ein fester Zeitschritt vorgegeben. Bei der Auswahl des Zeitschritts muss ein Kompromiss aus der realistischen Abbildung der dynamischen Vorgänge und einer endlichen Rechenzeit gefunden werden.

#### 4.2.2 Abbildung der Systemkomponenten

Die Anlagentechnik befasst sich mit den Simulationselementen der Energieerzeugung, der temporären Wärmespeicherung sowie weiteren Bauteilen zur Wärmeverteilung. Da es verschiedene Kombinationsmöglichkeiten dieser Anlagentechnikelemente gibt, können zunächst vorgegebene Systemkonfigurationen gewählt werden. Für jede KWK-Anlage ist eine herstellerspezifische Konfiguration inkl. Systemregelung hinterlegt. Soll das KWK-System im Rahmen eines virtuellen Kraftwerks genutzt werden, bietet die externe Regelung die notwendige Zugriffsmöglichkeit, die abhängig von der Stromanbietstrategie die KWK-Anlage an- bzw. ausschaltet.

##### 4.2.2.1 Energieerzeugung

Als Bausteine der Simulation werden verschiedene Erzeugungsanlagen, die in einem KWK-System benötigt werden, betrachtet. Dies sind in erster Linie die KWK-Anlagen mit verschiedenen Technologien aber, auch konventionelle Heizkessel, die als Spitzenlastkessel eingesetzt werden.

#### Kraft-Wärme-Kopplungsanlage

Die KWK-Anlage wird durch den Block „KWK“ in Simulink dargestellt. Über die Auswahl in der grafischen Oberfläche am Anfang kann die zu simulierende Anlage (SenerTec BHKW, Ecopower BHKW, Solo Stirling, Vaillant Brennstoffzelle) ausgewählt werden. Jeder Anlage wird ein Satz Parameter zugeordnet, der Angaben zur Betriebsweise (modulierend, intermittierend), zur elektrischen und thermischen Nennleistung, zum Startverhalten sowie zur Temperaturabhängigkeit der Wirkungsgrade enthält, sodass das Teillastverhalten der KWK-Anlagen abgebildet werden kann. Solange diese Angaben noch nicht für alle Anlagen zur Verfügung stehen, werden für jede Anlage ein thermischer Wirkungsgrad und eine Stromkennzahl als Parameter der Matlab-Funktion „kwk\_slk.m“ übergeben.

**Tabelle 4-3:** Übergabewerte und Parameter der KWK-Anlage

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_PS-KWK	1	T_KWK-PS
2	F_KWK-Pumpe	2	Erdgasverbrauch_KWK
3	Steuersignal	3	Emissionen_KWK
4	Laufzeit_KWK	4	P_el_netto
-	-	5	Zustandssignal_KWK
-	-	6	Q_therm_KWK
<b>Parameter</b>	Anlagentyp (1 für KWK, 2 für SLK)		

Wie in Tabelle 4-3 dargestellt, sind die Eingangsgrößen für die KWK-Anlage der Volumenstrom und die Temperatur des Rücklaufs sowie das Steuersignal (von der Systemsteuerung), welches vorgibt, mit wie viel Prozent der maximalen Leistung die KWK-Anlage arbeiten soll. Bisher ist nur ein einfaches Modell implementiert, in dem sich die thermische Energie aus dem Produkt von Zeitschritt und vorgegebener Leistung ergibt, die dem Heizungswasser hinzugefügt wird. Der Erdgasverbrauch wird über den thermischen Wirkungsgrad berechnet, die erzeugte elektrische Energie über die Stromkennzahl. Sobald die Datenlage bzw. der Kenntnisstand Aussagen über Start- und Stoppvorgänge zulassen, kann die Simulation um diese Punkte schrittweise erweitert werden. Dann kann das elektrische und thermische Startverhalten in Abhängigkeit von der Laufzeit als Übergangsfunktion hinterlegt und das Teillastverhalten beschrieben werden.

### Abgaswärmeübertrager

Die KWK-Anlagen sind i.d.R. mit Schmieröl- und Abgaswärmeübertragern (AWÜ) ausgerüstet, teilweise ist auch der Generator in den internen Kühlkreislauf integriert. Damit lassen sich Abgastemperaturen um ca. 150 °C erreichen.

Mithilfe eines zweiten, extern angebrachten Wärmeübertragers kann eine zusätzliche Energiemenge gewonnen und ein Teil der Kondensationswärme des Abgases genutzt werden. Der thermische Wirkungsgrad lässt sich damit deutlich steigern. Teilweise ist aber bereits der interne Wärmeübertrager für die Abgaskondensation ausgelegt.

### Spitzenlastkessel

Der Spitzenlastkessel (SLK) wird durch den Block „SLK“ in Simulink beschrieben. Er wird über die gleiche Matlab-Funktion (kww\_slk.m) gesteuert wie die KWK-Anlage. Das Steuersignal der Systemsteuerung gibt die benötigte Leistung vor, welche die thermische Energie ergibt, die dem Heizungswasser innerhalb des gewählten Zeitschritts zugeführt werden soll. Über den Wirkungsgrad wird der Erdgasverbrauch berechnet.

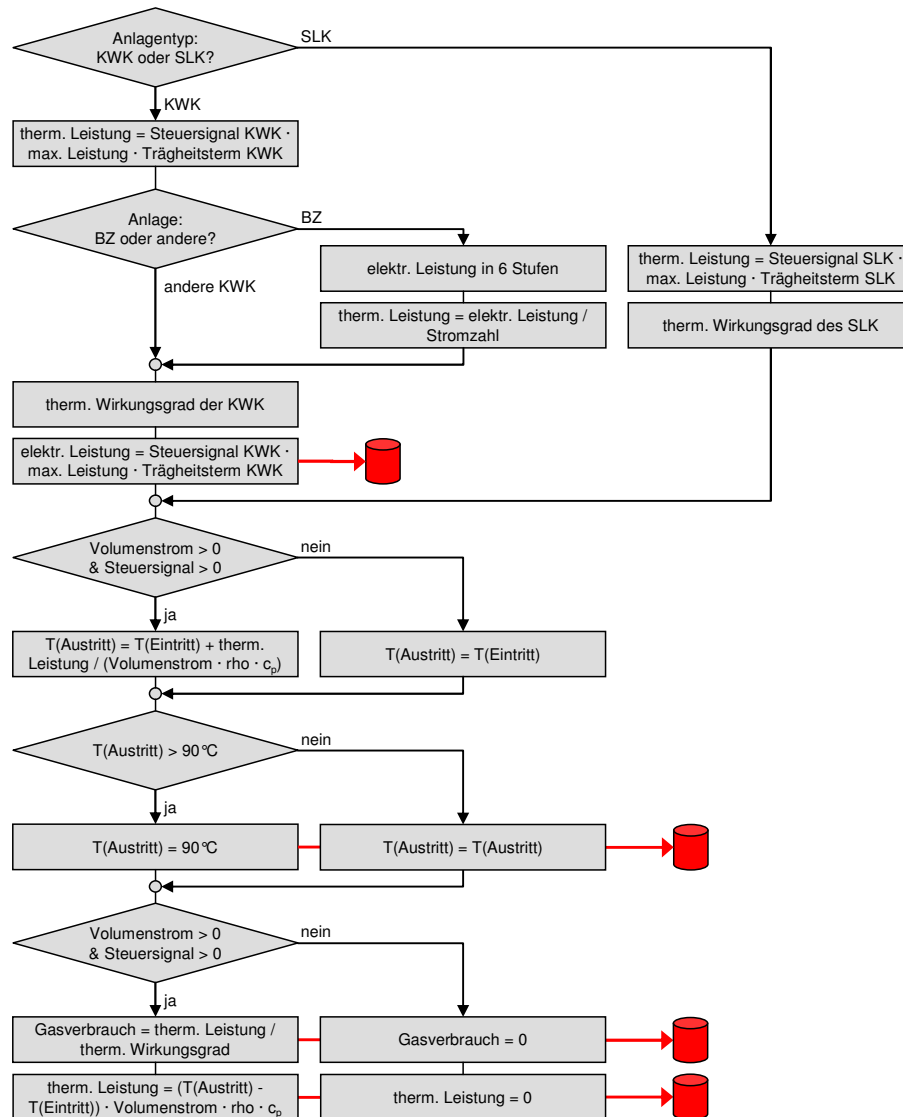
Die Übergabewerte und Parameter des Spitzenlastkessels sind in **Tabelle 4-4** aufgelistet. Auch hier kann die Simulation Start- und Stoppvorgänge berücksichtigen, sobald die Datenlage bzw. der Kenntnisstand Aussagen darüber zulassen. Dann kann das thermische Startverhalten in Abhängigkeit von der Laufzeit als Übergangsfunktion und das Teillastverhalten hinterlegt werden. Da der SLK sowohl parallel als auch hinter dem Pufferspeicher angeschlossen werden kann, gibt es jeweils zwei Temperaturein- und -ausgänge.

**Tabelle 4-4:** Übergabewerte und Parameter des Spitzenlastkessels

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_Mischer-SLK	1	T_SLK-Mischer
2	F_SLK-Pumpe	2	Erdgasverbrauch_SLK
3	Steuersignal	3	Emissionen_SLK
4	T_PS-SLK	4	P_Hilf_SLK
5	Laufzeit_SLK	5	Q_therm_SLK
-	-	6	T_SLK-PS
<b>Parameter</b>	Anlagentyp (1 für KWK, 2 für SLK)		

### Logische Funktionalität der Energieerzeuger

Sowohl die KWK-Anlage als auch der Spitzenlastkessel greifen auf die gleiche Matlab-Funktion „kww\_slk.m“ zu. Die Informationsverarbeitung ist in **Abbildung 4-4** mithilfe eines Flussbildes dargestellt. Die Rauten beschreiben Abfragen, in den Rechtecken werden Funktionen und Anweisungen abgearbeitet. Die roten Trommeln signalisieren, dass an dieser Stelle Werte zurückgegeben werden.



**Abbildung 4-4:** Flussbild der Matlab-Funktion „kww\_slk.m“

Nach der Abfrage, um welchen Energieerzeuger es sich handelt, wird aus dem Steuersignal, der maximalen thermischen Leistung und dem Trägheitsterm, der das Startverhalten beschreibt, die jeweilige thermische Leistung berechnet. Bei den KWK-Anlagen erfolgt nun die Abfrage nach der Brennstoffzelle, die nur bestimmte Leistungsstufen anfahren kann. Dann werden die jeweiligen thermischen Wirkungsgrade eingelesen, um später den Brennstoffverbrauch ermitteln zu können. Bei den KWK-Anlagen wird nun die elektrische Leistung analog zur thermischen Leistung jedoch mit einem für das elektrische Startverhalten gültigen Trägheitsterm berechnet. Im Anschluss wird in Abhängigkeit des Volumenstroms und des Steuersignals die Austrittstemperatur ermittelt und ggf. auf das jeweils zulässige Höchstmaß

begrenzt. Abschließend werden der Gasverbrauch und die aufgrund der zu hohen Austritts-temperatur ggf. reduzierte thermische Leistung berechnet.

#### 4.2.2.2 Wärmespeicher

In der Simulation werden zur Wärmespeicherung sowohl Heizungspufferspeicher als auch Warmwasserspeicher benötigt. Das Modell des Wärmespeichers kann beide Speichertypen abbilden. Es besteht aus zunächst frei gewählten 20 gleichgroßen Schichten, um eine vertikale Temperaturverteilung im Speicher darstellen zu können.

Das Volumen der Speicher kann im Startmenü gewählt werden, zur Auswahl stehen 250, 500, 750 und 1.000 Liter. Weitere Größen können bei Bedarf hinzugefügt werden. Als Option bei der Pufferspeicherauswahl kann ein zweiter, gleichgroßer Speicher angewählt werden. Dabei wird der Speicher als einzelner Speicher mit dem doppelten Volumen dargestellt, jedoch die Konvektion zwischen den mittleren Schichten unterbunden.

#### Warmwasserspeicher

Der Warmwasserspeicher verfügt über einen Heizwendelwärmeübertrager im unteren Bereich des Speichers. Der zugehörigen Matlab-Funktion „Warmwasserspeicher.m“ werden die in **Tabelle 4-5** aufgelisteten Eingangsgrößen, wie die Temperatur des Kaltwassers, des Zirkulationsrückflusses, des Heizwassers, der Umgebung (alle in °C), die Zapfmenge, die Menge des Heizwassers und die Zirkulationsmenge (alle in Liter pro Zeitschritt), zur Verfügung gestellt. In der untersten Schicht wird das Kaltwasser zugeführt, aus der obersten Schicht das Warmwasser und das Zirkulationswasser entnommen. Die Höhe des Zirkulationsrückflusses kann als Parameter vorgegeben werden. Aufgrund der Speichergeometrie und der Aufteilung in 20 Schichten erfolgt dies standardmäßig in der 17. Schicht.

**Tabelle 4-5:** Übergabewerte und Parameter des Warmwasserspeichers 1

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_HKV1-WWSP1	1	T_WWSP1-HKV2
2	F_WW-Pumpe	2	T_WWSP1
3	T_Kaltwasser oder T_WWSP2	3	T_WW oder T_Zirkulation
4	T_Umgebung	4	Verluste_WWSP1
5	Warmwasser-Last	5	Q_therm_gespeichert
6	T_Zirkulation_Rücklauf	6	T_WWSP1-PS
7	F_Zirkulation_Rücklauf	-	-
8	T_PS-WWSP1	-	-
<b>Parameter</b>	Volumen_WWSP, Speicherschicht Temperaturfühler		

Geheizt wird der Speicher durch einen Wärmeübertrager in den untersten drei Schichten. Der Speicherladevorlauf tritt in der dritten Schicht in den Speicher ein. Über die Temperatur-differenz zwischen Heizwasser und der Temperatur der Schicht wird die zum Aufheizen zur Verfügung stehende thermische Energie des Heizwassers berechnet und dann übergeben, sofern sie die Leistung des Wärmeübertragers nicht übersteigt. Beim Übergang zur zweiten bzw. anschließend zur ersten Schicht wird erneut die nun etwas abgekühlte Temperatur des Heizwassers berechnet. Die Wärmeübertragung erfolgt analog zur dritten Schicht.



Die Wärme innerhalb des Speichers wird von Schicht zu Schicht untereinander ausgetauscht. Dieser Vorgang wird über einen Wärmeübertragungskoeffizienten, der als Parameter vorgegeben wird, abgebildet. Dabei wird durch wählbare Parameter berücksichtigt, dass die Übergabe der Wärme von einer höheren in eine tiefere Schicht geringer ist als umgekehrt.

Die Höhe der Bereitschaftsverluste ergibt sich als Summe der Verluste jeder einzelnen Speicherschicht, die abhängig von der jeweiligen Schichttemperatur auch unterschiedlich sind. Die Summe der Bereitschaftsverluste pro Tag kann gut mit Messergebnissen vom KWK-Prüfstand abgeglichen werden.

Der Zapf- und der Zirkulationsvorgang werden ähnlich modelliert. Beim Zapfen wird in der untersten Schicht Kaltwasser zugeführt und eine Mischtemperatur berechnet, bei der Zirkulation wird in der Schicht des Rückflusses eine neue Temperatur berechnet. Dann werden Mengen aus dieser Schicht mit der alten Temperatur vor der Mischung in die nächst höhere gemischt, dies setzt sich immer in der nächst höheren Schicht fort, bis am Ende die Menge, die in den Speicher eingefügt wurde, auch wieder aus der obersten Schicht entnommen wird.

Der Warmwasserspeicher 2 wird analog zum Warmwasserspeicher 1 behandelt. Hier sind jedoch weniger Übergabewerte notwendig und kein Zirkulationsanschluss vorhanden.

### Pufferspeicher

Als Eingangsgrößen dienen dem Pufferspeicher die Temperatur des Heizwassers von der KWK-Anlage, vom SLK und vom Heizkreis (alle in °C) sowie die zugehörigen Durchflussmengen (in Liter pro Zeitschritt). Die Übergabewerte und Parameter des Pufferspeichers sind in **Tabelle 4-6** aufgelistet.

**Tabelle 4-6:** Übergabewerte und Parameter des Pufferspeichers

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_HKV2-PS	1	T_PS-Mischer oder T_PS-HKV1
2	T_KWK-PS	2	T_PS (Fühler in X. Schicht)
3	F_HKV2-PS	3	T_PS-Verteiler oder T_PS-KWK
4	F_KWK-PS	4	Verluste_PS
5	T_Umgebung	5	Q_therm_gespeichert
6	F_SLK-PS	6	T_PS-SLK
7	T_SLK-PS	7	T_PS_mitte
8	T_WWSP1-PS	8	T_PS_oben
9	F_WWSP1-PS	9	T_PS-WWSP1
<b>Parameter</b>	Volumen_PS, Speicherschicht Temperaturfühler		

Ist der SLK parallel zum Pufferspeicher geschaltet, dann werden sowohl das Heizwasser des SLK als auch das der KWK-Anlage dem Pufferspeicher zugeführt, anderenfalls heizt nur die KWK-Anlage den Pufferspeicher auf. Als Option kann der Warmwasserspeicher direkt an den Pufferspeicher angeschlossen werden. Dadurch kann es im Pufferspeicher bis zu vier Durchtausch-Kreisläufe geben, die in verschiedene Richtungen laufen. Des Weiteren

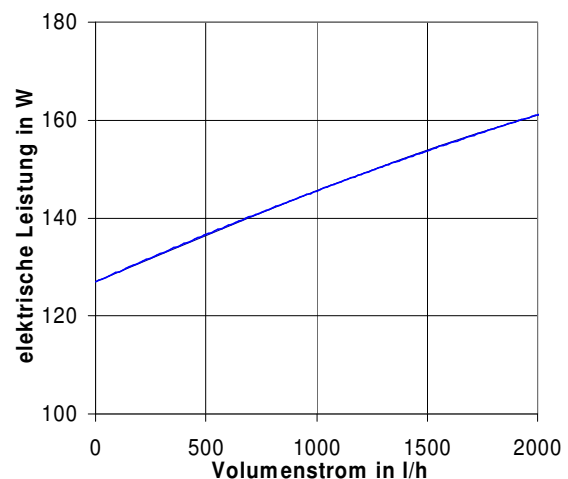
kann je nach Anlagentyp die Anschlusshöhe der einzelnen Kreisläufe vorgegeben werden. Ansonsten wird auf den gleichen Algorithmus wie beim Warmwasserspeicher zugegriffen.

#### 4.2.2.3 Wärmeverteilung

Um die Elemente der Energieerzeugung und Wärmespeicherung miteinander verbinden zu können sind in der Simulation eine Reihe von Modellen für die Wärmeverteilung hinterlegt. Dazu gehören neben den Pumpen und Rohrleitungen auch Misch- und Verteilventile sowie hydraulische Weichen.

#### Pumpen

Die fünf Pumpen (KWK, SLK, Warmwasserspeicherladung, Heizkreis, Zirkulation) werden nach dem gleichen Prinzip gesteuert. Bei geregelten Pumpen wird von der Systemsteuerung ein Signal vorgegeben, mit welchem Anteil (Faktor z.B. von 0,3 bis 1) ihrer nominellen Pumpleistung die Pumpen betrieben werden sollen. Bei ungeregelten Pumpen bleibt das Signal bei 1. Die maximale Leistung kann bei jeder Pumpe als Parameter eingestellt werden. Mithilfe der beispielhaft in **Abbildung 4-5** hinterlegten Pumpenkennlinie kann über den Zeitschritt berechnet werden, welches Wasservolumen in einem Zeitschritt gepumpt wird und welche elektrische Leistungsaufnahme dafür notwendig ist.



**Abbildung 4-5:** Beispielhafte Darstellung einer Pumpenkennlinie

Die Übergabewerte und Parameter der Pumpen sind in **Tabelle 4-7** aufgelistet. Der Volumenstrom wird an die betreffenden Elemente weitergegeben; die elektrische Leistung wird bei der Hilfsenergie des Systems berücksichtigt.

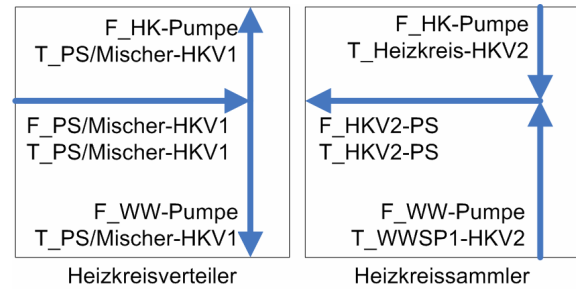
**Tabelle 4-7:** Übergabewerte und Parameter der Pumpen

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	Steuersignal	1	F_Pumpe
-	-	2	P_el_Pumpe
Parameter	Zeitschritt, max. Volumenstrom		

#### Heizkreisverteiler und -sammler

Für die Funktion des Heizkreisverteilers muss die Art der Warmwasserspeicherbeladung bekannt sein. Bei der Speichervorrangschaltung wird der vom Pufferspeicher bzw. Mischer kommende Volumenstrom an den Heizkreis oder den Warmwasserspeicher weitergegeben. Bei parallelem Betrieb des Heizkreises und gleichzeitiger Beladung des Warmwasserspeichers teilt sich der Volumenstrom entsprechend der Durchflüsse in zwei Teilströme auf (vgl. **Abbildung 4-6**).

Der Heizkreissammler nach dem Heizkreis leitet in Abhängigkeit vom Betrieb der Heizkreis- bzw. Warmwasserspeicherladepumpe entweder die Temperatur und den Volumenstrom aus dem Heizkreis (HK-Pumpe = ein) oder aus dem Warmwasserspeicher (HK-Pumpe = aus) an den Pufferspeicher zurück. Bei Parallelbetrieb ergibt sich eine Mischtemperatur aus Heizkreis- und Warmwasserspeicherladerücklauf. Die Übergabewerte und Parameter werden in **Tabelle 4-8** exemplarisch für den Heizkreissammler aufgelistet.



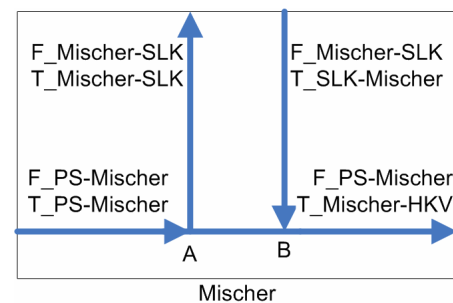
**Abbildung 4-6:** Durchflüsse und Temperaturen im Heizkreisverteiler und -sammler

**Tabelle 4-8:** Übergabewerte und Parameter des Heizkreissammlers

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_Heizkreis-HKV2	1	T_HKV2-PS
2	F_Heizkreis-HKV2	2	F_HKV2-PS
3	T_WWSP1-HKV2	-	-
4	F_WWSP1-HKV2	-	-
Parameter	WWSP_Anschluss		

### Mischer

Der Mischer ist ein Teilstück der Rohrverbindung zwischen dem Pufferspeicher und dem Heizkreisverteiler, der benötigt wird, wenn der SLK nicht parallel zum Pufferspeicher geschaltet ist. Wie in Abbildung 4-7 dargestellt entnimmt der SLK bei A einen Teilstrom  $F_{\text{Mischer-SLK}}$  aus dem Pufferspeichervorlauf  $F_{\text{PS-Mischer}}$  und heizt diesen auf. Wenn der Teilstrom  $F_{\text{Mischer-SLK}}$  größer als der Pufferspeichervorlauf  $F_{\text{PS-Mischer}}$  ist, ergibt sich ein Volumenstrom von B nach A.



**Abbildung 4-7:** Durchflüsse und Temperaturen im Mischer

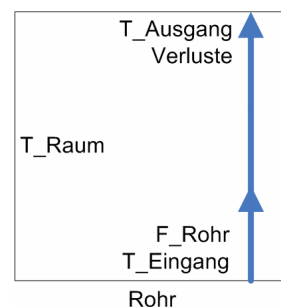
In Abhängigkeit davon wird die Mischtemperatur berechnet, die sich aus den Temperaturen des Heizwassers aus dem Pufferspeicher ( $T_{\text{PS-Mischer}}$ ) und des Heizwassers aus dem SLK ( $T_{\text{SLK-Mischer}}$ ) ergeben. Anderenfalls ( $F_{\text{Mischer-SLK}}$  kleiner  $F_{\text{PS-Mischer}}$ ) bleibt ein Volumenstrom von A nach B. Die Übergabewerte und Parameter des Mixers sind in **Tabelle 4-9** aufgelistet.

**Tabelle 4-9:** Übergabewerte und Parameter des Mischers

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	F_PS-Mischer	1	T_Mischer-HKV
2	F_SLK-Mischer	2	T_Mischer-SLK
3	T_PS-Mischer	-	-
4	T_SLK-Mischer	-	-
<b>Parameter</b>	SLK_Anschluss_Typ		

## Rohre

Die einzelnen Elemente des KWK-Systems sind in der KWK-Simulation durch die in **Abbildung 4-8** dargestellten Rohre verbunden, über die im Betrieb mit durchströmendem Wasser und im Stillstand Verluste auftreten. Sowohl im ersten als auch im zweiten Zustand entstehen Verluste aufgrund des Temperaturunterschieds zum umgebenden Raum. Wie in **Tabelle 4-10** dargestellt sind die übergebenen Parameter der Durchmesser und die Länge des Rohres (beide werden aus der Datei „rohrlaengen.m“ ausgelesen) sowie der Zeitschritt und der Dämmstandard, die beide im Startmenü ausgewählt werden können.

**Abbildung 4-8:** Durchflüsse und Temperaturen im Rohr**Tabelle 4-10:** Übergabewerte und Parameter der Rohre

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_Eingang	1	T_Ausgang
2	F_Rohr	2	Verluste_Rohr
3	T_Umgebung	-	-
<b>Parameter</b>	d_Rohr, l_Rohr, Zeitschritt, Dämmstandard		

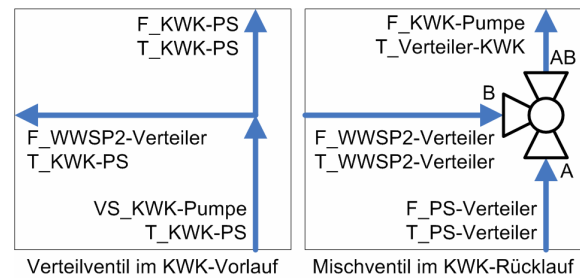
## Verteilventil zum Anschluss des zweiten Warmwasserspeichers

In der Simulation kann ein zweiter Warmwasserspeicher ausgewählt werden, der die Funktion eines Vorspeichers hat. Dieser wird geladen, wenn die Rücklauftemperatur zur KWK-Anlage einen bestimmten Wert übersteigt. Dabei wird, wie in **Abbildung 4-9** schematisch dargestellt, dem KWK-Vorlauf ein Teilvolumenstrom entzogen, der für die Beheizung des Vorspeichers genutzt wird und anschließend dem KWK-Rücklauf über ein Mischventil zugeführt wird.

Das Mischventil erhält vom Schaltsystem ein Steuersignal zwischen 0 und 1. Bei 0 (Durchgang B-AB) wird die Leistung der KWK-Anlage ausschließlich dem zweiten Warm-

wasserspeicher zugeführt, bei 1 (Durchgang A-AB) wird der zweite Warmwasserspeicher nicht beladen.

Entsprechend der Mischventilstellung ergibt sich im KWK-Rücklauf eine Mischtemperatur aus den Teilvolumenströmen und den dazu gehörenden Temperaturen. Der Volumenstrom von der KWK-Anlage zum Pufferspeicher bzw. der hydraulischen Weiche ergibt sich aus der Differenz von Volumenstrom der KWK-Pumpe und Speicherladevolumenstrom. Die Regelgröße für die Stellung des Verteilventils ist die Temperatur  $T_{\text{Verteiler-KWK}}$ . Die Übergabewerte und Parameter des Verteilventils sind in **Tabelle 4-11** aufgelistet.



**Abbildung 4-9:** Durchflüsse und Temperaturen der Verteil- und Mischventile

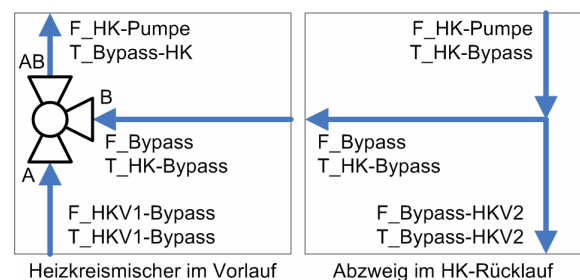
**Tabelle 4-11:** Übergabewerte und Parameter des Verteilventils

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	$T_{\text{PS-Verteiler}}$	1	$T_{\text{Verteiler-KWK}}$
2	$F_{\text{KWK-Pumpe}}$	2	$F_{\text{PS-Verteiler}}$
3	Steuersignal Verteiler	3	$F_{\text{WWSP2-Verteiler-}}$
4	$T_{\text{WWSP2-Verteiler}}$	4	$F_{\text{KWK-PS}}$
<b>Parameter</b>	zweiter WWSP		

### Heizkreismischer

Mithilfe des in **Abbildung 4-10** schematisch dargestellten Heizkreismischers, der vor dem eigentlichen Heizkreis des Gebäudes installiert ist, kann die gewünschte bzw. von der Heizkurve vorgegebene Temperatur des Heizkreisvorlaufs in gewissen Grenzen beeinflusst werden.

Im normalen Heizbetrieb ist der Heizkreismischer nicht in Funktion. Er leitet den Volumenstrom vom Heizkreisverteiler zum Heizkreis des Gebäudes (Stellung A-AB).



**Abbildung 4-10:** Durchflüsse und Temperaturen des Heizkreismischers

Bei Parallelbetrieb, d.h. der gleichzeitigen Deckung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs, kann aufgrund der Warmwasseranforderung eine höhere Solltemperatur im Heizkreisverteiler vorgegeben sein als die Temperatur der Heizkurve. Damit die Heizkreisvorlauftemperatur nicht ein unnötig hohes Niveau erreicht, wird über den Heizkreismischer B-AB ein kälterer Teilstrom aus dem Heizkreisrücklauf beigemischt, sodass sich die Heizkurvensolltemperatur im Heizkreisvorlauf ergibt. Bei einer Beladung des Warmwasserspeichers ohne gleichzeitigen Heizbetrieb kann der Heizkreismischer in Stellung B-AB mit Hilfe der Heizkreis-Pumpe den Wasserinhalt des gesamten Heizkreises im Gebäude umwälzen, sodass einem Auskühlen des Gebäudes während der Warmwasserspeicherladung entgegen ge-

wirkt werden könnte. Die Übergabewerte und Parameter des Heizkreismischers sind in **Tabelle 4-12** aufgelistet.

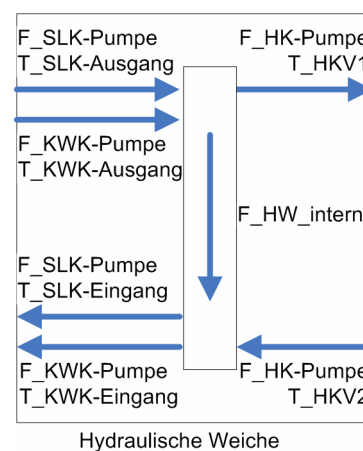
**Tabelle 4-12:** Übergabewerte und Parameter des Heizkreismischers

Eingang	Werte	Ausgang	Werte
1	T_HKV1-Bypass	1	T_Bypass-HK
2	T_HK-Bypass	2	T_Bypass-HKV2
3	F_HK-Pumpe	3	F_PS-HKV2
4	Steuersignal Bypass	-	-

### Hydraulische Weiche

Bei heizungstechnischen Anlagen muss i.d.R. eine Entkopplung der einzelnen, von jeweils eigenen Umwälzpumpen betriebenen Heiz- und Wärmeerzeugerkreise erfolgen. Dies kann beispielsweise mithilfe eines Pufferspeichers oder einer hydraulischen Weichen bewerkstelligt werden.

In einer Variante des KWK-Systemschemas ist anstelle des Pufferspeichers eine hydraulische Weiche mit sechs Anschlüssen vorgesehen. Dies sind jeweils Vor- und Rücklauf der KWK-Anlage, des SLK und des Heizkreises. In der Simulation wird die hydraulische Weiche als Pufferspeicher ohne Volumen und ohne Temperaturschichtung abgebildet.



**Abbildung 4-11:** Durchflüsse und Temperaturen der hydraulischen Weiche

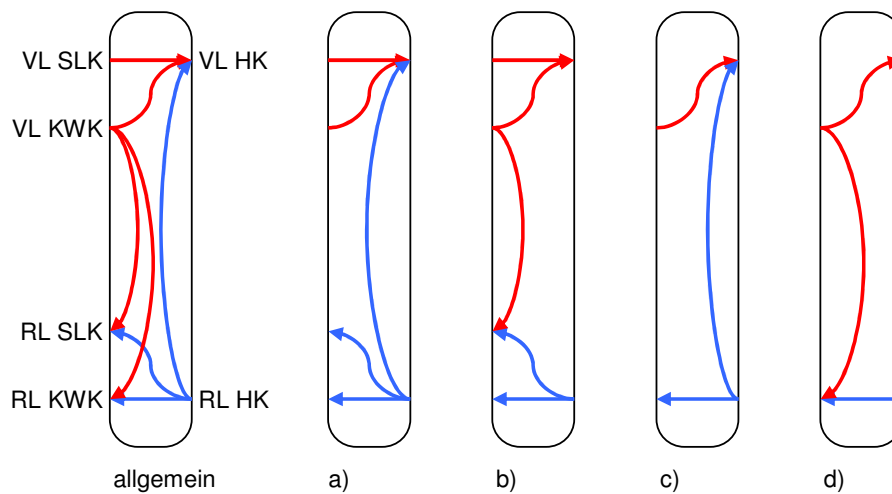
Durch die geometrische Anordnung der Zu- und Abläufe, die in **Abbildung 4-11** angedeutet ist, werden die einzelnen Volumenströme in günstiger Weise verteilt und zusammengeführt. Innerhalb der hydraulischen Weiche wird nur dann eine Wassermenge ausgetauscht, wenn die Bilanz von zuströmendem und abfließendem Wasser oben oder unten unausgeglichen ist.

In **Abbildung 4-12** werden die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt, wie sich die Volumenströme in der hydraulischen Weiche ausbilden können. Im allgemeinen Schema sind die Anschlüsse gekennzeichnet.

Bei a) ist der Volumenstrom im Heizkreis größer als die Volumenströme von KWK-Anlage und SLK zusammen. So werden diese beiden Volumenströme komplett in den Heizkreis aufgenommen und der Rest aus dem zurückströmenden Heizkreiswasser selbst gedeckt. Das restliche zurückströmende Heizkreiswasser wird auf die KWK-Anlage und den SKL aufgeteilt.

In b) herrscht im Heizkreis ein kleinerer Volumenstrom als der von den Erzeugungseinheiten. Der Volumenstrom des SLK wird komplett in den Heizkreis aufgenommen und der Rest durch einen Teil des KWK-Volumenstromes gedeckt. Der verbleibende Teil wird zusammen

mit einem Teil des Heizkreiswassers dem SLK wieder zugeführt, die KWK-Anlage erhält den Rest des Heizkreisvolumenstromes. So dient die KWK-Anlage in dieser Konstellation dem SLK zur Anhebung der Rücklauftemperatur.



**Abbildung 4-12:** Darstellung der verschiedenen Volumenströme in der hydraulischen Weiche

In c) ist der alleinige KWK-Betrieb bei größerem Heizkreisvolumenstrom dargestellt. Der KWK-Volumenstrom wird komplett vom Heizkreis aufgenommen. Ein Teil des aus dem Heizkreis zurückströmenden Wassers fließt direkt wieder in den Heizkreis.

In d) ist der KWK-Volumenstrom größer als der im Heizkreis. Dadurch gelangt ein Teil des KWK-Volumenstromes über die hydraulische Weiche direkt wieder in den KWK-Kreis und dient somit der Rücklauftemperaturerhöhung, wodurch die KWK-Anlage ggf. mit reduzierter Leistung betrieben werden kann.

Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich Volumenströme und die dazugehörigen Mischtemperaturen, die in der Simulation errechnet werden.

#### 4.2.3 Systemregelung

Das Schaltsystem enthält die herstellereigenen Systemsteuerungen, die teilweise ganz unterschiedlichen Regelungsstrategien folgen. Anhand verschiedener Systemparameter werden die Energieerzeuger und die Elemente der Wärmeverteilung gesteuert. Als Entscheidungsgrundlage werden folgende Informationen zur Verfügung gestellt:

- die Temperatur des Warmwasserspeichers und des Pufferspeichers (Höhe des Temperaturfühlers kann bei beiden als Parameter gewählt werden);
- die Austrittstemperatur des Pufferspeichers zum Mischer;
- die Austrittstemperatur vom Mischer zum Heizkreis;
- die Austrittstemperatur vom SLK zum Mischer;
- die Austrittstemperatur von der KWK-Anlage zum Pufferspeicher;
- die Außentemperatur;
- die Temperaturen des Heizwassers vor und nach dem Heizkreis im Gebäude sowie der Volumenstrom im HK;
- die Zustandssignale der Pumpen und Wärmeerzeuger.

#### 4.2.3.1 Standard-Schaltalgorithmen

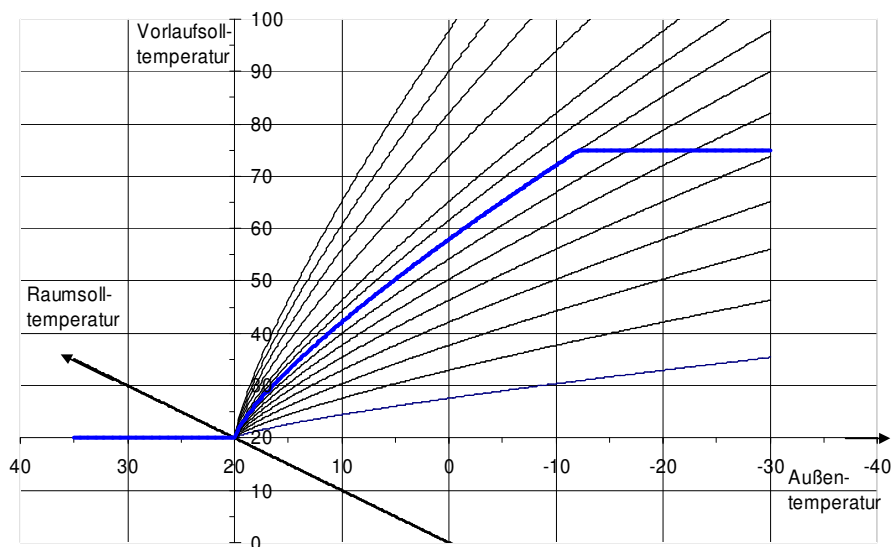
##### Heizkurven

Die Heizkurven geben den Sollwert der Vorlauftemperatur des Gebäudes vor. Je nach Hersteller ist die hinterlegte Heizkurve linear oder polynomisch.

Die lineare Heizkurve definiert sich über die Heizgrenztemperatur HGT, die normalerweise bei 20 °C liegt, die Außentemperatur  $T_{\text{außen}}$  und die Steigung  $m$  (standardmäßig 1,5):

$$T_{\text{soll\_Heizkurve}} = \text{HGT} + m * (\text{HGT} - T_{\text{außen}}) \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Die Beschreibung der Abhängigkeit der Vorlauftemperatur von der Außentemperatur mittels polynomischer Heizkurven liegt im Know-how der Hersteller. Des Weiteren können beide Heizkurventypen am oberen und unteren Ende beschränkt werden oder die gesamte Heizkurve durch ein Offset nach oben oder unten verschoben werden. **Abbildung 4-13** zeigt eine polynomische Heizkurve mit oberer Beschränkung bei 75 °C.



**Abbildung 4-13:** Polynomisches Heizkurvendiagramm

##### Sicherheitsabschaltung

Die KWK-Anlagen und der SLK besitzen eine Sicherheitsabschaltung, die bei Überschreiten von Grenztemperaturen im Vorlauf die Anlagen zum Schutz der Betriebssicherheit abschalten. Vorgegeben sind für die KWK-Anlagen je nach Hersteller Werte von 70 °C (Brennstoffzelle), 83 °C (SenerTec) bzw. 94 °C (Ecopower), für den SLK gelten 85 °C. Die KWK-Anlagen werden darüber hinaus auch ausgeschaltet, wenn die Temperatur des Rücklaufs eine bestimmte Temperatur übersteigt.

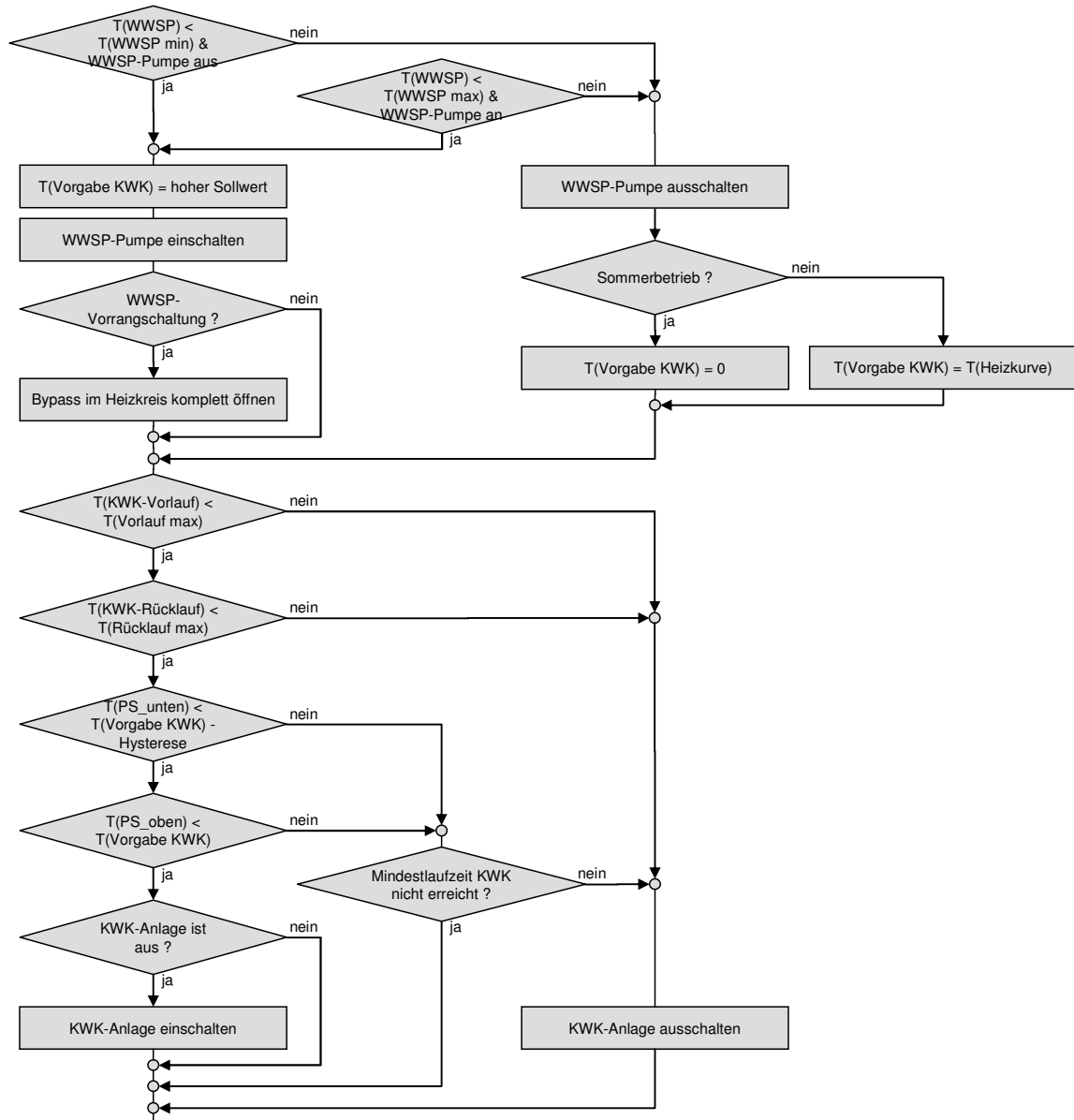
##### Mindestlaufzeit

Sowohl der KWK-Anlage als auch dem SLK können Mindestlaufzeiten vorgegeben werden. Die KWK-Anlage läuft standardmäßig mindestens 60 Minuten, dem SLK wird normalerweise keine Mindestlaufzeit vorgeschrieben. Sollten während der Mindestlaufzeit sicherheitsrelevante Maximaltemperaturen überschritten werden, erfolgt eine sofortige Abschaltung.



### Einschaltkriterien der KWK Anlage

Bei der KWK-Anlage gibt es mehrere Kriterien, die zum Starten führen. Zuvor muss erst ermittelt werden, welche Solltemperatur für die KWK-Anlage gilt. Dieser wird im Heizbetrieb, sofern kein Sommerbetrieb (Solltemperatur 0 °C, kein Heizbetrieb) vorherrscht, von der Heizkurve oder beim Laden des Warmwasserspeichers als hoher Sollwert (z.B. 65 °C) vorgegeben.



**Abbildung 4-14:** Flussbild der Temperaturvorgabe und der Startbedingungen der KWK-Anlage

Die KWK-Anlage wird entweder eingeschaltet, wenn die Temperatur des unteren Temperatursensors im Pufferspeicher (auf ca. 1/3 der Höhe) unter die entsprechende Solltemperatur abzüglich einer veränderbaren Hysterese von z.B. 6 K fällt oder als Option eine elektrische Lastanforderung von außen vorgegeben wird. In **Abbildung 4-14** sind die Abfragen und Bedingungen für die Temperaturvorgabe und die Startbedingungen der KWK-Anlage als Flussbild dargestellt.

### Ausschaltkriterien der KWK-Anlage

Die KWK-Anlage bleibt so lange in Betrieb, bis sowohl am oberen als auch am unteren Temperaturfühler des Pufferspeichers die entsprechende Solltemperatur erreicht wird. Sollte die Mindestlaufzeit noch nicht erreicht worden sein, läuft die KWK-Anlage unter der Voraussetzung, dass die Sicherheitskriterien eingehalten werden, bis zum Erreichen der Mindestlaufzeit weiter. Die Abschaltkriterien müssten für eine Mindestzeit von einer Minute vorliegen, bevor die KWK-Anlage wirklich ausschaltet. Dies soll verhindern, dass kurzfristige Schwankungen im Heizsystem zu einem verfrühten Ausschalten der Anlage und damit zu unnötigem Takten führen.

### Modulation der KWK-Anlage

Je nach Hersteller kann die KWK-Anlage ihre Leistung dem Bedarf anpassen. Diese Modulation wird i.d.R. wie in **Abbildung 4-15** dargestellt realisiert.

Als Regelgröße dient die in Abbildung 4-14 ermittelte Solltemperatur (mit zugehörigem Volumen in diesem Zeitschritt in Liter). Durch die Differenz von Soll- und Ist-Temperatur wird die benötigte thermische Leistung berechnet, um diese Solltemperatur zu erreichen. Als Signal gibt dann die Systemsteuerung den Prozentwert der Maximalleistung der KWK-Anlage aus, welcher dieser benötigten Leistung entspricht. Sollte die benötigte Leistung größer als die Maximalleistung sein, wird als Signal die volle Leistung gefordert. Sollte eine geringere Leistung als die Minimalleistung nötig sein, erfolgt die Abfrage, ob ggf. ein zweiter WWSP vorhanden ist. Mithilfe der minimalen und erforderlichen Leistung kann die Stellung des Verteilers, über den der zweite WWSP beladen wird, errechnet werden. Es wird die Minimalleistung gefahren bis einerseits die Ist-Temperatur über die Solltemperatur steigt und andererseits die Mindestlaufzeit erreicht wurde. Erst dann erfolgt das Ausschalten der KWK-Anlage.

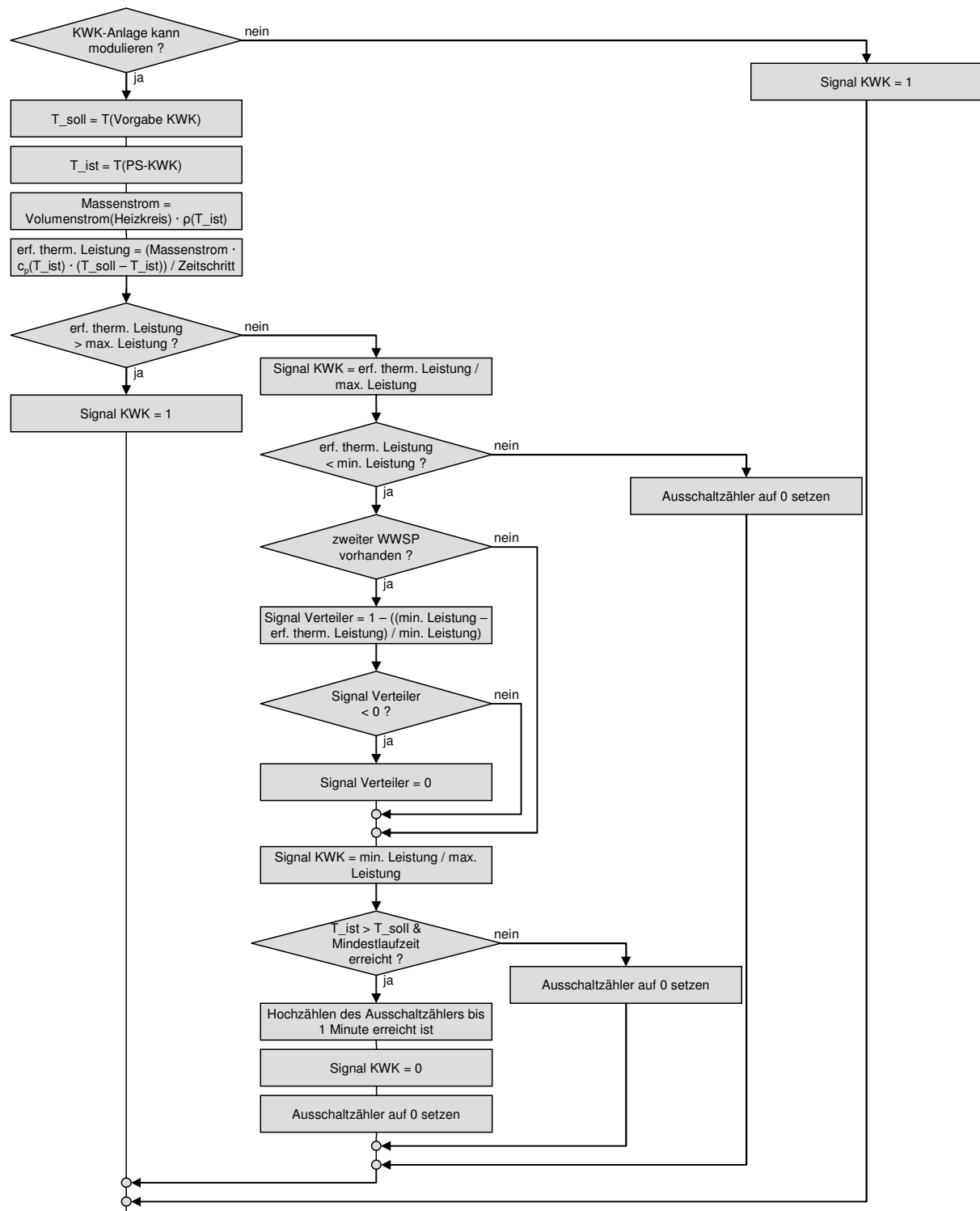
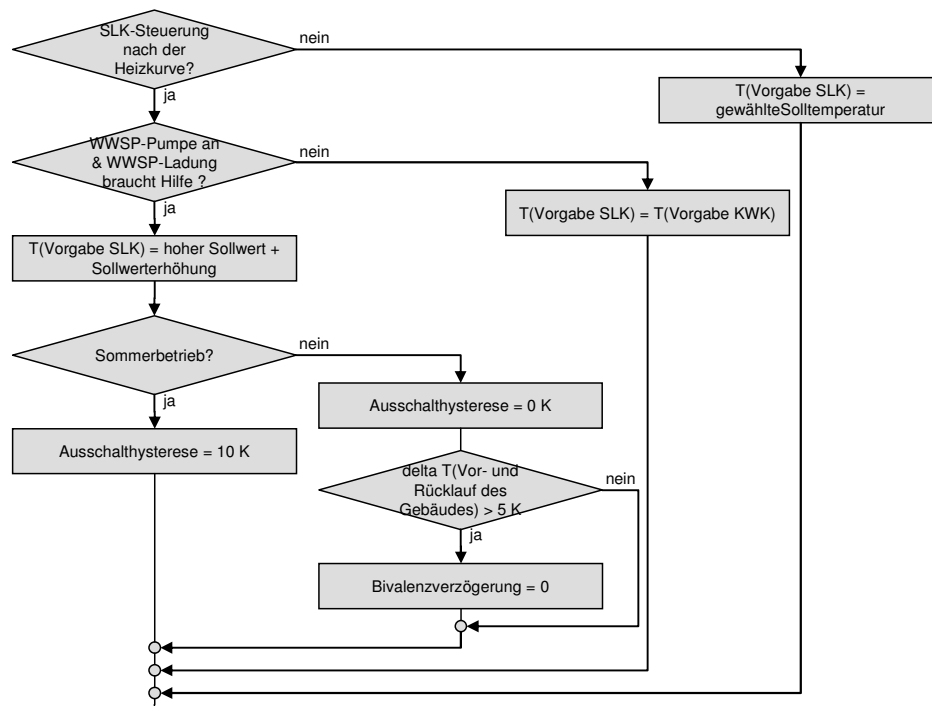


Abbildung 4-15: Flussbild der Modulation der KWK-Anlage

### Temperaturvorgabe des Spitzenlastkessels

In KWK-Systemen wird am Spitzenlastkessel i.d.R. eine feste Vorlauftemperatur eingestellt. Dennoch kann in der Simulation entweder ein fester Wert für die Vorlauftemperatur des Spitzenlastkessels vorgegeben werden oder der Betrieb nach der Heizkurve bzw. dem hohen Sollwert erfolgen.



**Abbildung 4-16:** Flussbild der Temperaturvorgabe des SLK

In **Abbildung 4-16** ist das Flussbild der Temperaturvorgabe des SLK dargestellt. Soll die SLK-Steuerung nicht nach der Heizkurve erfolgen, so wird die Solltemperatur als Vorgabe übergeben. Ansonsten ist zu entscheiden, ob gerade der normale Heizbetrieb oder eine WWSP-Ladung erfolgt. Im ersten Fall gilt die gleiche Temperatur, die auch der KWK-Anlage als Vorgabe dient. Bei einer WWSP-Ladung ist der hohe Sollwert die Temperaturvorgabe, die sogar um einen im Startmenü wählbaren Wert erhöht werden kann. Im Sommerbetrieb kann davon ausgegangen werden, dass die KWK-Anlage den Warmwasserbedarf alleine decken kann und die Ausschalthysterese auf 10 K gesetzt werden kann. Im Winterbetrieb soll der SLK bis zum Erreichen der vorgegebenen Solltemperatur die KWK Anlage unterstützen (Ausschalthysterese = 0 K). Die Abfrage, ob die Differenz aus Vor- und Rücklauftemperatur des Gebäudes mehr als 5 K beträgt, ermöglicht eine grobe Abschätzung des aktuellen Heizenergiebedarfs. Durch das Herabsetzen der Bivalenzverzögerung kann die WWSP-Ladung mit SLK-Unterstützung zügig durchgeführt werden, sodass die evtl. Auskühlung des Gebäudes bei WWSP-Vorrangschaltung reduziert wird.

### Einschaltkriterien des Spitzenlastkessels

Der Spitzenlastkessel bekommt von der KWK-Anlage ein Sperrsignal, wenn diese nicht läuft. Der Vorteil dieser negativen Freigabe liegt darin, dass auch bei einem Ausfall der KWK-Anlage der SLK freigeschaltet ist. Je nach Betriebszustand der KWK-Anlage (Laden des Warmwasserspeichers oder Heizbetrieb) übernimmt der SLK den zugehörigen Sollwert. Wird dieser um eine einstellbare Hysterese (z.B. 10 K) unterschritten, wird der SLK zugeschaltet. Der Sollwert ist je nach Schaltung entweder die Temperatur oben im Pufferspeicher (bei paralleler Einbindung) oder die Temperatur vom Mischer zum Heizkreis. In der Praxis wird der SLK nicht über die Heizkurve gesteuert sondern eine feste Vorlauf-Solltemperatur eingestellt. Dies kann in der Simulation berücksichtigt werden.

### **Ausschaltkriterium des Spitzenlastkessels**

Der Spitzenlastkessel bleibt so lange in Betrieb, bis er entweder seine Mindestlaufzeit erreicht hat, sofern diese vorgewählt wurde, oder die vorgegebene Solltemperatur erreicht wurde. Manche Anlagenhersteller lassen aus Komfortgründen eine Überheizung um 2 K zu.

### **Modulation des Spitzenlastkessels**

Die Modulation des Spitzenlastkessels wird genauso gesteuert wie die Modulation der KWK-Anlage (siehe Abbildung 4-15). Als Regeltemperatur wird ebenfalls die Temperatur am oberen Temperaturfühler im Pufferspeicher genommen.

### **Pumpensteuerung**

Die Pumpe des Heizkreises ist ständig in Betrieb. Nur wenn bei Warmwasserspeicher-Vorrangschaltung die Pumpe zum Beladen des Warmwasserspeichers einschaltet, wird die Heizkreispumpe ausgeschaltet. Die Warmwasserspeicherladepumpe wird sofort eingeschaltet, wenn die untere Grenztemperatur im Warmwasserspeicher unterschritten wird. Das Aufheizen des Pufferspeichers auf die hohe Solltemperatur vor dem Beladen des Warmwasserspeichers ist herstellerseitig nicht vorgesehen, jedoch in der Simulation darstellbar. Bei parallelem Heizkreis- und Warmwasserspeicher-Ladebetrieb sind beide Pumpen gleichzeitig in Betrieb.

Die Pumpe zum SLK ist nicht regelbar, sie wird immer dann eingeschaltet, wenn auch der SLK im Betrieb ist. Die zurzeit einzige regelbare Pumpe in der Simulation ist die Pumpe der KWK-Anlage. Diese regelt ihre Leistung in Schritten (20 %-Punkte pro Zeitschritt hoch, 5 %-Punkte pro Zeitschritt runter). Die Regelgröße ist die Temperatur des KWK-Vorlaufs. So soll erreicht werden, dass immer die komplette Wärme abgeführt werden kann und der Vorlauf eine konstante Temperatur behält.

#### **4.2.3.2 Erweiterte Schaltalgorithmen**

##### **Mindestdauer zum Erfüllen der Ausschaltkriterien**

Um bei kurzfristigen Schwankungen im Betrieb (aber gerade auch in der Entwicklungsphase der Simulation) ein zu frühes Abschalten der Wärmeerzeuger zu verhindern, wurden Mindestzeiten festgelegt, in denen die Ausschaltkriterien erfüllt werden müssen, bevor die Anlage wirklich ausgeschaltet wird. Bei der KWK-Anlage beträgt diese Zeit vier Minuten, beim SLK eine Minute. Dies führt in der Simulation zu einem deutlich ruhigeren Betrieb und weniger Taktvorgängen.

##### **Sollwerterhöhung des Spitzenlastkessels bei der Warmwasserspeicherladung**

Um den Warmwasserspeicher schneller zu laden und damit Phasen, in denen der Heizwärmebedarf nicht gedeckt wird, zu minimieren, kann der Sollwert des Spitzenlastkessels beim Ladebetrieb um einen Betrag (standardmäßig 10 K) erhöht werden. Dies führt in der Simulation zu merkbar kürzeren Ladezeiten. Diese Funktion ist nur dann relevant, wenn der Betrieb des SLK nach der Heizkurve gesteuert wird.

##### **Erweiterte Warmwasserspeicher-Ladesteuerung für den SLK**

Da die Warmwasserspeicherladung im Sommerbetrieb oder in Phasen mit nur geringem bis gar keinem Heizwärmebedarf i.d.R. allein durch die KWK-Anlage durchgeführt wird, bei

mehr als nur geringem Heizwärmebedarf aber der Spitzenlastkessel möglichst zuschalten sollte, wurde ein Regelalgorithmus aufgestellt, der beides ermöglicht.

Über die Differenz der Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizkreises im Gebäude wird abgeschätzt, wie hoch der aktuelle Heizwärmebedarf ist. Bei mittlerem bis hohem Heizwärmebedarf erhält der SLK sofort die Freigabe zur Unterstützung der Warmwasserspeicherladung. Es wird dann die „normale“ Regelung aufgerufen, die prüft, ob der Spitzenlastkessel hinzugeschaltet werden soll. Ist nur wenig oder gar kein Heizwärmebedarf vorhanden oder befindet sich die Anlage im Sommerbetrieb, dann wird über die Temperatur vor fünf Minuten und der aktuellen Temperatur im Warmwasserspeicher geprüft, wie schnell sich der Warmwasserspeicher erwärmt. Mit Hilfe dieses Steigerungswertes und der bisherigen Ladedauer wird die vorrausichtliche Gesamtladedauer berechnet. Liegt diese um einen bestimmten Faktor (standardmäßig 10) höher als die theoretische Ladezeit, dann schaltet auch der SLK zu. Die theoretische Ladezeit ergibt sich aus dem Volumen des Warmwasserspeichers, der Differenz zwischen oberem und unterem Grenzwert und der Leistung der KWK-Anlage. Des Weiteren schaltet der SLK sofort zu, wenn die Temperatur im Warmwasserspeicher weniger als 50 °C beträgt und trotz des Ladevorgangs sinkt. So soll sichergestellt werden, dass die Temperatur des Warmwasserspeichers nicht unter 38 °C fällt, was als gewünschte Ziel-Warmwassertemperatur angenommen wird.

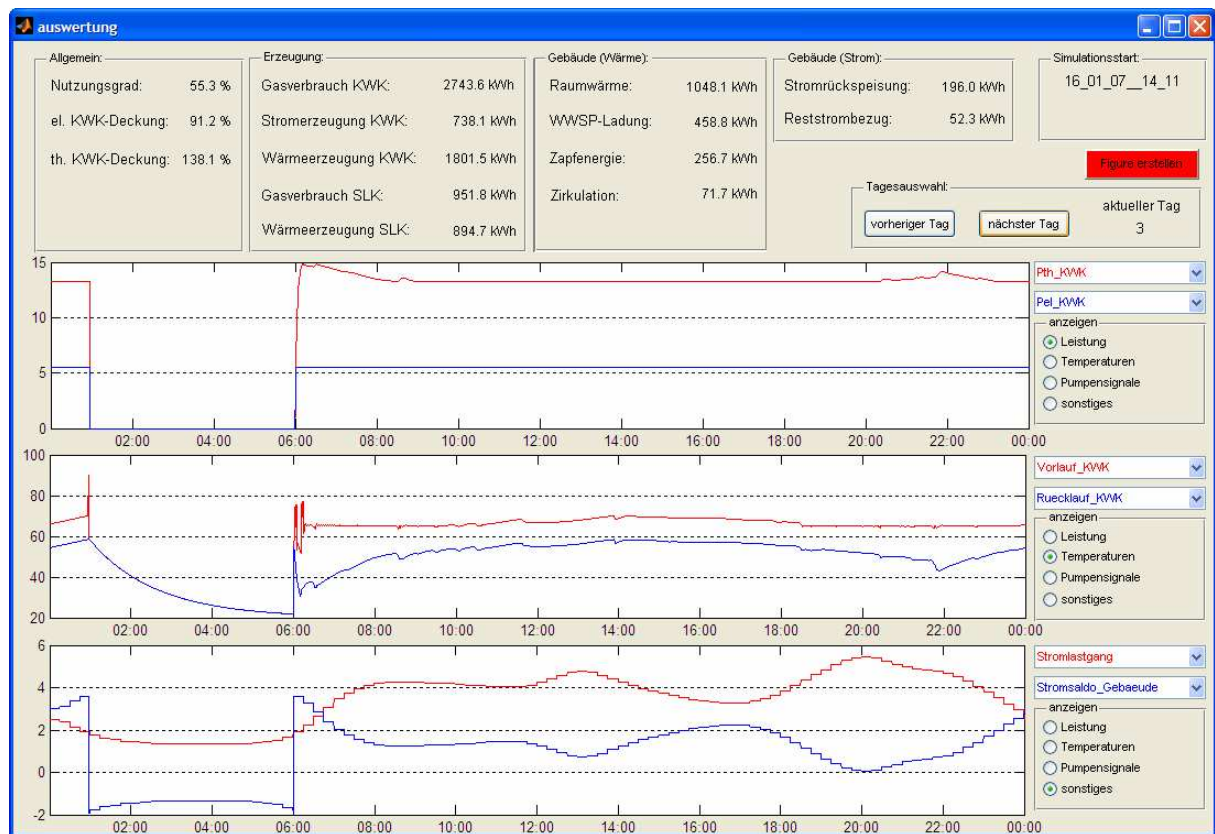
#### **4.2.4 Auswertung und Dokumentation der Simulationsdurchläufe**

Während der Simulation werden die Parameter und Größen ständig berechnet. Mithilfe eines Auswertungstools erfolgt eine schnelle und flexible Auswertung der Simulationsergebnisse durch Auswahl der anzuzeigenden Werte aus einer Anzahl von vorab definierten Datenreihen. Gestartet werden kann das Tool nach Ablauf von mindestens einem Simulationstag durch die Eingabe von „auswertung“ im Matlab-Prompt.

Im oberen Bereich der in **Abbildung 4-17** dargestellten Benutzeroberfläche sind die Ergebnisse einiger Größen dargestellt, bei denen nicht der zeitlicher Verlauf sondern der Endwert nach Simulationsende von Interesse ist. Dies sind Kennwerte, wie Nutzungs- sowie Deckungsgrade, und kumulierte Energiemengen. Unterteilt nach Bereichen werden dort folgende Größen angezeigt:

- **allgemein (in %):** Gesamt-Nutzungsgrad, elektrischer und thermischer Deckungsgrad der KWK-Anlage;
- **Erzeugung (in kWh):** Gasverbrauch der KWK-Anlage, Stromerzeugung der KWK-Anlage, Wärmeerzeugung der KWK-Anlage, Gasverbrauch des SLK, Wärmeerzeugung des SLK;
- **Gebäude (Wärme in kWh):** Energiemenge für Raumwärme, Energiemenge für WWSP-Ladung, entnommene Zapfenergie, Zirkulationsverluste;
- **Gebäude (Strom in kWh):** Stromrückspeisung, Reststrombezug.

Im unteren Bereich der Benutzeroberfläche kann in drei Diagrammen der zeitliche Verlauf eines Tages für eine Reihe von Größen dargestellt werden. In jedem Diagramm können jeweils bis zu zwei Datenreihen angezeigt werden. Hierzu wählt man zuerst für jedes Diagramm eine der vier Messwertkategorien Leistung, Temperaturen, Pumpensignale sowie Sonstiges aus und selektiert dann aus den zugehörigen Popup-Menüs die anzuzeigenden Datenreihen.



**Abbildung 4-17:** Ergebnisauswertung der KWK-Simulation

Über die beiden Schaltflächen „vorheriger Tag“ und „nächster Tag“ kann der anzuzeigende Tag der ausgewählten Datenreihen verändert werden. Mit der Schaltfläche „Figure erstellen“ wird eine Matlab-Figure der aktuell ausgewählten Daten erzeugt, die für den weiteren Gebrauch in Berichten, Vorträgen o.ä. individuell beschriftet werden kann. Die Schaltfläche „Simkonfig öffnen“ öffnet die während des Simulationsdurchlaufs erstellte Excel-Datei „Simulationskonfiguration Simulationsstart“, welche die im Startmenü eingestellten Werte auflistet.

## 5 Validierung der Simulation

Ein Alleinstellungsmerkmal der dieser Arbeit zugrunde liegenden Simulation ist die erfolgte Validierung mithilfe von Prüfstandsversuchen. Kernstück des Forschungsvorhabens „Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung“ war die Ermittlung von energietechnischen Basisdaten, wie Energieverbräuche, Nutzungs- und Deckungsgrade und CO<sub>2</sub>-Emissionen, sowie die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsanalysen für die einzelnen KWK-Systeme /Arndt 07/. Die dafür notwendigen messtechnischen Untersuchungen werden mit Hilfe eines speziell für das Forschungsvorhaben am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) der TU München errichteten KWK-Prüfstands durchgeführt, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird. Eine ausführliche Beschreibung der messtechnischen Untersuchungen an den vier KWK-Systemen sowie eine Gesamtauswertung erfolgt in /Muehl 07/. Eine gesonderte Auswertung der Untersuchungen hinsichtlich der Belange der Simulationsvalidierung erfolgt im Abschnitt 5.2.

### 5.1 Prüfstand zur messtechnischen Untersuchung von KWK-Systemen

Der am IfE im Rahmen des Verbundprojekts ISOTEG entwickelte Wärmeerzeugerprüfstand wurde zur Prüfung von KWK-Systemen erweitert. Der in **Abbildung 5-1** dargestellte Prüfstand gestattet das Vermessen verschiedenster Prüflinge und die Variation der Verteilsysteme für Heizwärme und Warmwasser (Stichleitungs- und Zirkulationsbetrieb). Prüflinge verschiedener Bauart können damit unter sehr verschiedenen Bedingungen und in unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen betrieben werden.



**Abbildung 5-1:** KWK-Prüfstand am IfE

Für die messtechnischen Untersuchungen werden anhand von charakteristischen Ausschnitten des Heizanlagenbetriebs Aussagen über die Funktions- und Betriebsweise getroffen sowie Energiebilanzen aufgestellt. Dafür wurden am IfE dynamische Heizungs- und Warmwasserlastgänge entwickelt, die dabei als Eingangsgrößen zum Betrieb des Prüfstands



dienen. Die Ausschnitte sind definierte Typtage: zwei Winter- und Übergangstage (heiter und trüb) sowie ein Sommertag (nur mit Warmwasserbedarf). Die Versuchsergebnisse und -auswertungen können auf Jahreswerte hochgerechnet werden.

## 5.2 Auswertung der messtechnischen Untersuchungen

Die am KWK-Prüfstand durchgeführten messtechnischen Untersuchungen dienen einerseits der Verifizierung der technischen Daten der Anlagenhersteller, die in **Tabelle 5-1** aufgeführt sind, andererseits können mithilfe der Messdaten die für die Simulation entwickelten Modelle verifiziert und kalibriert werden.

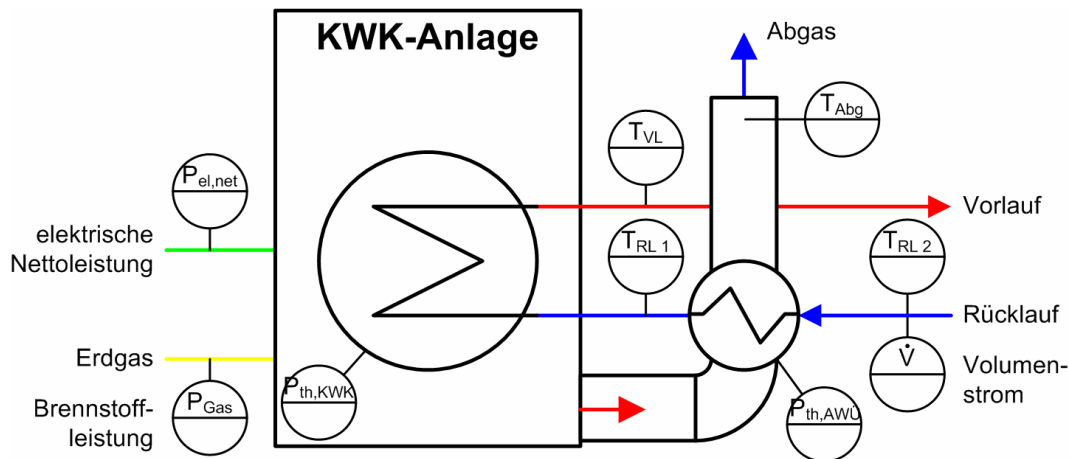
**Tabelle 5-1:** Technische Daten der KWK-Systeme am Prüfstand /Sen 01, PPT 04, Solo 06, Vail 03/

KWK-Technologie		VKM	VKM	Stirling	PEM BZ
Hersteller	Einheit	SenerTec	Powerplus Technologies	SOLO Stirling	Vaillant
elektr. Bruttoleistung	kW	5,5	1,3 - 4,7		k.A.
elektr. Nettoleistung	kW	5,4	1,2 - 4,6	2 - 9,5	1,5 - 4,6
therm. Leistung KWK	kW	12,5	4 - 12,5	8 - 26	3,5 - 9,1
Brennstoffleistung KWK	kW	20,5	8,8 - 19	18 - 40	- 17
therm. Leistung SLK	kW	46	46	46	-
Brennstoffleistung SLK	kW	48,5	48,5	48,5	-
Pufferspeicher	l	1.000	1.000	2 x 1.000	-
Warmwasserspeicher	l	500	500	Frischwasser-technologie	-
vermessen als...	-	System	System	System	Anlage

Die relevanten Messgrößen einer KWK-Anlage sind die Rücklauftemperatur  $T_{\text{Rück}}$ , die Vorlauftemperatur  $T_{\text{Vor}}$ , die thermische Leistung  $P_{\text{th}}$ , die Brennstoffleistung  $P_{\text{Gas}}$ , die elektrische Leistung  $P_{\text{el}}$  und der Durchfluss  $\dot{V}$ . Die Messpunkte der Größen sind in **Abbildung 5-2** dargestellt. Die jeweils gegenseitigen Abhängigkeiten der Größen lassen sich in so genannten Streudiagrammen<sup>10)</sup> erkennen. Auf der Hauptdiagonalen treffen die gleichen Messgrößen aufeinander. Hier sind anstelle der Streudiagramme, die einen linearen Zusammenhang darstellen würden, die Verteilungen der relativen Häufigkeiten nach Klassen in Histogrammen aufgeführt.

Neben den Simulationsmodellen für die einzelnen KWK-Anlagen werden auch die Modelle für die als Spitzenlastkessel genutzte Erdgas-Brennwerttherme mit 46 kW Nennheizleistung von Vaillant und die Wärmespeicher (Puffer- und Warmwasserspeicher) validiert.

<sup>10)</sup> Ein Streudiagramm (engl. Scatterplot) ist die graphische Darstellung von beobachteten Wertepaaren zweier statistischer Merkmale. Diese Wertepaare werden in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen, wodurch sich eine Punktwolke ergibt, die Informationen über die Abhängigkeitsstruktur der beiden Merkmale verdeutlicht.



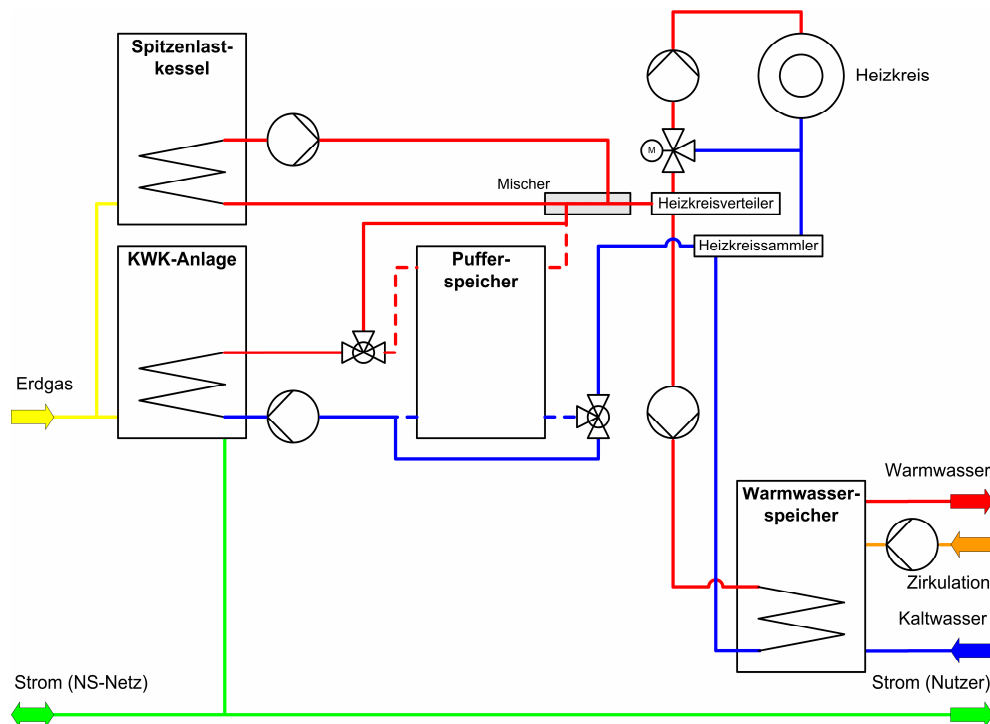
**Abbildung 5-2:** Messpunkte an einer KWK-Anlage mit externem Abgaswärmeübertrager

### 5.2.1 Motorisches BHKW „Dachs“ von Senertec

Die von SenerTec „Dachs“ genannte KWK-Anlage ist ein Einzylinder-Verbrennungsmotor, an den über eine Getriebeübersetzung ein Asynchrongenerator angeschlossen ist. Die technischen Herstellerangaben sind Tabelle 5-1 zu entnehmen. Das Gerät ist nicht leistungsmodulierend, d.h. es kann nur bei Nennleistung betrieben werden.

#### 5.2.1.1 Systembeschreibung

Die KWK-Anlage Dachs HKA 5,5 von SenerTec ist mit einem externen Abgaswärmeübertrager (Kondenser) zur Verbesserung des thermischen Nutzungsgrads durch Nutzung der Kondensationswärme im Abgas ausgerüstet. Als Pufferspeicher wird ein einbautenfreier Standardspeicher mit vier Anschlüssen und einem Inhalt von 1.000 l verwendet. Als Spitzenlastkessel dient eine Erdgas-Brennwerttherme Ecotec VC 466-E mit 46 kW Nennheizleistung von Vaillant. Die hydraulische Einbindung der einzelnen Komponenten ist in **Abbildung 5-3** dargestellt. Der Vorlauf der KWK-Anlage führt direkt an den Anschluss im oberen Drittel des Heizungspufferspeichers. Der Rücklauf wird vom unteren Anschluss des Heizungspufferspeichers über den Kondenser (AWÜ) wieder in die KWK-Anlage geführt. Vom oberen Anschluss des Heizungspufferspeichers aus werden der Heizkreis- und der Warmwasserspeicherlade-Vorlauf versorgt, die gegebenenfalls zusätzlich vom Spitzenlastkessel erwärmt werden können. Der Rücklauf aus dem Heizkreis und dem Warmwasserspeicher wird dem Heizungspufferspeicher wieder im unteren Drittel zugeführt. Da bei diesem Hydraulikschema nur die KWK-Anlage an den Pufferspeicher angeschlossen ist, kann dieser im Sommer umgangen werden. In der Sommerschaltung wird der Warmwasserspeicher direkt von der KWK-Anlage beladen. Als Warmwasserspeicher dient ein 500 l-Speicher mit innenliegender Heizwendel im unteren Drittel. Die Warmwasserversorgung ist als Zirkulationssystem ausgeführt.



**Abbildung 5-3:** Hydraulikschema vom SenerTec-KWK-System: KWK-Anlage belädt den Pufferspeicher, SLK nach Pufferspeicher (optional mit Sommerschaltung)

### 5.2.1.2 Messergebnisse

#### Stationärer Betrieb

Wie einleitend erwähnt, werden die jeweils gegenseitigen Abhängigkeiten der Größen in Streudiagrammen dargestellt. Diese sind in **Abbildung 5-4** für den „Dachs“ von SenerTec aufgetragen. Die Werte stammen aus verschiedenen Messungen, die jeweils mit unterschiedlichen Farben aufgetragen wurden.

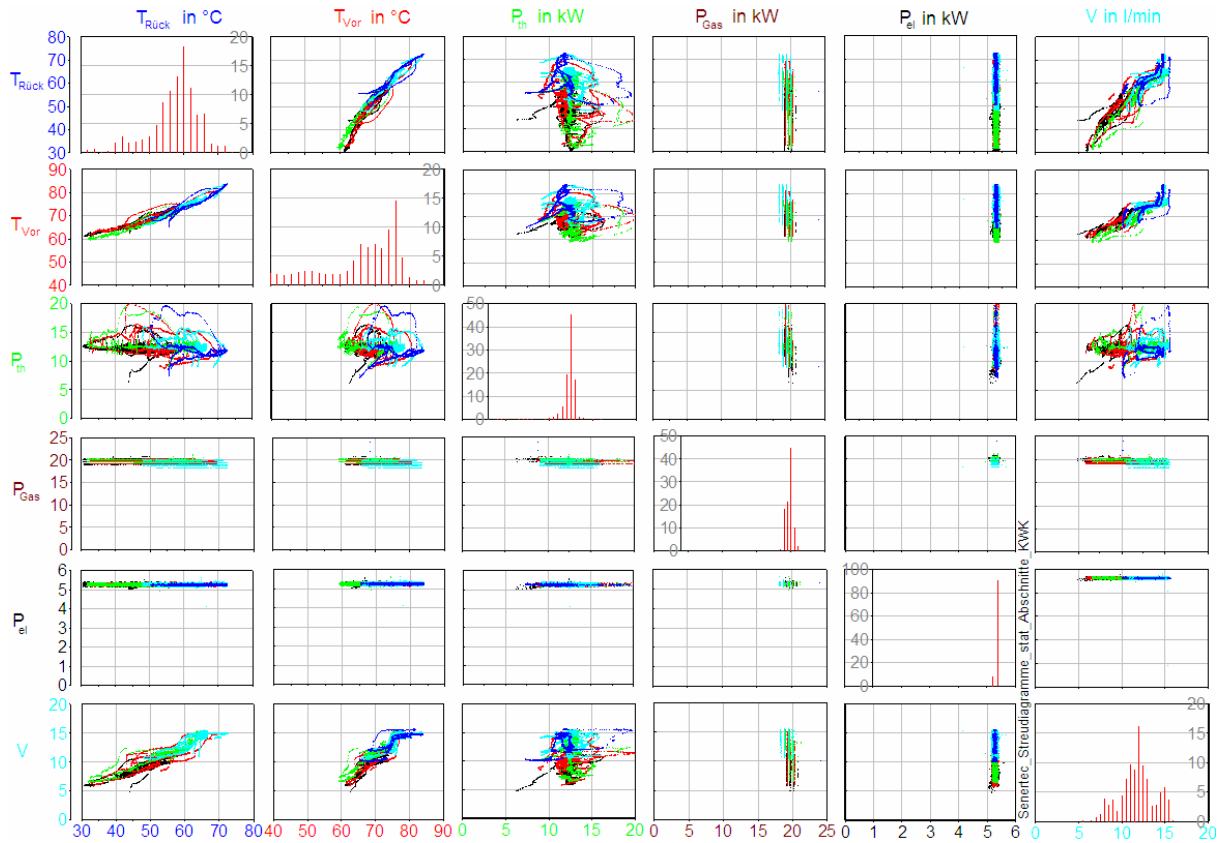
Trägt man die Vorlauftemperatur über der Rücklauftemperatur auf, so lässt sich eine Kurve erkennen, an denen sich die Wertepaare anordnen. Diese liegt im Bereich von  $T_{Vor}$  zwischen 60 und ca. 83 °C und von  $T_{Rück}$  zwischen 30 und 72 °C. Das Histogramm von  $T_{Rück}$  zeigt, dass in über 50 % der Fälle die Rücklauftemperatur zwischen 56 und 62 °C liegt. Bei den Vorlauftemperaturen liegen über 50 % in einem engeren Bereich über 66 bis 76 °C, allein fast 15 % in der 76,2 °C-Klasse<sup>11)</sup>, was auf die Vorlauftemperaturregelung zurückzuführen ist.

Die elektrische, thermische und Brennstoffwärmeleistung zeigen geringe Variationsbreiten und Abhängigkeiten:

- Über 91 % der elektrischen Leistungen liegen über 5,2 bis 5,4 kW in der 5,4<sub>-0,2</sub> kW-Klasse. Es sind keine Abhängigkeiten vorhanden.

<sup>11)</sup> Die Benennung der 76,2 °C-Klasse setzt sich aus der oberen Begrenzung (76 °C) und der Klassenbreite (2 K), die als tiefgestellte Zahl angegeben wird, zusammen. In diesem Beispiel sind in der Klasse also alle Werte von 74,01 bis 76,0 °C enthalten.

- Über 82 % der thermischen Leistungen liegen zwischen 11,5 und 13 kW, allein 45 % in der 12,5<sub>-0,5</sub> kW-Klasse, geringfügig höhere Werte bei niedrigen Rücklauftemperaturen.
- Über 77 % der Brennstoffwärmeleistungen liegen zwischen 19,5 und 20,5 kW, allein 45 % in der 20,5<sub>-0,5</sub> kW-Klasse. Es sind keine Abhängigkeiten vorhanden.



**Abbildung 5-4:** Streudiagramme der KWK-Anlage von SenerTec

Beim Durchfluss  $\dot{V}$  lässt sich die deutlichste Abhängigkeit von  $T_{\text{Rück}}$  erkennen. Legt man durch die Wertepaare eine Ausgleichskurve, liegt  $\dot{V}$  bei Rücklauftemperaturen von 30 °C bei ca. 7 l/min, bei 50 °C bei ca. 10,5 und bei 65 °C bei 15 l/min. Im Histogramm liegen ca. 60 % der Durchflüsse über 10 bis 13 l/min.

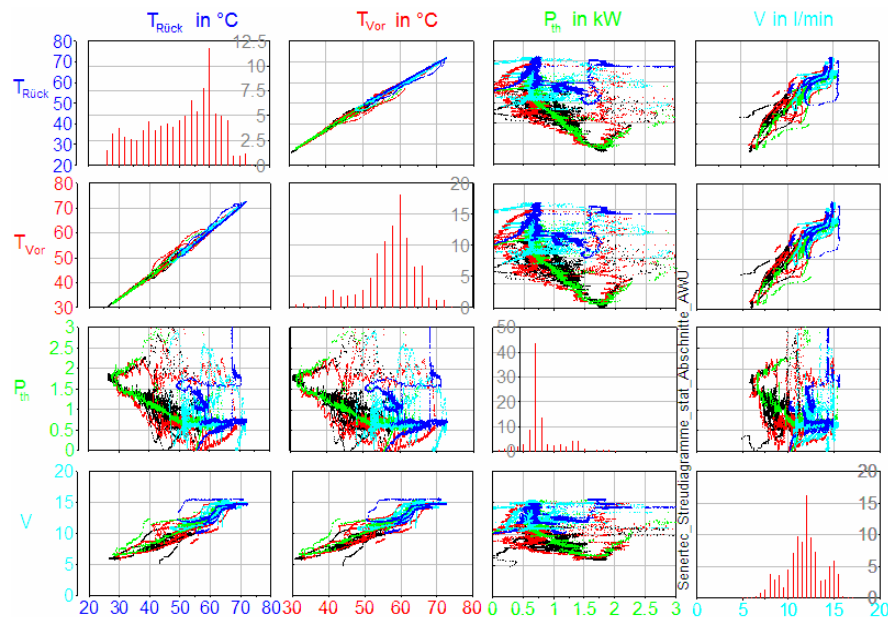
### Start- und Stoppverhalten

Beim Anlagenstart wird erst eine interne Prüfung der Anlagenzustände durchgeführt, das Magnetventil für die Gaszufuhr geöffnet und schließlich der Motor gestartet. Dieser Vorgang dauert insgesamt ca. 80 Sekunden und bedarf einer elektrischen Energiemenge von ca. 4 Wh. Die KWK-Anlage erreicht aufgrund von Warmlaufvorgängen und thermischen Trägheiten die thermische und die elektrische Nennleistung mit unterschiedlicher Verzögerung. Innerhalb von einer bzw. 15 Minuten liegen 95 % der elektrischen bzw. thermischen Leistung vor.

Beim Ausschalten der KWK-Anlage werden alle Leistungen und der Durchfluss augenblicklich gestoppt. Es erfolgt kein Nachlaufen der Umwälzpumpe, um noch vorhandene gespeicherte thermische Leistung aus dem Gerät abzuführen.

### Abgaswärmeübertrager

Der „Dachs“ von SenerTec kann optional mit einem externen Abgaswärmeübertrager (AWÜ) ausgestattet werden, was bei den Versuchen am Prüfstand der Fall war. Da der AWÜ messtechnisch nur wasserseitig erfasst wurde, sind die relevanten Größen die Rücklaufftemperatur  $T_{\text{Rück}}$ , die Vorlaufftemperatur  $T_{\text{Vor}}$  (die dann die Rücklaufftemperatur der KWK-Anlage ist), die thermische Leistung  $P_{\text{th}}$  und der Durchfluss  $\dot{V}$  (vgl. Abbildung 5-2). Die gegenseitigen Abhängigkeiten sind in den Streudiagrammen in **Abbildung 5-5** dargestellt. Auch hier stammen die Werte aus verschiedenen Messungen, die jeweils mit unterschiedlichen Farben aufgetragen wurden.



**Abbildung 5-5:** Streudiagramme des Abgaswärmeübertragers von SenerTec

Die wichtigste Erkenntnis aus den Streudiagrammen ist die Abhängigkeit der thermischen Leistung des Kondensers von der Rücklaufftemperatur. Zwar zeigen die Streudiagramme aufgrund der Datenpunktmenge grafisch keinen eindeutiger Trend, prinzipiell zeigt sich aber der charakteristische Verlauf der thermischen Leistung: Bei Rücklaufftemperaturen oberhalb von ca. 52 °C ist die thermische Leistung nahezu konstant, unterhalb von 52 °C steigt die thermische Leistung mit abnehmender Rücklaufftemperatur stetig an. Diese Grenze wird durch den Taupunkt des Abgases charakterisiert. Das Histogramm der Rücklaufftemperatur zeigt, dass die Hälfte der Rücklaufftemperaturen unter 52 °C liegen, das Histogramm der thermischen Leistung zeigt aber, dass nur ca. in 25 % der Fälle Leistungen über 0,8 kW<sub>th</sub> zur Verfügung stehen. Der eindeutigste Zusammenhang in Abbildung 5-5 ist die Abhängigkeit zwischen Vor- und Rücklaufftemperatur.

#### 5.2.1.3 Modellierung

##### Stationärer Betrieb

Um den stationären Betrieb der SenerTec-KWK-Anlage in der Simulation abbilden zu können, werden nun anhand der Streudiagramme die gegenseitigen Abhängigkeiten mithilfe mathematischer Gleichungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass mit den Gleichungen alle Größen eindeutig bestimmt werden können.

Die thermische Leistung der KWK-Anlage in kW wird in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur in °C ausgedrückt, weil diese Größe am KWK-Anlagenrücklauf bekannt ist. Nach eingehender Prüfung verschiedener Ansätze hat sich gezeigt, dass hierfür ein Polynom 3. Grades am besten geeignet ist.

$$P_{th,KWK}(T_{RL}) = -5,4 * 10^{-5} * T_{RL}^3 + 8,35 * 10^{-3} * T_{RL}^2 - 0,4235 * T_{RL} + 19,484 \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Obwohl die grafische Darstellung in Abbildung 5-4 aufgrund der Größe der „Punktwolke“ es nicht erwarten lässt, liegt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von Gleichung 5-1 bei 98,5 %. Generell gilt, dass sich der Gültigkeitsbereich der Gleichungen nur über den Wertebereich der Rücklauftemperatur erstreckt.

Die KWK-Anlage verfügt über eine thermostatische Vorlauftemperaturregelung, die den Volumenstrom aber nicht soweit reduziert, dass die Soll-Vorlauftemperatur immer erreicht wird. Deshalb ist der analytische Ansatz über die Abhängigkeit des Durchflusses in l/min von der Rücklauftemperatur in °C zu wählen. Es hat sich eine abschnittsweise Funktionsdefinition als hilfreich erwiesen. Sowohl ober- als auch unterhalb der Thermostat-Endtemperatur von 60 °C sind lineare Zusammenhänge wenn auch mit unterschiedlicher Steigung zu erkennen.

$$\begin{aligned} \text{für } T_{RL} < 60 \text{ °C: } F_{KWK} &= 0,13 * T_{RL} + 4,7 \\ \text{für } T_{RL} > 60 \text{ °C: } F_{KWK} &= 0,62 * T_{RL} - 24,8 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Die elektrische Leistung  $P_{el}$  wird mit 5,35 kW, die Brennstoffwärmeleistung  $P_{Gas}$  mit 20,0 kW festgesetzt. Damit liegt ein kompletter Funktionssatz für alle Größen im stationären Betrieb der SenerTec-KWK-Anlage vor.

### Start- und Stoppverhalten

Wie im letzten Abschnitt erläutert, erreicht die KWK-Anlage aufgrund verschiedener Vorgänge und Trägheiten nur verzögert die thermische und die elektrische Nennleistung. Bei der Auswertung der Messdaten hat sich aus verschiedenen Ansätzen herausgestellt, dass sich das Startverhalten mithilfe von Gleichung 5-3 sehr gut abbilden lässt:

$$P_{KWK}(t) = P_{KWK,Nenn} * \left( 1 - e^{\left( -\left( \frac{t^{DK}}{ZK} \right) \right)} \right) \quad \text{Gleichung 5-3}$$

t	Anlagenlaufzeit (seit dem letzten Anlagenstart)
DK	Dämpfungskonstante
ZK	Zeitkonstante

Je nach elektrischer oder thermischer Trägheit bzw. bei der thermischen Trägheit in Abhängigkeit von der Anlagenstillstandszeit wurden entsprechende Dämpfungs- und Zeitkonstanten ermittelt, die in **Tabelle 5-2** aufgeführt sind. Aus den messtechnischen Untersuchungen hat sich ergeben, dass nach einer Stillstandszeit von ca. 1,5 Stunden dieselbe thermische Trägheit wie bei einem Kaltstart zu verzeichnen ist. Die Brennstoffwärmeleistung nimmt ab dem Anlagenstart den Wert des stationären Betriebs von 20,0 kW an.

**Tabelle 5-2:** Dämpfungs- und Zeitkonstanten der elektrischen bzw. thermischen Leistung beim Anlagenstart der SenerTec-KWK-Anlage

Anlagenstillstand in min	elektrische Leistung		thermische Leistung	
	DK	ZK	DK	ZK
22	0,9	6	0,7	28
57	0,9	6	0,7	35
83 (auch Kaltstart)	0,9	6	0,7	40

Wie im letzten Abschnitt erläutert, werden beim Ausschalten der KWK-Anlage alle Leistungen sofort auf Null reduziert. Eine spezielle Modellierung dieses Verhaltens ist nicht notwendig.

### Abgaswärmeübertrager

Bei der Modellierung des Abgaswärmeübertragers wird lediglich die Abhängigkeit der thermischen Leistung in kW von der Rücklaufftemperatur in °C berücksichtigt. Oberhalb einer Rücklaufftemperatur von 51,4 °C, bei der gerade noch keine Kondensation im AWÜ zu verzeichnen ist, liegt die thermische Leistung bei ca. 0,7 kW. Unterhalb dieser Temperatur lässt sich die Abhängigkeit von der Rücklaufftemperatur mit Gleichung 5-4 darstellen.

$$\text{für } T_{RL} < 51,4 \text{ °C: } P_{th,AWÜ} = -0,04 * T_{RL} + 2,63$$

$$\text{für } T_{RL} > 51,4 \text{ °C: } P_{th,AWÜ} = -0,005 * T_{RL} + 0,93$$

Gleichung 5-4

Das Bestimmtheitsmaß für den ersten Kurvenast liegt bei 78,8 %. Für den zweiten Kurvenast für  $T_{RL} > 51,4 \text{ °C}$  liegt  $R^2$  nur bei 21,2 %, was an der gleichmäßigen systematischen Streuung von  $\pm 0,1 \text{ kW}_{th}$  um den Erwartungswert liegt (vgl. Abbildung 5-5, 43 % von  $P_{th}$  liegt in der 0,7-0,1 kW-Klasse).

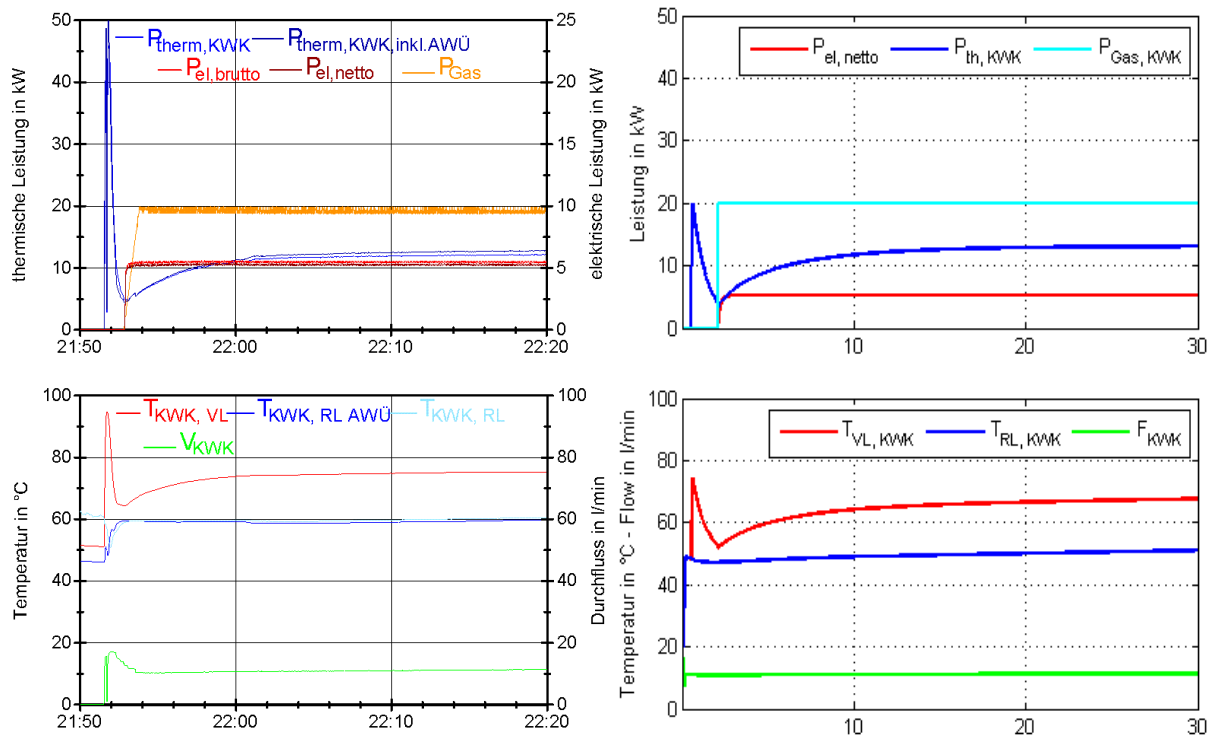
Anhand der vorliegenden Rücklaufftemperatur und der sich daraus ergebenden thermischen Leistung kann mithilfe des vorhandenen Durchflusses die zugehörige Vorlaufftemperatur bestimmt werden.

#### 5.2.1.4 Simulationsergebnisse

Um die Messungen mit der Simulation vergleichen zu können, ist eine Fehlerbetrachtung sinnvoll. Da es nun nicht das Ziel der Simulation ist, in einem engen Toleranzband die Temperaturen und Leistungen der Messung nachzufahren, wurde die Kontrolle auf zwei Verfahren beschränkt:

Im ersten Schritt erfolgt eine Auswertung der Momentanwerte, d.h. die Messwerte und Simulationsergebnisse werden verglichen und plausibilisiert. **Abbildung 5-6** zeigt einen Anlagenstart der SenerTec-KWK-Anlage. Im linken Grafiken-Paar sind Messwerte aus den messtechnischen Untersuchungen und im rechten Grafiken-Paar Ergebnisse der Simulation dargestellt. Die thermische Leistungsspitze wurde in der Simulation absichtlich auf 20 kW begrenzt, um nicht in Konflikt mit Sicherheitsabfragen zu geraten. Auch wurde auf das kurzzeitige Ansteigen des Volumenstroms verzichtet. Der stetige Anstieg des Gasverbrauchs bei der Messung ist auf die Charakteristik der Messauswertung zurückzuführen (1-Minuten-Mittelwerte einer Impulsmessungsauslesung), eine richtige Darstellung wäre der

sprunghafte Anstieg wie in der Simulation dargestellt. Die weiteren Temperatur- und Leistungsverläufe zeigen vergleichbare Charakteristiken.



**Abbildung 5-6:** Anlagenstart der SenerTec-KWK-Anlage: Messung (links) und Simulation (rechts)

Im zweiten Schritt werden für einen definierten Zeitraum die Energiemengen integriert und verglichen. Beim Startvorgang sind die ersten 30 Minuten relevant. In **Tabelle 5-3** sind die Energiemengen, die in dieser Zeit verbraucht bzw. erzeugt wurden, aufgeführt. Die Abweichungen der Simulation im Vergleich zu den Messungen liegt im Bereich von  $\pm 1,4 \%$ , was für die Belange der Simulation hinreichend genau ist.

**Tabelle 5-3:** Vergleich Messung / Simulation anhand von Energiemengen nach dem Start der SenerTec-KWK-Anlage

	Einheit	Messung	Simulation	Abweichung
<b>Bilanzzeitraum</b>	mm:ss	30:00	30:00	
<b>Abtastrate / Zeitschritt</b>	s	1	1	
<b>Elektrische Energie</b>	kWh	2,468	2,485	+0,7 %
<b>Thermische Energie</b>	kWh	5,827	5,747	-1,4 %
<b>Brennstoffenergie</b>	kWh	9,204	9,333	+1,4 %

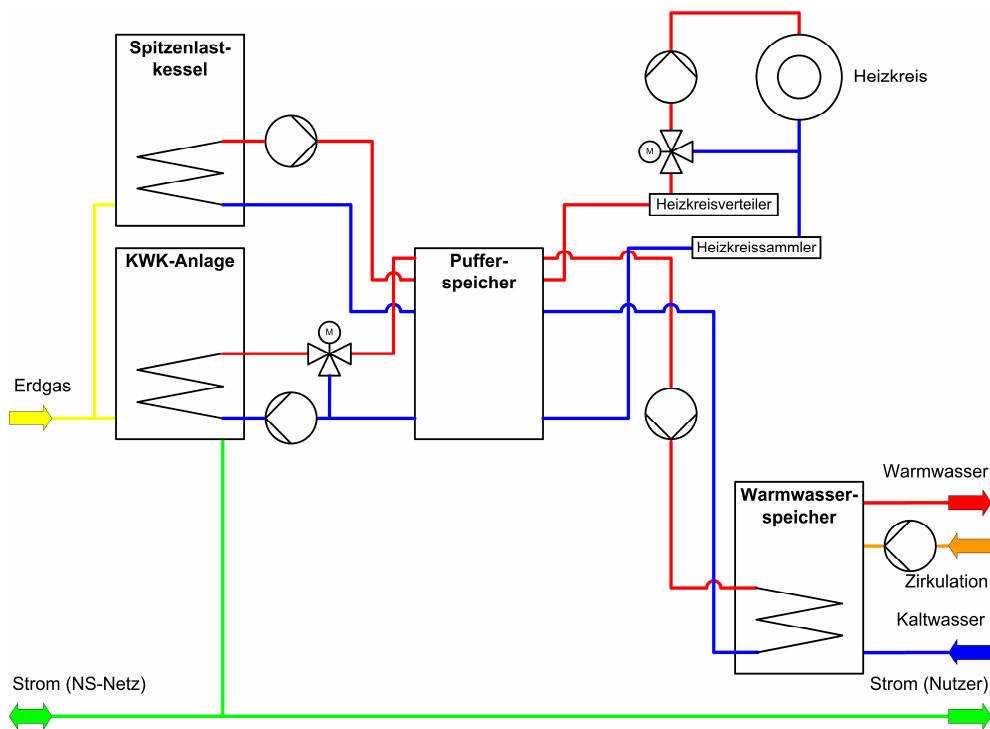
### 5.2.2 Motorisches BHKW „Ecopower“ von PowerPlus Technologies

Die „Ecopower“ genannte KWK-Anlage von der Powerplus Technologies GmbH ist ein drehzahlvariabler Einzylinder-Verbrennungsmotor, an den ein Permanentmagnet-Generator





system ausgeführt. Die hydraulische Einbindung der einzelnen Komponenten ist in **Abbildung 5-8** dargestellt.



**Abbildung 5-8:** Hydraulikschema des Ecopower-KWK-Systems: KWK-Anlage und SLK beladen parallel den Pufferspeicher

#### 5.2.2.2 Messergebnisse

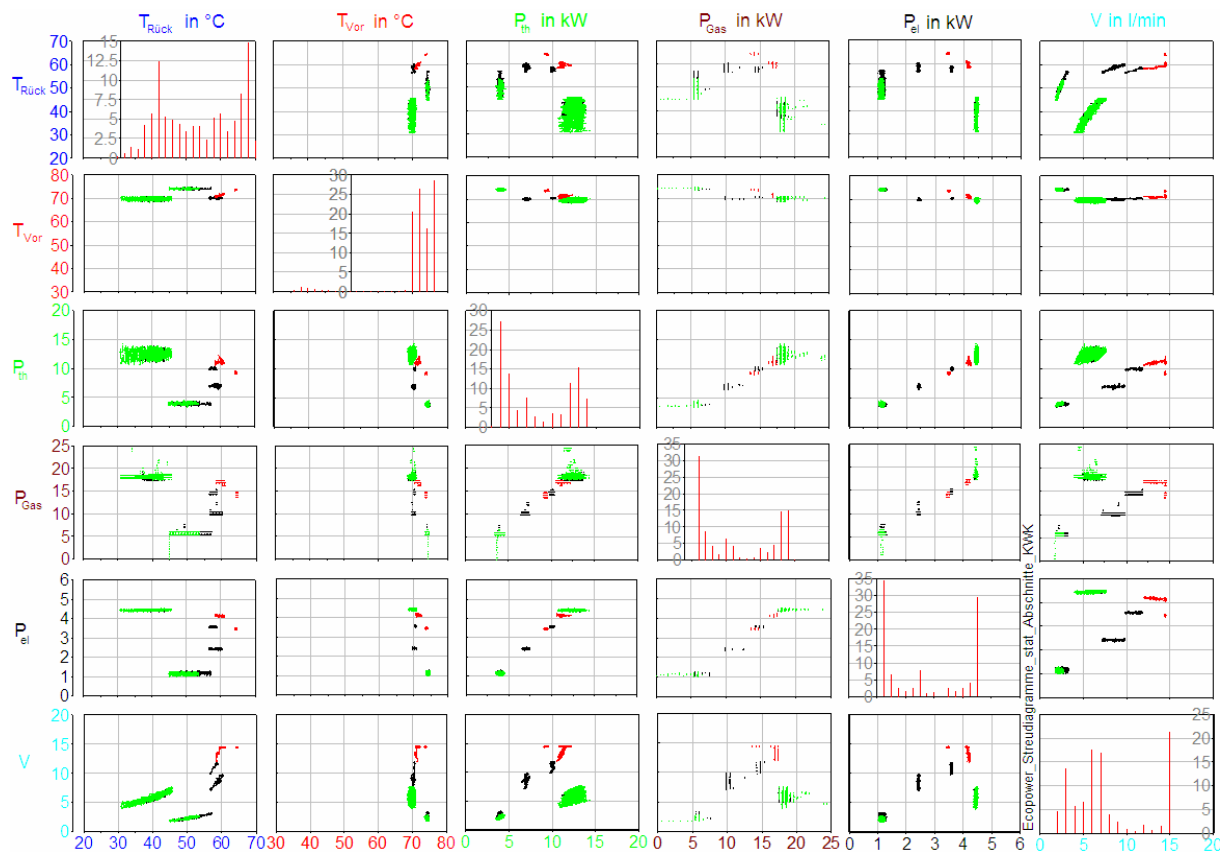
##### Stationärer Betrieb

Die jeweils gegenseitigen Abhängigkeiten der relevanten Messgrößen der Ecopower-KWK-Anlage sind in **Abbildung 5-9** aufgetragen. In den Streudiagrammen wurden nur stationäre Betriebszustände aus den drei Typtagmessungen ausgewertet, die Histogramme beinhalten jedoch alle aufgenommenen Messwerte.

Trägt man die Vorlauftemperatur über die Rücklauftemperatur auf, so lässt sich die Funktion der Rücklauftemperaturanhebegruppe erkennen. Diese bewirkt, dass die Vorlauftemperatur je nach Versorgungsaufgabe (Raumwärme- oder Warmwasserbedarfsdeckung) bzw. in Abhängigkeit von der Motordrehzahl fast ausschließlich Werte zwischen 70 und 75 °C annimmt. Die Rücklauftemperaturen weisen hingegen eine Bandbreite von 30 bis 70 °C und zwei relative Häufigkeitsmaxima in der 42,2 °C- und der 68,2 °C-Klasse auf. Erstere ist auf den Heizbetrieb am Wintertag bzw. in den Morgenstunden am Übertag, zweite auf den Warmwasserbetrieb mittags am Übertag bzw. ganztägig am Sommertag zurückzuführen.

Anhand der Histogramme der drei dargestellten Leistungen lässt sich erkennen, dass die KWK-Anlage zwar den gesamten Modulationsbereich ausnutzt, das Gerät aber entweder bei Nennleistung (Anteil von 30 % bei  $P_{el}$ ) oder Minimalleistung (Anteil von 35 % bei  $P_{el}$ ) betrieben wird.

Weder bei der elektrischen, der thermischen noch der Brennstoffwärmeleistung lässt sich eine Abhängigkeit von der Rücklaufftemperatur erkennen. Die Brennstoffwärmeleistung ist bei mittleren bis oberen elektrischen Leistungen direkt proportional, steigt jedoch bei kleineren Leistungen überproportional an, was auf einen Wirkungsgradrückgang der Generator-Wechselrichter-Kombination im unteren Leistungsbereich zurückzuführen ist.



**Abbildung 5-9:** Streudiagramme der Messung am Ecopower-BHKW

Die thermische Leistung weist eine gegensätzliche Charakteristik auf: Aufgrund der höheren Vorlauftemperatur bei geringen Drehzahlen scheint eine günstigere Wärmeauskopplung möglich zu sein. Bei einem schlechteren thermischen Wirkungsgrad im mittleren Leistungsbereich nimmt die thermische Leistung im Verhältnis zur Brennstoffwärmeleistung bis zur Nennleistung jedoch wieder überproportional zu.

Diese Ergebnisse lassen sich auch mit Versuchen bestätigen, bei denen jeweils über einen Zeitraum von einer Stunde stationäre Motordrehzahlen von 1.200 (Minimaldrehzahl), 2.400 und 3.600 U/min (Nenn Drehzahl) beibehalten wurden /Muehl 07/.

Aufgrund der Rücklaufftemperaturanhebegruppe stellt sich der entsprechende Volumenstrom zum Pufferspeicher bei gegebener Rücklaufftemperatur in Abhängigkeit von der Soll-Vorlauftemperatur und der thermischen Leistung ein. Das Histogramm des Volumenstroms zeigt einen Anteil von über 20 % in der 15-1 l/min-Klasse. Dabei wird der gesamte Volumenstrom von der KWK-Anlage zum Pufferspeicher gefördert, was bei ausschließlichen Warmwasserspeicherladungen der Fall ist. Im Heizbetrieb wird der Hauptteil des Volumenstroms wieder über das Verteilventil im Kreis gepumpt, der Volumenstrom zum Pufferspeicher liegt mit einem Anteil von 35 % im Bereich von 5 bis 7 l/min.

### Start- und Stoppverhalten

Das Startverhalten des Ecopower-BHKWs ist stark von der Stillstandszeit abhängig. Nach dem Einschalten läuft der Motor mit einer Leistung von 2,5 kW<sub>el</sub>. Ist die Anlage komplett ausgekühlt, wird erst der Motor erwärmt, d.h. der Mischer der Rücklauftemperaturhochhaltegruppe wird zunächst geschlossen, sodass das Kühlwasser der KWK-Anlage im Kreis durch den Motor gepumpt wird. Sofern die Rücklauftemperatur über ca. 40 °C liegt, öffnet das Verteilventil. Dies kann sofort beim Starten der Fall sein oder beim Kaltstart erst nach 8 Minuten eintreten. Im normalen Betrieb ist die Anlage nie so ausgekühlt, dass in der Praxis ein Kaltstart vorkommt.

Nach einer Warmlaufphase von zwei (Warmstart) bis fünf Minuten (Kaltstart) regelt das BHKW die Drehzahl stetig nach oben bis 4 kW<sub>el</sub> erreicht sind. Nach weiteren 15 Minuten erreicht das BHKW die elektrische Nennleistung. Aufgrund der trägen Regelcharakteristik des Verteilventils unterliegt die thermische Leistung zunächst großen Schwankungen, die sich aber nach kurzer Zeit (bis zu 15 Minuten) auf die Nennleistung einpendelt.

Beim Ausschalten der KWK-Anlage wird zuerst die Gaszufuhr gedrosselt, sofern die elektrische Leistung über 2,5 kW liegt. Dies wird im normalen Betrieb nicht vorkommen, weil die Anlage schon bei Minimalleistung läuft, bevor sie ausgeschaltet wird. Die Gaszufuhr wird unterbrochen, der Motor geht aus. Zeitgleich öffnet sich das Verteilventil der Rücklauftemperaturhochhaltegruppe, um möglichst viel Wärme aus dem Gerät auszukoppeln. Die Wärmeauskopplung wird noch eine Minute weitergeführt, bis sich Vor- und Rücklauftemperatur angeglichen haben.

#### 5.2.2.3 Modellierung

##### Stationärer Betrieb

Die Messergebnisse des letzten Abschnitts haben gezeigt, dass sowohl die elektrische, die thermische als auch die Brennstoffwärmeleistung von der Rücklauftemperatur unabhängig sind. Dadurch lässt sich der stationäre Betrieb der Ecopower-KWK-Anlage trotz der Modulation relativ einfach modellieren. Als gemeinsame Größe wird die Motordrehzahl  $D$  in Umdrehungen pro Minute (1/min) genutzt, weil diese auch in der Systemregelung des Anlagenherstellers als Führungsgröße dient. Die Abhängigkeiten können als Polynom 2. Grades in Abhängigkeit von  $D$  ausgedrückt werden:

$$P_x(D) = a_x \cdot D^2 + b_x \cdot D + c_x \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Je nach zu bestimmender Leistung wird der entsprechende Satz Parameter aus **Tabelle 5-4** in Gleichung 5-5 eingesetzt.

Die durch die Systemregelung vorgegebene Soll-Vorlauftemperatur wird mithilfe des Verteilventils in der Rücklauftemperaturanhebegruppe eingestellt. Der Volumenstrom innerhalb der KWK-Anlage ist durch den Einsatz einer unregelmäßig arbeitenden Pumpe nahezu konstant, der Volumenstrom von der KWK-Anlage zum Pufferspeicher ergibt sich aus der Stellung des Verteilventils. Damit liegt ein kompletter Funktionssatz für alle Größen im stationären Betrieb der Ecopower-KWK-Anlage vor.

**Tabelle 5-4:** Parameter zur Berechnung der elektrischen, thermischen und Brennstoffwärmeleistung der Ecopower-KWK-Anlage

Leistung	Einheit	x = ...	a <sub>x</sub>	b <sub>x</sub>	c <sub>x</sub>
elektrisch P <sub>el</sub>	kW	el	-7,2 E-8	1,7 E-3	-0,744
thermisch P <sub>th</sub>	kW	th	-2,5 E-10	3,6 E-3	-0,463
Brennstoffwärme P <sub>Gas</sub>	kW	Gas	-1,0 E-7	5,7 E-3	-1,185

### Start- und Stoppverhalten

Nach erfolgtem Startbefehl führt die Ecopower-KWK-Anlage vor dem Anlassen des Motors einen 3-minütigen Systemcheck durch. Bis dahin ist eine Strommenge von 2,3 Wh verbraucht. Die Anlage startet auf eine elektrische Leistung von 2,5 kW, was mit einer gewissen Trägheit verbunden ist. Diese lässt sich mit der Gleichung 5-3 und den Parametern DK = 1,3 und ZK = 17 beschreiben. Es liegt mit dem Start ein Gasverbrauch von 10,5 kW vor. In Abhängigkeit von der Rücklaufftemperatur kann schon jetzt eine thermische Leistung ausgekoppelt werden. Liegt diese über 40 °C, versucht das Verteilventil die geforderte Sollvorlauftemperatur auszuregeln. Je nach vorangegangener Stillstandszeit erhöht sich nach 2 bis 5 Minuten die elektrische Leistung mit einem Gradienten von 1,5 kW/min auf 4 kW (90 % der Nennleistung) und die Brennstoffwärmeleistung auf 16 kW. Nach weiteren 15 Minuten werden die Nennleistungen eingestellt (4,4 kW<sub>el</sub>, 16,8 kW<sub>Gas</sub>). Die thermische Leistung hat nach ca. 18 Minuten 95 % der Nennleistung von 12,5 kW erreicht.

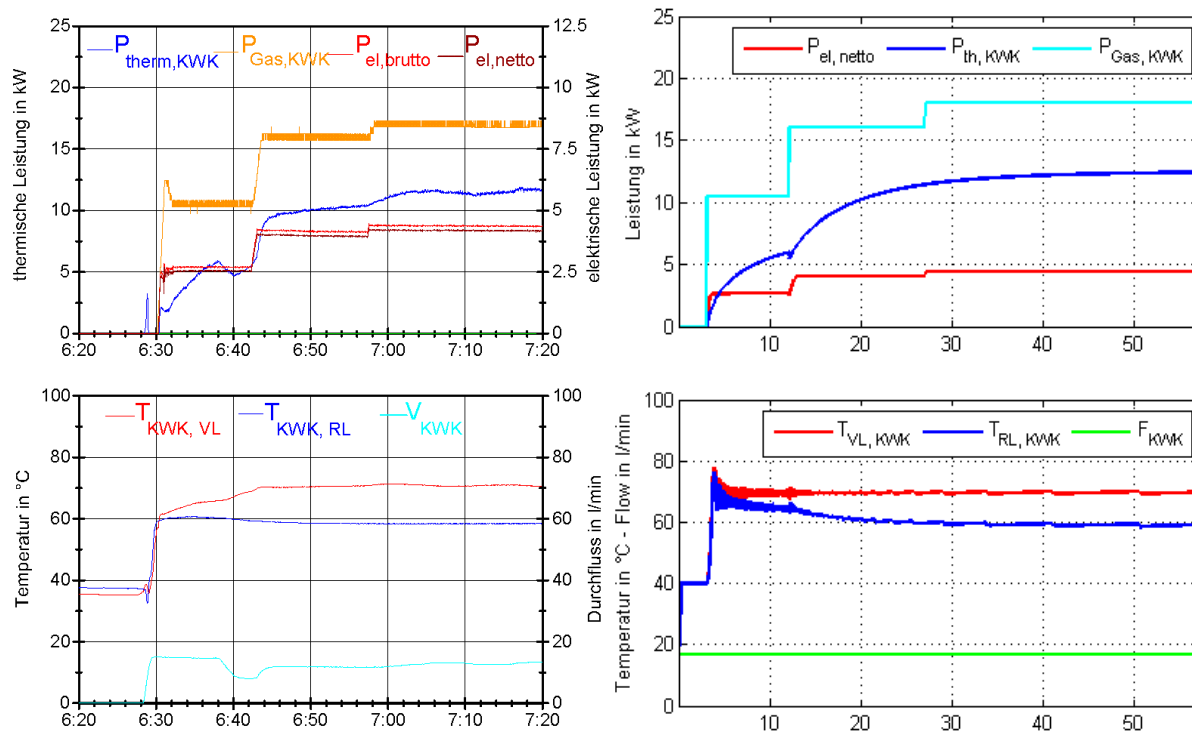
Liegt beim Abschalten der Anlage die elektrische Leistung über 2,5 kW, wird diese mit einem Gradienten von -3 kW/min reduziert und nach 2 Minuten komplett abgeschaltet (P<sub>el</sub> = 0, P<sub>Gas</sub> = 0). Die thermische Leistung erhöht sich im Vergleich zum vorherigen stationären Betrieb und sinkt 3 Minuten nach dem Abschaltsignal auf Null ab.

#### 5.2.2.4 Simulationsergebnisse

Wie bereits im Abschnitt 5.2.1.4 erläutert, wird mithilfe zweier Verfahren kontrolliert, inwieweit die Modellierung die Messungen repräsentiert.

Im ersten Schritt erfolgt eine Auswertung der Momentanwerte. **Abbildung 5-10** zeigt einen Anlagenstart der Ecopower-KWK-Anlage. Wie im letzten Abschnitt beschrieben ist besonders das thermische Startverhalten von der „Vorgeschichte“ der Anlage abhängig. Hier wurde nicht der in /Muehl 07/ dokumentierte Kaltstart verwendet, weil dieser im Praxiseinsatz kaum vorkommt (beim ersten Start, nach Service oder Reparatur), sondern der Start am Sommertag nach einer Stillstandszeit von ca. 5 Stunden.

Im linken Grafiken-Paar sind Messwerte und rechts Ergebnisse der Simulation dargestellt. Der Anstieg der elektrischen Leistung erfolgt bei beiden Darstellungen in zwei Stufen bis zur Nennlast. Der Gasverbrauch steigt proportional zur elektrischen Leistung. Die Temperatur- und Durchflussverläufe sind bei der Messung hinter, bei der Simulation vor der Rücklauftemperaturhochhaltegruppe aufgenommen und zeigen deshalb unterschiedliche aber vergleichbare Charakteristiken. Bei der Simulation ist die Arbeitsweise des Verteilventils am oszillierenden Temperaturverlauf zu sehen.



**Abbildung 5-10:** Anlagenstart der Ecopower-KWK-Anlage: Messung (links) und Simulation (rechts)

Im zweiten Schritt werden für einen definierten Zeitraum die Energiemengen integriert und verglichen. Beim Startvorgang sind hier die ersten 60 Minuten relevant. In **Tabelle 5-5** sind die Energiemengen, die in dieser Zeit verbraucht bzw. erzeugt wurden, aufgeführt. Die Abweichungen der Simulation im Vergleich zu den Messungen liegen im Bereich von +0,3 bis -1,7 %, was für die Belange der Simulation hinreichend genau ist.

**Tabelle 5-5:** Vergleich Messung / Simulation anhand von Energiemengen nach dem Start der Ecopower-KWK-Anlage

	Einheit	Messung	Simulation	Abweichung
<b>Bilanzzeitraum</b>	mm:ss	57:00	57:00	
<b>Abtastrate / Zeitschritt</b>	s	1	1	
<b>Elektrische Energie</b>	kWh	3,643	3,598	-1,2 %
<b>Thermische Energie</b>	kWh	9,098	9,125	+0,3 %
<b>Brennstoffenergie</b>	kWh	14,833	14,573	-1,7 %

### 5.2.3 Stirlingmotor von Solo Stirling

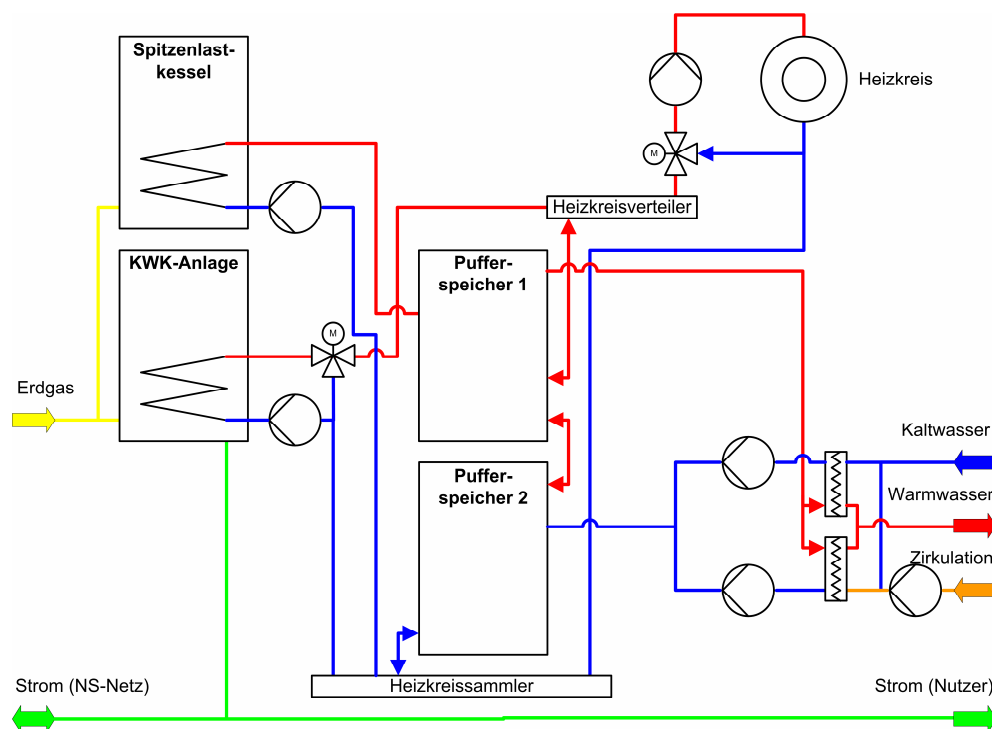
Der Stirlingmotor 161 mikro CHP Modul von Solo ist mit einer Leistung von 7 kW<sub>el</sub> bzw. 22 kW<sub>th</sub> die größte KWK-Anlage, die am Prüfstand vermessen wurde.

Der Stirlingmotor wurde von Solo als ein einfach wirkender 90°-V-Zweizylinder konzipiert (so genannter  $\alpha$ -Typ). Das Arbeitsgas Helium befindet sich im eigentlichen Stirlingprozess

zwischen den Kolbenoberseiten, die über den Erhitzer, Regenerator und Gaskühler miteinander verbunden sind. Hier wird der Kreisprozess mit ständigem Wechsel von Druck und Temperatur durchgeführt. Mithilfe eines FLOX®-Brenners (Flammenlose Oxidation), der trotz hoher Luftvorwärmung und damit gutem feuerungstechnischen Wirkungsgrad geringe Emissionen aufweist, wird dem Erhitzer Wärme zugeführt, man spricht von äußerer Verbrennung. Die weiteren technischen Herstellerangaben sind Tabelle 5-1 zu entnehmen.

### 5.2.3.1 Systembeschreibung

Beim Solo-KWK-System ist das zentrale Element eine Hydraulik-Station von der Firma Orange Energy, an die alle weiteren Elemente angeschlossen werden. Durch die interne Verrohrung der Hydraulik-Station ergibt sich die hydraulische Einbindung, die in **Abbildung 5-11** dargestellt ist.



**Abbildung 5-11:** Hydraulikschema des SOLO-KWK-Systems: geteilter Pufferspeicher, Warmwasserbereitung über Wärmeübertrager (Frischwassertechnologie)

Zwischen Heizkreisverteiler und -sammler sind zwei in Reihe geschaltete Pufferspeicher mit einem Volumen von jeweils 1.000 l und vier Anschlüssen auf verschiedenen Höhen angeschlossen. Um die Temperaturschichtung der Speicher nutzen zu können, sind die folgenden Anschlüsse gewählt worden. Die KWK-Anlage ist direkt an den Heizkreis angeschlossen. Überschüssige Wärme, die nicht im Heizkreis genutzt werden kann, wird auf 1/3-Höhe des ersten Speichers eingespeist. Der Spitzenlastkessel ist mit seinem Vorlauf auf 2/3-Höhe des ersten Speichers angeschlossen. Das Warmwassersystem nutzt die so genannte Frischwassertechnologie, bei der kein Warmwasser bevorratet wird, sondern Trinkwasser über Plattenwärmeübertrager im Moment des Bedarfs erwärmt wird. Der Vorlauf zu den beiden parallel geschalteten Wärmeübertragern ist am obersten Anschluss des ersten Speichers angeschlossen, der Rücklauf der Warmwasserbereitung kehrt in 2/3-Höhe des zweiten Speichers zurück.

Für das Solo-KWK-System konnte kein Modell entwickelt und keine Systemvalidierungen durchgeführt werden, da bis zur Abgabe dieser Arbeit keine Dokumentation des Regelungskonzeptes vorlag. Deshalb kann das Solo-KWK-System in dieser Arbeit leider keine Berücksichtigung finden.

#### **5.2.4 PEM-Brennstoffzelle von Vaillant**

Die PEM-Brennstoffzelle Euro 2 von Vaillant ist ein Prototyp, der im Rahmen eines Feldversuchs mit über 40 Anlagen getestet wurde. Sie kann ihre elektrische Leistung in sechs Stufen zwischen 1,5 und 4,5 kW<sub>el</sub> variieren. Die thermische Leistung liegt zwischen 3,5 und 9,1 kW<sup>12)</sup>.

##### **5.2.4.1 Systembeschreibung**

Das in **Abbildung 5-12** dargestellte Vaillant-KWK-System ist das einzige hier betrachtete System, welches ohne Pufferspeicher auskommt. An dessen Stelle ist eine hydraulische Weiche mit sechs Anschlüssen vorgesehen, an die auf der einen Seite die Brennstoffzelle und der Spitzenlastkessel parallel sowie auf der anderen Seite die Heizkreisverteiler angeschlossen sind. Die in der hydraulischen Weiche möglichen Strömungsverhältnisse werden im Abschnitt 4.2.2.3 diskutiert. Auf der Vorlaufseite der hydraulischen Weiche zum Heizkreisverteiler ist ein Temperaturfühler installiert, der die Regelgröße für die Leistung und den Durchfluss sowohl der KWK-Anlage als auch des Spitzenlastkessels liefert. Ergibt sich eine Vorlauftemperatur in der hydraulischen Weiche, die geringer als der Sollwert aus der Heizkurve bzw. bei der Warmwasserspeicherladung ist, wird in die nächsthöhere Leistungsstufe geschaltet. Über die geregelte KWK-Pumpe kann die Soll-Vorlauftemperatur der Brennstoffzelle eingestellt werden. Erst wenn die Brennstoffzelle mit Nennleistung betrieben wird, erhält der Spitzenlastkessel ein Freigabesignal. Der Spitzenlastkessel kann sich jedoch ohne Leistungsstufung auf die Deckung des fehlenden Wärmebedarfs einregeln.

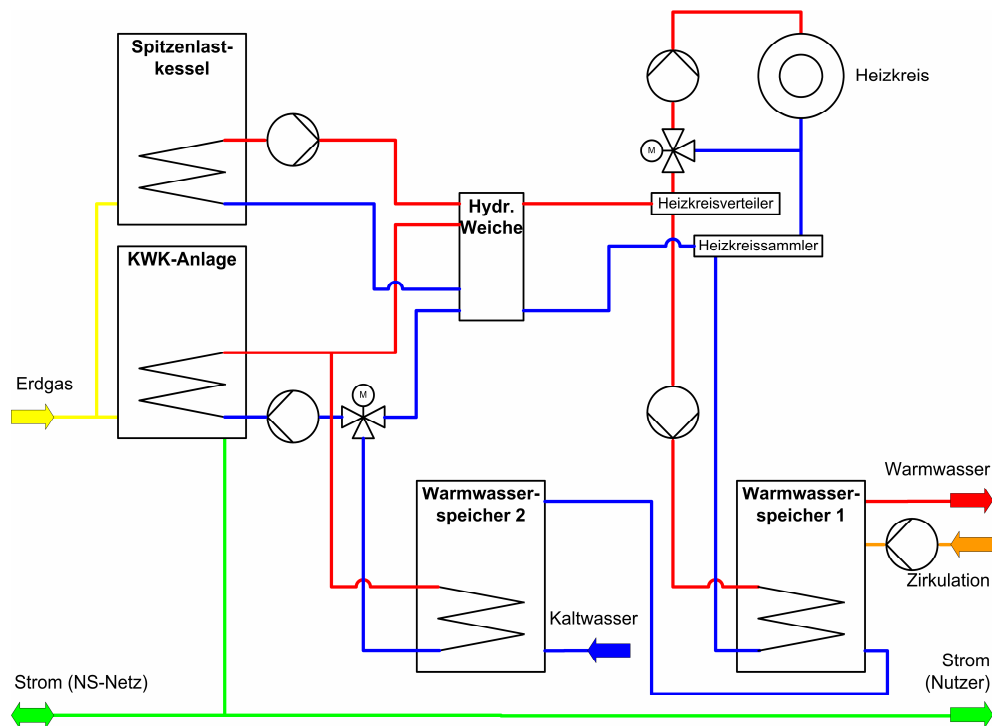
An den Heizkreisverteilern ist neben dem Heizkreis auch der Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 500 l angeschlossen. Als weitere Besonderheit verfügt das System über einen Warmwasser-Vorspeicher. Dies ist auch ein 500 l-Speicher, der dann durch den Vor- und Rücklauf der Brennstoffzelle beladen wird, wenn der Rücklauf der Brennstoffzelle eine Temperatur von 55 °C übersteigt. Mithilfe des Vorspeichers soll die Laufzeit der Brennstoffzelle verlängert werden. Deshalb sollte die Beladung nur mit der kleinsten Leistungsstufe erfolgen. Das im Vorspeicher vorgewärmte Kaltwasser strömt zum Warmwasserspeicher über, aus dem das Warmwasser gezapft wird und die Zirkulation angeschlossen ist. Aufgrund der begrenzten Anzahl möglicher Anlagenstarts wird angestrebt, die Brennstoffzelle nicht auszuschalten. Sollte eine Abschaltung der Brennstoffzelle anstehen, weil der Vorspeicher bereits geladen ist, kann ggf. der erste Warmwasserspeicher nochmals geladen werden. Ein Überladen der Speicher ist nicht möglich, da der Rücklauf der Brennstoffzelle eine Temperatur von 55 °C (bzw. 65 °C für bis zu 30 Minuten am Tag) nicht überschreiten darf.

Die Vaillant-KWK-Anlage wurde nicht am KWK-Prüfstand anhand der dynamischen Tageslastgänge vermessen. Es erfolgte eine messtechnische Untersuchung der PEM-Brennstoffzelle an einem gesonderten Prüfstand, an dem Kalt- und Warmstarts sowie stationäre Lastpunkte gemessen wurden.

---

<sup>12)</sup> bei einer Rücklauftemperatur von 60 °C



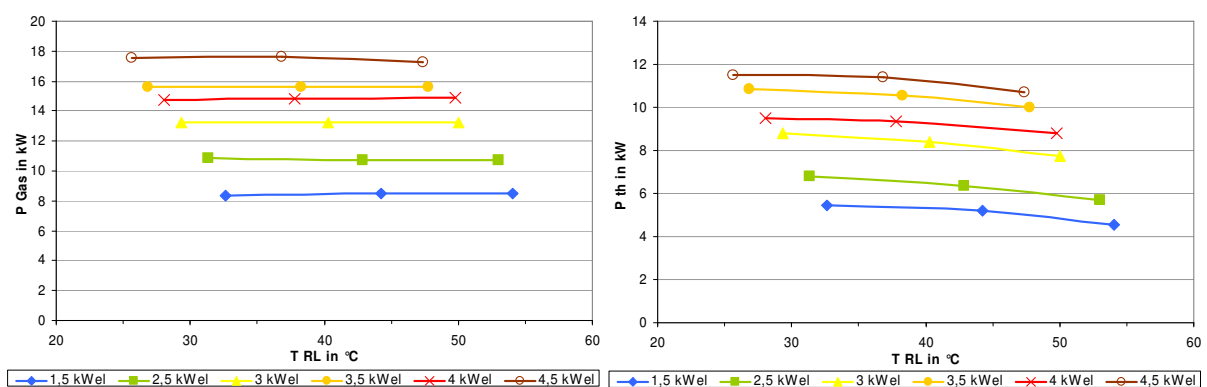


**Abbildung 5-12:** Hydraulikschema des Vaillant-KWK-Systems: hydraulische Weiche für KWK-Anlage und SLK

#### 5.2.4.2 Messergebnisse

##### Stationärer Betrieb

Da die PEM-Brennstoffzelle nur unter stationären Betriebszuständen und das Start-/Stopverhalten vermessen wurde, steht nur ein eingeschränkter Messdatensatz zur Verfügung, der jedoch für die spätere Validierung gut geeignet ist /Muehl 07/. Deshalb muss hier auf die Darstellungsweise der gegenseitigen Abhängigkeiten der Größen in Streudiagrammen verzichtet werden.



**Abbildung 5-13:** Thermische und Brennstoffwärmeleistung in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur der PEM-Brennstoffzelle

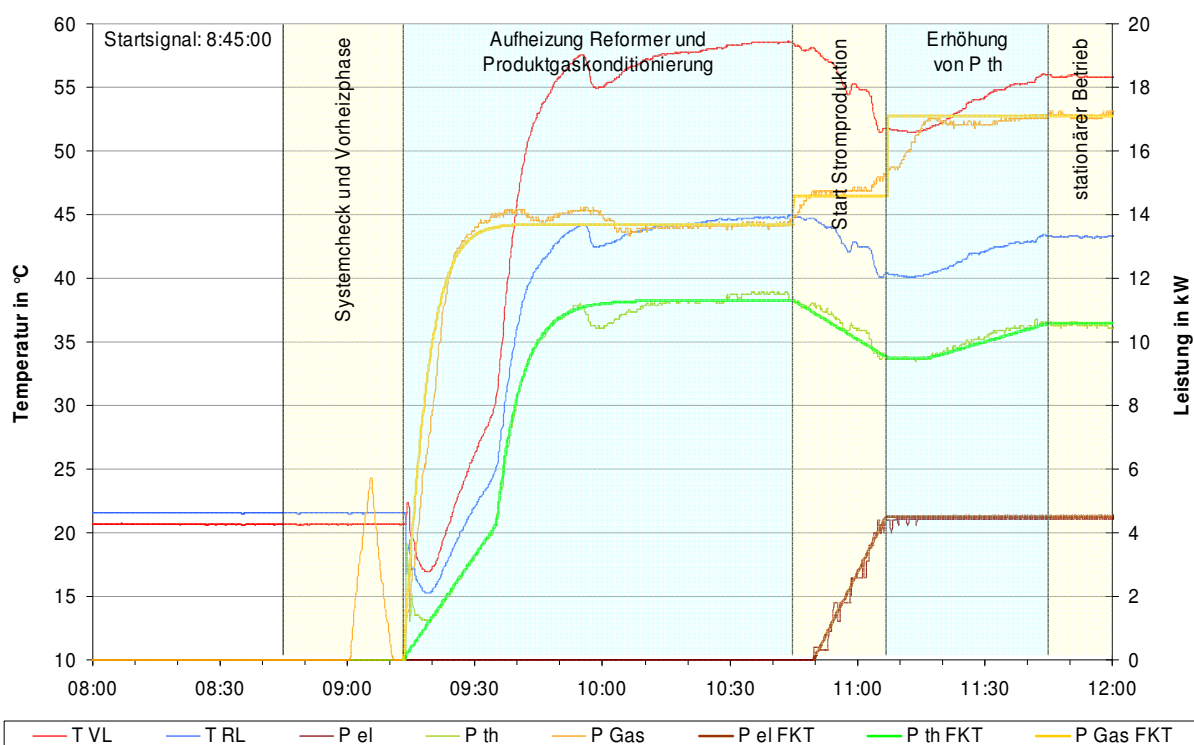
Die Brennstoffzellensteuerung regelt die vorgegebenen elektrischen Leistungsstufen aus. Die Messungen wurden bei einem konstanten Durchfluss von ca. 680 l/h durchgeführt. Die

Wärmeabnahme des Sekundärkühlkreislaufs wurde so einreguliert, dass sich Vorlauftemperaturen von jeweils 40, 50 und 60 °C einstellen.

Anhand der in **Abbildung 5-13** dargestellten Zusammenhänge ergeben sich für jede elektrische Leistungsstufe in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur die zugehörigen thermischen und Brennstoffwärmeleistungen. Auffällig ist dabei, dass der Brennstoffeinsatz bei der 3,5 kW<sub>el</sub>-Stufe höher ist als bei der 4 kW<sub>el</sub>-Stufe. Damit verbunden ist auch eine höhere Wärmeauskopplung trotz geringerer elektrischer Leistung.

### Start- und Stoppverhalten

Die Startprozedur der Brennstoffzelle ist in mehrere Abschnitte unterteilt. Da die Anlage als „Grey Box“<sup>13)</sup> vermessen wurde, können die jeweiligen Ein- und Ausgänge den entsprechenden internen Vorgängen zugeordnet werden.



**Abbildung 5-14:** Kaltstart der PEM-Brennstoffzelle von Vaillant

Zunächst wird ein Systemcheck durchgeführt und die Brennstoffzelle auf den Anlagenstart vorbereitet. Darauf folgt eine Vorheizphase, in welcher der Reformer, in dem aus dem Erdgas ein wasserstoffreiches Gas erzeugt wird, auf seine Arbeitstemperatur von ca. 800 °C gebracht wird. Bis die Produktgasqualität den Anforderungen des Brennstoffzellenstacks genügt, kann ein Teil der Wärme ausgekoppelt und dem Heizsystem zur Verfügung gestellt werden. Beim Kaltstart vergeht eine Zeit von 2,5 Stunden, bis die Brennstoffzelle Strom zur Verfügung stellt. In **Abbildung 5-14** sind diese Phasen mit den gemessenen Werten und den im nächsten Abschnitt entwickelten funktionalen Abbildungen in der Simulation dargestellt.

<sup>13)</sup> Es konnten nur die Ein- und Ausgänge bilanziert werden, durch die auf die internen Vorgänge geschlossen werden kann.

Bei den Messungen wurde nach dem Systemcheck die Umwälzpumpe angeschaltet, sodass ein konstanter Durchfluss zu verzeichnen war. Aus der ankommenden Rücklauftemperatur und der jeweils zur Verfügung stehenden thermischen Leistung ergibt sich die Vorlauftemperatur. Im normalen Betrieb in einem Gebäude und in der Simulation stehen aber auch zu diesem Zeitpunkt schon Solltemperaturen und Vorgaben zur Verfügung, die in der Pumpen-ansteuerung berücksichtigt werden.

Beim Ausschalten der Brennstoffzelle wird die Gaszufuhr unterbrochen, eine elektrische Leistung steht nicht mehr zur Verfügung. Die Umwälzpumpe läuft noch für 7 Minuten nach, um Überhitzungen in der Anlage zu vermeiden. Deshalb kann über diese Zeit noch thermische Leistung ausgekoppelt werden, die bei ca. 85 % der vor dem Ausschalten anliegenden Leistung liegt.

Da die Regelungsstrategie der Vaillant-Brennstoffzelle darauf ausgelegt ist, zunächst alle Speicherkapazitäten des KWK-Systems auszuschöpfen bevor die Brennstoffzelle ausgeschaltet wird, kann davon ausgegangen werden, dass im normalen Betrieb nur Kaltstarts vorkommen.

#### **5.2.4.3 Modellierung**

##### **Stationärer Betrieb**

Alle Zusammenhänge aus Abbildung 5-13 können als Polynome 2. Grades gemäß Gleichung 5-6 in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur in °C ausgedrückt werden.

$$P_x(T_{RL}) = a_x * T_{RL}^2 + b_x * T_{RL} + c_x \quad \text{Gleichung 5-6}$$

Die entsprechenden Parameter sind in **Tabelle 5-6** aufgeführt.

Wie in Abschnitt 5.2.4.1 beschrieben, gibt die Brennstoffzellensteuerung der Anlage je nach Wärmebedarfsanforderung eine Soll-Vorlauftemperatur vor. Der Volumenstrom wird durch eine geregelte Pumpe in gewissen Grenzen so angepasst, dass sich die Soll-Vorlauftemperatur einstellt. Erreicht die Pumpe ihre Maximalleistung (bzw. Minimalleistung), sodass die Solltemperatur überstiegen (bzw. nicht erreicht) wird, muss die Brennstoffzelle in die nächst niedrigere (bzw. höhere) Leistungsstufe schalten. Damit liegt ein kompletter Funktionssatz für alle Größen der Vaillant-Brennstoffzelle im stationären Betrieb vor.

**Tabelle 5-6:** Parameter zur Berechnung der thermischen und Brennstoffwärmeleistung der Vaillant-Brennstoffzelle

Leistungsstufe		Einheit	$a_x$	$b_x$	$c_x$
1,5 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-2,2 E-3	0,15	2,96
	$P_{Gas}$	kW	-5,9 E-4	5,9 E-2	7,06
2,5 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-1,4 E-3	6,3 E-2	6,15
	$P_{Gas}$	kW	7,4 E-4	-7,2 E-2	12,40
3,0 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-1,5 E-3	7,2 E-2	7,98
	$P_{Gas}$	kW	3,0 E-4	-2,5 E-2	13,73
3,5 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-1,3 E-3	6,0 E-2	10,19
	$P_{Gas}$	kW	3,0 E-4	-2,1 E-2	15,96
4,0 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-1,6 E-3	9,4 E-2	8,10
	$P_{Gas}$	kW	-2,8 E-4	2,5 E-2	14,30
4,5 kW <sub>el</sub>	$P_{th}$	kW	-2,8 E-3	0,17	9,07
	$P_{Gas}$	kW	-1,7 E-3	0,11	15,79

### Start- und Stopverhalten

Da die Startprozedur der Brennstoffzelle bis zu 3 Stunden dauert (Startsignal bis Erreichen der thermischen Nennleistung), ist der zeitliche und quantitative Verlauf der relevanten Leistungen der Brennstoffzelle abzubilden.

In der Vorheizphase wird eine Brennstoffmenge von 0,5 kWh benötigt. Die thermische und Brennstoffwärmeleistung während der Reformeraufheizphase zur Produktgaskonditionierung kann mithilfe von Gleichung 5-3 abgebildet werden, wobei die Brennstoffwärmeleistung bei 13,7 kW liegt, die Dämpfungskonstante den Wert  $DK = 1,17$  und die Zeitkonstante  $ZK = 900$  aufweist. Sobald die Brennstoffzelle beginnt, Strom zu produzieren, erhöht sich die Brennstoffwärmeleistung auf 14,6 kW. Sobald die elektrische Nennleistung erreicht wurde, erhöht sich auch die Brennstoffwärmeleistung auf den Nennwert des stationären Betriebs.

Die thermische Leistung ist mit 11,3 kW zunächst höher als im späteren KWK-Betrieb. Sie kann ebenfalls mit Gleichung 5-3 dargestellt werden ( $DK = 1$ ,  $ZK = 350$ ). Zu Beginn der Wärmeauskopplung liegt jedoch noch ein Zeitabschnitt mit der Länge von 28 Minuten und einem linearen Anstieg der thermischen Leistung mit einem Gradienten von 0,193 kW/min bis zu einer Leistung von 4,25 kW<sub>th</sub>. Mit beginnender Stromproduktion reduziert sich die thermische Leistung um -0,082 kW/min auf eine thermische Leistung von 9,5 kW. Erst nach 3 Stunden nimmt die thermische Leistung den Nennwert des stationären Betriebs an. Die elektrische Leistung weist 2,25 Stunden nach dem Startsignal einen linearen Anstieg um 0,26 kW/min bis zum Erreichen der Soll-Nennleistung von 4,5 kW<sub>el</sub> auf. Die Vorlauftemperatur und der Durchfluss ergeben sich nach den im letzten Abschnitt beschriebenen Abhängigkeiten.

#### 5.2.4.4 Simulationsergebnisse

Für die elektrische, thermische und Brennstoffleistung wurden die in Abbildung 5-14 mit dem Index „FKT“ bezeichneten Funktionen implementiert. Deshalb ist die Darstellung zum Ver-

gleich der Messwerte und den Simulationsergebnissen bereits gegeben. Die gewählten Funktionen zeigen zwar nicht jede Eigenart im Verlauf der Messwerte, geben aber eine gute Annäherung wieder.

**Tabelle 5-7:** Vergleich Messung / Simulation anhand von Energiemengen nach Anlagenstart

	Einheit	Messung	Simulation	Abweichung
<b>Bilanzzeitraum</b>	hh:mm	3:15	3:15	
<b>Abtastrate / Zeitschritt</b>	s	10	15	
<b>Elektrische Energie</b>	kWh	4,580	4,602	+0,5 %
<b>Thermische Energie</b>	kWh	26,052	26,273	+0,8 %
<b>Brennstoffenergie</b>	kWh	41,135	41,144	+0,0 %

Für den definierten Zeitraum des Startvorgangs bis zum stationären Betrieb, der bei der Brennstoffzelle mit 3:15 h länger als bei den vorher betrachteten Anlagen ist, werden die Energiemengen verglichen. In **Tabelle 5-7** sind die Energiemengen, die in dieser Zeit verbraucht bzw. erzeugt wurden, aufgeführt. Die Abweichungen der Simulation im Vergleich zu den Messungen liegen im Bereich von 0 bis 0,8 %, was für die Belange der Simulation hinreichend genau ist.

### 5.2.5 Erdgas-Brennwerttherme von Vaillant

In allen zuvor vorgestellten KWK-Systemen kommt als Spitzenlastkessel die Erdgas-Brennwerttherme Ecotec VC 466-E mit 46 kW Nennheizleistung von Vaillant zum Einsatz. Aus der regelungstechnischen Ansteuerung von SenerTec, Ecopower und Solo ergeben sich Unterschiede. Die Regelungen von SenerTec und Solo können den Spitzenlastkessel lediglich freigeben, der dann bei fester Vorlauftemperatur seine maximal mögliche thermische Leistung abgibt, wohingegen bei Ecopower der Spitzenlastkessel mit in die Regelung eingebunden ist. Prinzipiell wäre das beim Brennstoffzellensystem auch möglich gewesen, was allerdings nicht mit Versuchen bestätigt werden konnte.

#### 5.2.5.1 Messergebnisse

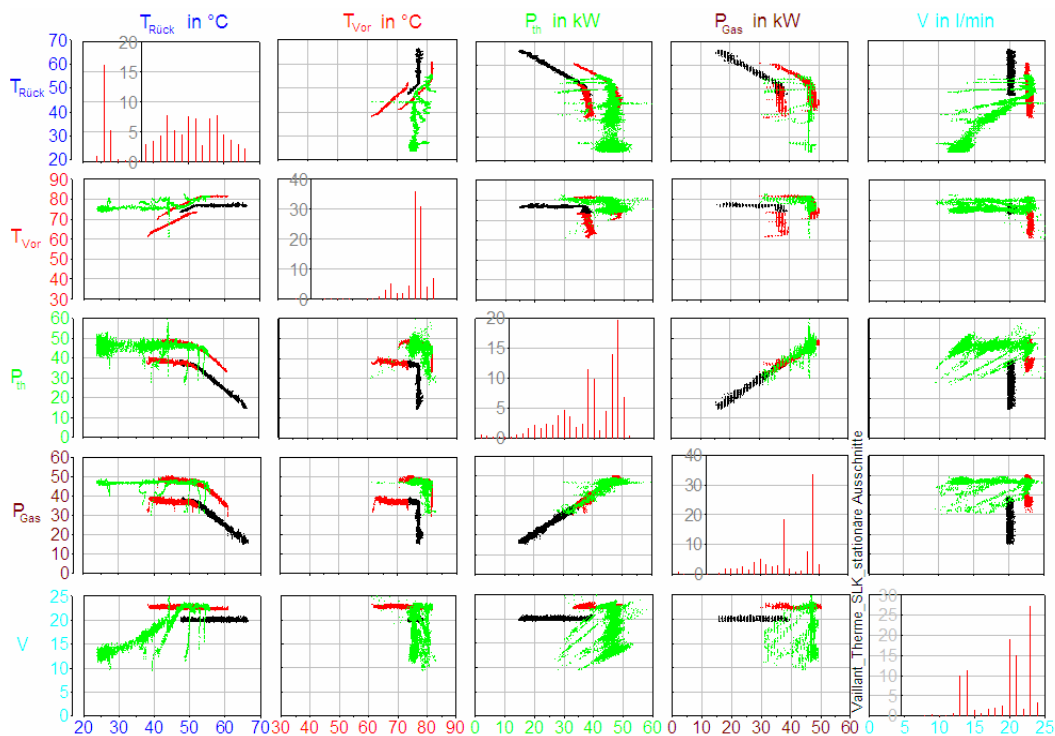
##### Stationärer Betrieb

Die jeweils gegenseitigen Abhängigkeiten der relevanten Messgrößen der Vaillant-Brennwerttherme sind in **Abbildung 5-15** aufgetragen. In den Streudiagrammen wurden nur stationäre Betriebszustände aus den drei Typtagmessungen ausgewertet (SenerTec: schwarz, Ecopower: rot, Solo: grün), die Histogramme beinhalten jedoch alle im Betrieb aufgenommenen Messwerte.

Die Histogramme der Vor- und Rücklauftemperaturen zeigen, dass, obwohl Rücklauftemperaturen über die gesamte Bandbreite von 25 bis 65 °C vorkommen, die Regelungen konstante Vorlauftemperaturen von um die 75 °C bereitstellen können. Die unterschiedlichen Einbindungen der Brennwerttherme in den KWK-Systemen lassen sich in den Messwerten erkennen. Im Pufferspeichervorlauf im SenerTec-KWK-System kommen relativ hohe Temperaturen vor, sodass die Therme bei konstantem Durchfluss ihre Leistung heruntermoduliert. Bei Ecopower ist die Therme an den Pufferspeicher angeschlossen, sodass niedrigere

Rücklauftemperaturen vorkommen. Aufgrund der Ansteuerung der Therme durch die KWK-Systemregelung können unterschiedliche Aufgaben berücksichtigt werden. Warmwasserspeicherladungen werden mit der Maximalleistung unterstützt, im Heizbetrieb wird die Leistung soweit wie möglich heruntermoduliert. Bei der Solo-Einbindung ist die Therme auch an die Pufferspeicher angeschlossen, aufgrund der geringen Unterdimensionierung und der bei der Unterstützung im Heizbetrieb vorliegenden tiefen Rücklauftemperaturen kann die Therme ständig bei Maximalleistung betrieben werden. Die konstante Vorlauftemperatur wird durch die Reduzierung des Durchflusses erreicht.

Für die Beschreibung der Anlagencharakteristik hat sich im Fall der Therme der thermische Wirkungsgrad als hilfreich herausgestellt. Trotz der unterschiedlichen Betriebsbedingungen und der Leistungsmodulation konnten in der Auswertung der Messungen durchgängig hohe Wirkungsgrade verzeichnet werden. Nicht einmal im Teillastbetrieb konnte eine Wirkungsgradverschlechterung festgestellt werden. Eine deutliche Abhängigkeit konnte nur von der Rücklauftemperatur beobachtet werden. Bei Temperaturen, bei denen keine Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes mehr auftritt, ist ein Rückgang des Wirkungsgrades zu verzeichnen.



**Abbildung 5-15:** Streudiagramme der Erdgas-Brennwerttherme von Vaillant

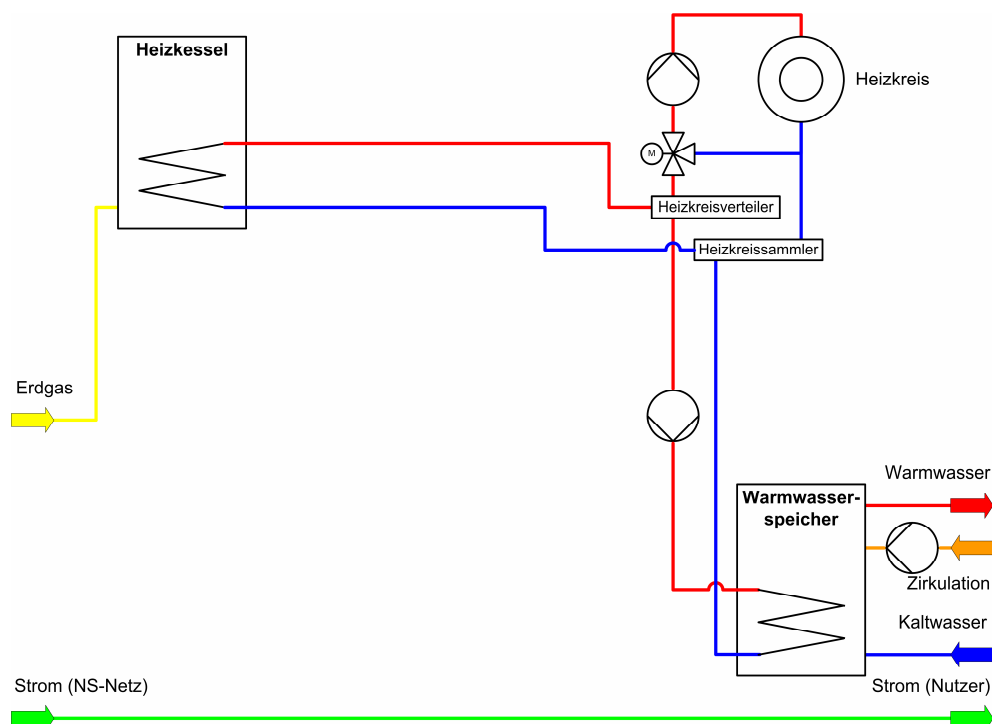
### Start- und Stoppverhalten

Im Vergleich zu den betrachteten KWK-Anlagen ist das thermische Verhalten der Erdgas-Brennwerttherme wesentlich agiler. Beim Anlagenstart wird zunächst ein 30 Sekunden dauernder Systemcheck durchgeführt, bei dem die Umwälzpumpe gestartet und kurzzeitig thermische Energie ausgekoppelt wird. Danach erfolgt die Brennerzündung. Die Therme erreicht nach ca. drei Minuten ihre thermische Leistung im stationären Betrieb.

Beim Ausschalten der Therme werden die Gaszufuhr und der Durchfluss gestoppt. Es erfolgt kein Nachlaufen der Umwälzpumpe, um noch thermische Leistung aus dem Gerät abzuführen.

### 5.2.5.2 Brennwerttherme als konventioneller Heizkessel

Die in den vermessenen KWK-Systemen als Spitzenlastkessel eingesetzte Erdgas-Brennwerttherme wird üblicherweise als konventioneller Heizkessel genutzt. In der in Abschnitt 1 beschriebenen Simulation wurde auch eine Variante mit dieser Beheizungsart abgebildet. Bei der Simulation des konventionellen Heizkessels wurde die in den Messungen zu beobachtende Charakteristik des Wärmeerzeugers grundsätzlich beibehalten, nur die Nennleistung wurde auf die jeweilige Gebäudeauslegungsleistung erhöht.



**Abbildung 5-16:** Referenz: konventionelles Heizsystem

Der Betrieb der Brennwerttherme als alleiniger Wärmeerzeuger erfordert eine Anpassung der Anlagentechnik und des Regelkonzepts. Wie in **Abbildung 5-16** dargestellt, ist die Therme direkt an Heizkreisverteiler und -sammler angeschlossen. Von dort aus wird der Heizkreis bedient und der Warmwasserspeicher geladen. Die Therme wird nicht wie bei den KWK-Systemen von einer eigenen Pumpe mit konstantem Volumenstrom durchflossen, der Durchfluss ergibt sich nun aus dem Volumenstrom der Warmwasserspeicherladung sowie des Heizkreises, wobei hierbei die Stellung des Heizkreismischers berücksichtigt werden muss. Als Temperaturvorgabe dient die Heizkurve bzw. ein hoher Sollwert bei der Warmwasserspeicherladung. Aufgrund fehlender Speichermöglichkeiten im Heizsystem muss die Therme ihre Leistung dem jeweiligen Bedarf durch Modulation anpassen. Liegt der Bedarf unter der Mindestleistung, beginnt die Therme zu takten.

### 5.2.5.3 Modellierung

#### Stationärer Betrieb

Trotz der großen Bandbreite möglicher Betriebsbedingungen lässt sich das Anlagenverhalten der Brennwerttherme sehr einfach beschreiben. Unterhalb der Kondensationsgrenztemperatur liegt ein von der Leistung unabhängiger Wirkungsgrad von 99 % vor. Darüber kann der Wirkungsgradrückgang mit dem Polynom 1. Grades aus Gleichung 5-7 beschrieben werden.

$$\eta_{th} = -0,002 * T_{RL} + 1,093 \quad \text{Gleichung 5-7}$$

Aufgrund der Modellierung über den Wirkungsgrad können sich die übrigen Größen nach den Vorgaben der jeweiligen Anlagensteuerung einstellen.

#### Start- und Stoppverhalten

Die thermische Trägheit der Brennwerttherme beim Anlagenstart lässt sich mit Gleichung 5-8 beschreiben, wobei der Modulationsgrad von der Anlagensteuerung vorgegeben wird, die Dämpfungskonstante DK mit 1,1 und die Zeitkonstante ZK mit 55 angesetzt werden. Aufgrund der geringen Masse bzw. Kesselwasserinhalts der Therme wird jeder Start mit den gleichen Parametern beschrieben.

$$P_{th,SLK}(t) = P_{th,Nenn} * S_{SLK} * \left( 1 - e^{\left( -\left( \frac{t^{DK}}{ZK} \right) \right)} \right) \quad \text{Gleichung 5-8}$$

$S_{SLK}$                       Modulationsgrad (20 bis 100 %)

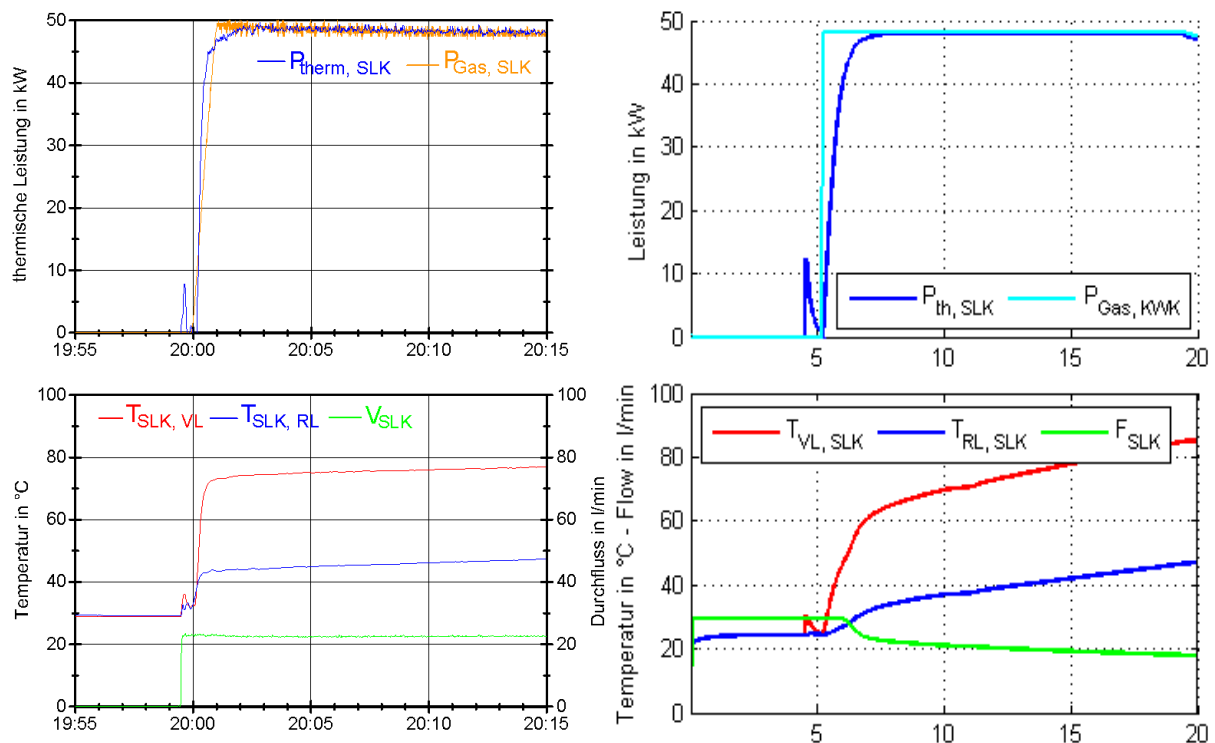
Der Gasverbrauch liegt ab Brennerstart an und wird über den Wirkungsgrad bestimmt.

### 5.2.5.4 Simulationsergebnisse

Die Kontrolle, in wie weit die Modellierung die Messungen repräsentiert, erfolgt im ersten Schritt durch die Auswertung der Momentanwerte. **Abbildung 5-17** zeigt einen Start der Vaillant-Brennwerttherme auf der linken Seite als Messung und rechts als Simulation.

Nach einer kurzen Leistungsspitze ist das schnelle Erreichen der thermischen Nennleistung nach ca. 3 Minuten bei hoher Effizienz in beiden Fällen dargestellt.





**Abbildung 5-17:** Start der Vaillant-Brennwerttherme: Messung (links) und Simulation (rechts)

Im zweiten Schritt werden für den definierten Zeitraum von 15 Minuten die Energiemengen integriert und verglichen. In **Tabelle 5-8** sind die Energiemengen, die in dieser Zeit verbraucht bzw. erzeugt wurden, aufgeführt. Die Abweichungen der Simulation im Vergleich zu den Messungen liegen im Bereich von 0,5 bis 1,9 %, was für die Belange der Simulation hinreichend genau ist.

**Tabelle 5-8:** Vergleich Messung / Simulation anhand von Energiemengen nach Anlagenstart der Vaillant-Brennwerttherme

	Einheit	Messung	Simulation	Abweichung
<b>Bilanzzeitraum</b>	mm:ss	15:00	15:00	
<b>Abtaste / Zeitschritt</b>	s	1	1	
<b>Thermische Energie</b>	kWh	11,380	11,435	+0,5 %
<b>Brennstoffenergie</b>	kWh	11,649	11,868	+1,9 %

### 5.3 Validierung der Anlagentechnik

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten der Elemente untereinander und der Detailtiefe der Simulation wurde nicht das KWK-System als Ganzes sondern die einzelnen Komponenten für sich validiert. Für jedes Element ist ein Modell mit einem Satz parametrisierter Funk-

tionen hinterlegt, deren Parameter wenn möglich anhand der Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen oder mit Hilfe empirischer Verfahren bestimmt werden.

### **5.3.1 Wärmespeichermodell**

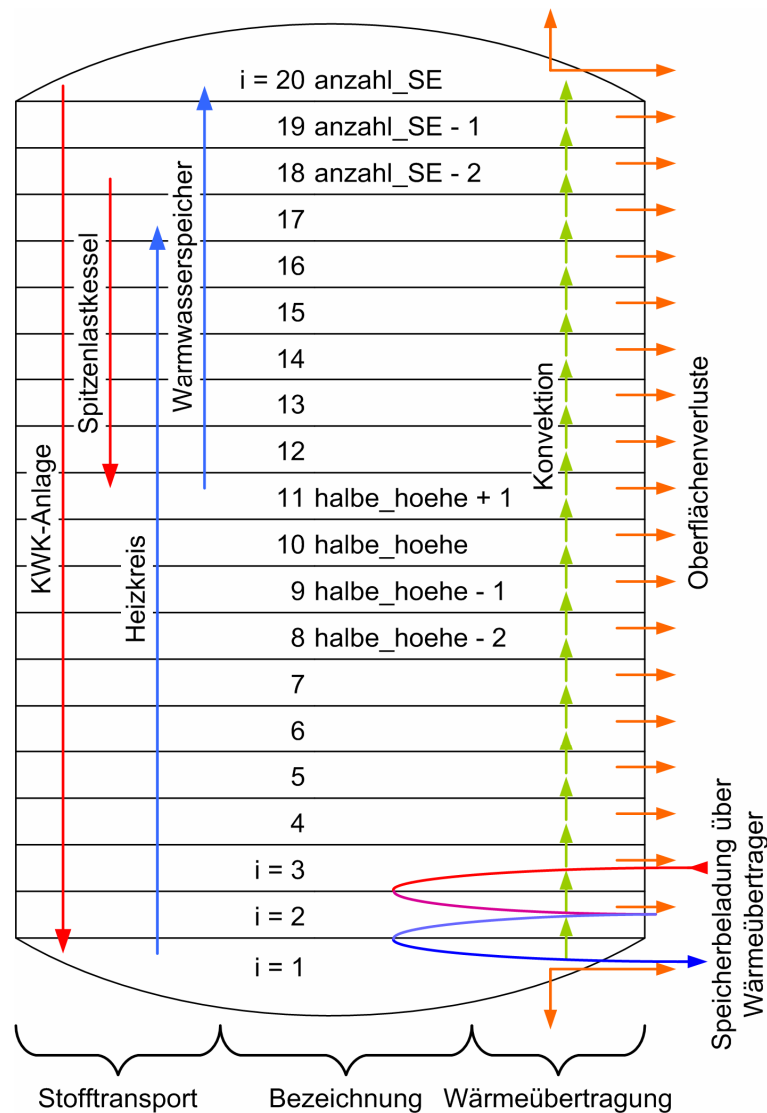
In den KWK-Systemen werden sowohl Heizungspufferspeicher als auch Warmwasserspeicher eingesetzt. Das Modell des Wärmespeichers kann beide Speichertypen abbilden. Prinzipiell werden die Speicher in der Simulation mit Energieströmen be- bzw. entladen und dienen der Energiespeicherung. Aufgrund der Anforderung, dass aber die ein- und ausgehenden Energien temperaturbehaftete Stoffströme sind, muss das Wärmespeichermodell die Temperaturen an den jeweiligen Anschlüssen bereitstellen können.

#### **5.3.1.1 Beschreibung**

Für alle im KWK-System genutzten Wärmespeicher wird dasselbe Simulationsmodell mit 20 horizontalen Schichten genutzt. Trotz der verschiedenen Beladungsmöglichkeiten (Stoffaustausch bzw. Wärmeübertragung) und unterschiedlichen dynamischen Anforderungen hat sich dieses Modell als sehr leistungsfähig bewiesen und stellt einen guten Kompromiss aus Realitätsabbildung und Inanspruchnahme von Rechenleistung dar. Das Modell besteht aus 20 gleichgroßen Schichten, um eine vertikale Temperaturverteilung im Speicher darstellen zu können. Die Speicherschichten sind von unten angefangen durchnummeriert ( $i = 1..20$ ). Um eine Flexibilität in der Anzahl der Speicherschichten zu erhalten, wurden die oberste Schicht mit „anzahl\_SE“ und die mittlere mit „halbe\_hoehe“, die sich aus der Anzahl der Speicherschichten errechnet, bezeichnet. Die Speicheranschlüsse auf unterschiedlichen Höhen werden relativ zu diesen Schichten angegeben.

Im Speichermodell werden zwei verschiedene Transportmechanismen berücksichtigt. Beim Stofftransport werden Massenströme in verschiedenen Kreisläufen im KWK-System durch den Wärmespeicher von Schicht zu Schicht durchgetauscht. In **Abbildung 5-18** sind dies als Wärmeerzeuger die KWK-Anlage und der Spitzenlastkessel (rote Pfeile) sowie als Wärmeabnehmer der Heizkreis und der Warmwasserspeicher (blaue Pfeile) auf der linken Seite, die in unterschiedlichen Höhen am Speicher angeschlossen sind. Der zweite Mechanismus beschreibt den Wärmetransport, der auf Konvektion beruht. Dies kommt zustande, wenn zwei übereinander liegende Schichten unterschiedliche Temperaturen und damit auch einen Dichteunterschied aufweisen.

Die Relevanz des Wärmetransports ist bei geringem Stofftransport (geringer oder kein Durchfluss im Speicher) größer. Als Kombination der beiden Mechanismen kann die Speicherbeladung über einen Heizwendelwärmeübertrager in den untersten drei Schichten betrachtet werden, wie sie im Warmwasserspeicher implementiert ist. Der Stofftransport des Beladungskreises erzielt eine Erwärmung der untersten drei Schichten, die mithilfe der Wärmeübertragung in höhere Speicherschichten vordringt.



**Abbildung 5-18:** Stoff- und Wärmetransport im Speichermodell

### 5.3.1.2 Modellierung

Bei der Be- bzw. Entladung der Wärmespeicher wird der Volumenstrom zwischen den Anschlüssen des Erzeuger- bzw. Abnehmerkreises durchgetauscht. Dabei wird die Mischtemperatur zwischen der Schicht und dem einströmendem Wasser gebildet und ein entsprechendes Volumenelement mit der alten Schichttemperatur weiter nach unten bzw. oben weitergereicht. Diese Prozedur erfolgt für jeden einzelnen Be- und Entladungskreis.

Der in der Realität parallel ablaufende Stoffaustausch bei gleichzeitiger Be- und Entladung wird innerhalb eines Simulationsschrittes in einzelne Vorgänge aufgeteilt, die sukzessive abgearbeitet werden. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise nach erfolgter Entladung die Beladung auf der Grundlage von zu kalten Speicherschichtentemperaturen erfolgt und deshalb geringe Fehler von unter einer Wattsekunde pro Zeitschritt<sup>14)</sup> auftreten, die sich aber über einen Tag zu relevanten Fehlenergiemengen aufsummieren können. Aus diesem Grund wird für jeden Speicher eine eigene Energiebilanz für jeden Zeitschritt aufgestellt, in welcher der Energieinhalt des Speichers zu Anfang des Zeitschritts, ein- und ausgehende

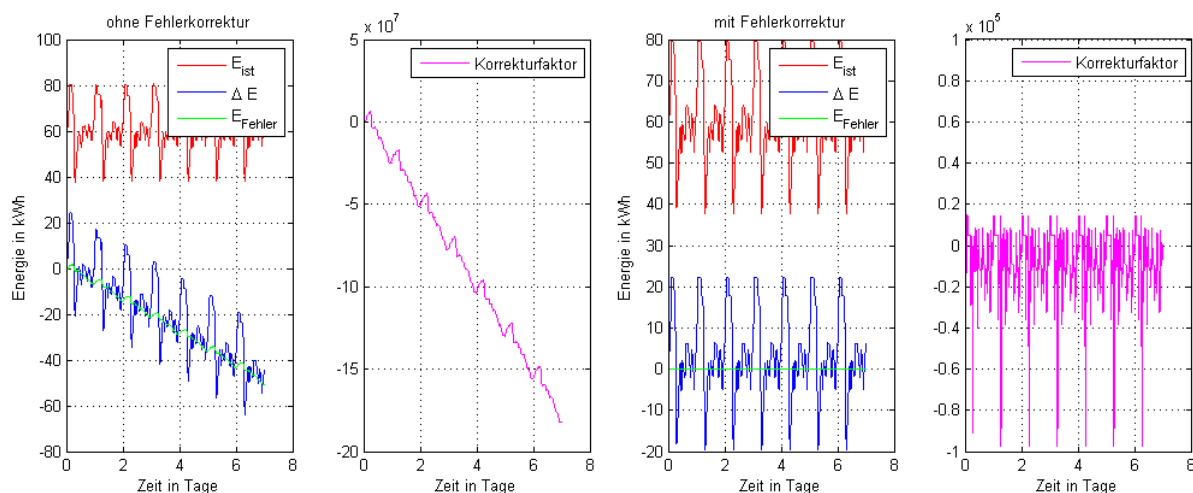
<sup>14)</sup> Fehler bei einem gewählten Zeitschritt der Simulation von 15 Sekunden

Energieströme, die Speicherverluste und der Energieinhalt des Speichers am Ende des Zeitschritts berücksichtigt werden. Sollte eine Abweichung in der Energiebilanz auftreten, so werden am Ende des Zeitschritts die Temperaturen der einzelnen Speicherschichten entsprechend korrigiert. Somit erfolgt eine zum Fehler proportionale Korrektur über einen Faktor, der in seiner absoluten Höhe begrenzt werden kann.

### 5.3.1.3 Simulationsergebnisse

Die Notwendigkeit einer Fehlerkorrektur in den Speichermodellen wurde im letzten Abschnitt erörtert, deren Funktionsweise lässt sich mithilfe der **Abbildung 5-19** erklären.

Dort wurde ein Pufferspeicher jeweils über einen Zeitraum von sieben Tagen mit aus- (linkes Grafiken-Paar) bzw. eingeschalteter Fehlerkorrektur (rechtes Grafiken-Paar) betrieben. Die roten Kurven beschreiben den Speicherinhalt, der sich aus den Speichertemperaturen errechnen lässt. Die blauen Kurven stellen die Differenz aus Be- und Entladeenergien dar. Hier ist in der linken Grafik zu sehen, dass sich über die sieben simulierten Tage ein kontinuierlicher Energieverlust im Speicher ergibt, der durch die grüne Kurve repräsentiert wird. Der in der zweiten Grafik pink dargestellte notwendige Korrekturfaktor summiert sich bei ausgeschalteter Fehlerkorrektur immer weiter auf.

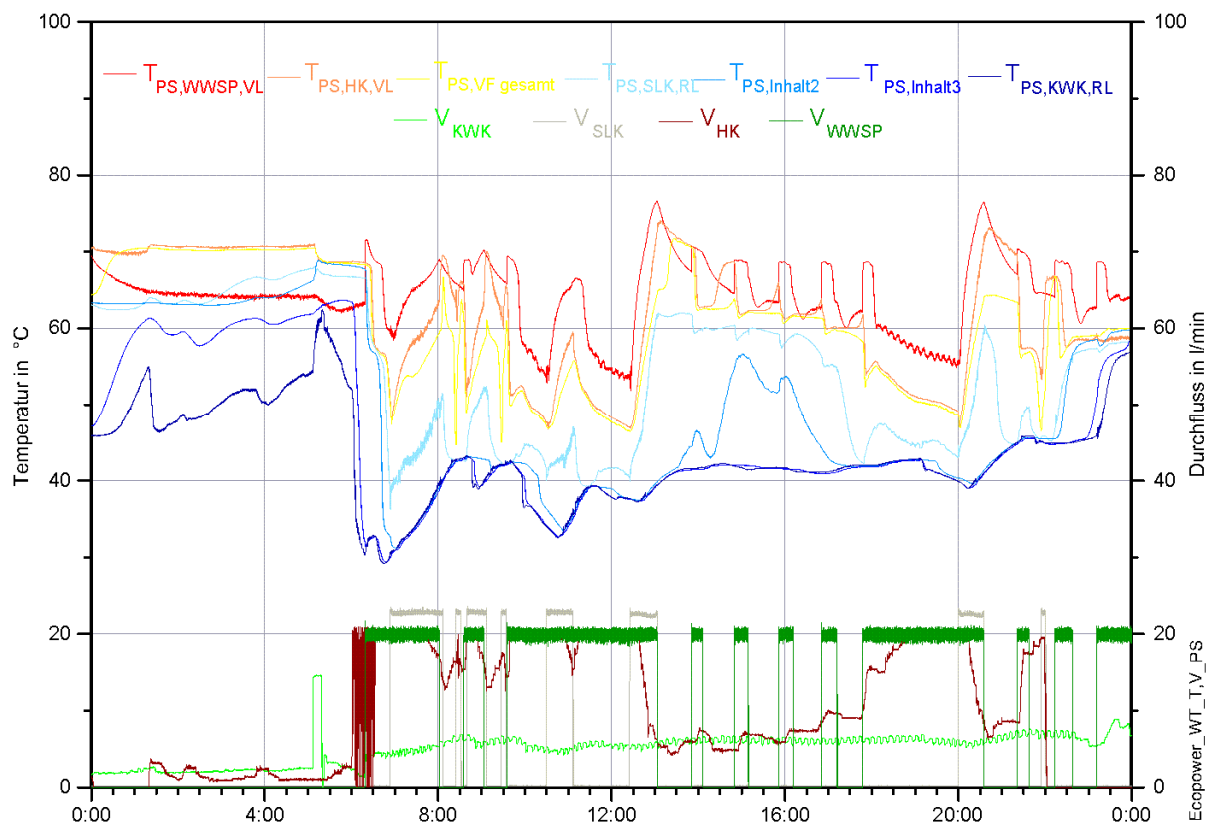


**Abbildung 5-19:** Simulation des Speichers mit aus- und eingeschalteter Fehlerkorrektur

Die beiden Grafiken auf der rechten Seite der Abbildung 5-19 veranschaulichen die Wirkung der Fehlerkorrektur. Die Energiedifferenz (blaue Kurve) pendelt um die Nullachse, eine Fehlenergie ist nicht vorhanden. Der Korrekturfaktor bleibt in einem Band von  $0,2 \cdot 10^5$  bis  $-1 \cdot 10^5$ .

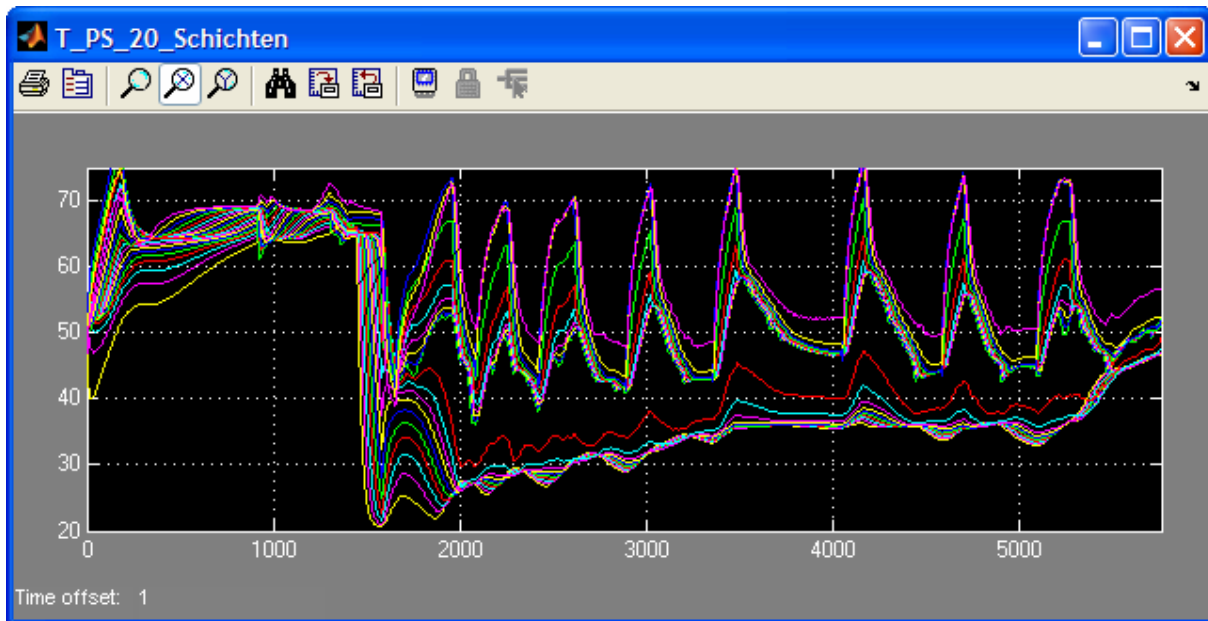
Die Funktionsweise des Speichermodells im KWK-System lässt sich mithilfe eines Vergleichs zwischen Messung und Simulation demonstrieren. Dafür wurde die Wintertag-Messung am Ecopower-KWK-System in **Abbildung 5-20** dahingehend ausgewertet, dass die Pufferspeichertemperaturen von drei Temperaturfühlern, die beiden Rückläufe der Wärmeerzeuger und die beiden Vorläufe der Wärmeabnehmer aufgetragen wurden. Da diese alle auf unterschiedlichen Höhen des Speichers (vgl. Abbildung 5-7) aufgenommen werden, lässt sich ein gutes Bild der Temperaturverteilung im Speicher zeichnen. Zu erkennen ist eine Temperaturschichtung mit einer Spreizung zwischen 8 und 40 K. Zu Beginn des Tagbetriebs fallen die Temperaturen im unteren Drittel ( $T_{PS,Inhalt2}$  bis  $T_{PS,KWK,RL}$ ) bis ca. 30 °C

und bleiben bis zum Mittag eng beieinander. Erst dann setzt sich die Erwärmung des Speichers in das untere Drittel fort. Als Maximaltemperaturen werden oben im Speicher Werte bis 75 °C erreicht.



**Abbildung 5-20:** Temperaturschichtung des Pufferspeichers bei der Ecopower-Wintertag-Messung

Eine sehr ähnliche Charakteristik lässt sich auch im simulierten Pufferspeicher in **Abbildung 5-21** erkennen. Hier sind auf der Ordinate die Temperaturen in °C der 20 Speicherschichten in einem Zeitschritt von 15 Sekunden über einen Tag (= 5.760 Zeitschritte) aufgetragen. Sowohl die enge Spreizung vor Beginn des Tagbetriebs, die große Spreizung im Tagbetrieb als auch der geringe Temperaturunterschied der unteren Schichten ist mit dem gewählten Speichermodell darstellbar. Nur die größere Häufigkeit von Warmwasserspeicherladungen in der Messung kann nicht erkannt werden.



**Abbildung 5-21:** Temperaturschichtung des Pufferspeichers bei der Simulation eines Wintertags mit dem Ecopower-KWK-System

### 5.3.2 Wärmeverteilungsmodell

Die in Abschnitt 4.2.2.3 beschriebenen Elemente der Wärmeverteilung lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien unterteilen.

Einerseits sind dies Elemente mit der Funktion, Energieströme zu verteilen und/oder zu vereinigen, die nicht verlustbehaftet sind. Sie verfügen über mehrere Anschlüsse, an denen Durchflüsse mit den dazugehörigen Temperaturen übergeben werden. Je nach Aufgabe werden Mischtemperaturen errechnet bzw. Volumenströme aufgeteilt. Dazu gehören Heizkreisverteiler, Mischer, Verteil- und Mischventile sowie die hydraulische Weiche. Alle Elemente wurden eingehend getestet und die ein- und ausgehenden Energieströme bilanziert, sodass diese fehlerfrei funktionieren.

Andererseits werden Rohre zur Verbindung der einzelnen Komponenten verwendet. Die Verluste gegenüber der Umgebung werden in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und -länge berechnet. Daraus ergeben sich Temperaturdifferenzen zwischen ein- und ausströmendem Wasser. Leider sind die Messungen am KWK-Prüfstand nicht geeignet, um das Rohrmodell zu kalibrieren. Die potenziell höheren Verluste der dort für den Messaufbau notwendigen längeren Rohrleitungen wurden durch dickere Rohrdämmung teilweise kompensiert. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Temperaturdifferenzen von verschiedenen Rohren meist zwischen 0,5 und 1 K lagen. Durch die teilweise sehr kurzen Rohrleitungen mit zwar geringerer Dämmstärke zwischen den Komponenten in realen KWK-Systemen liegen die dort auftretenden Verluste unter denen am Prüfstand.

Des Weiteren kommen Pumpen zum Einsatz, deren Hauptaufgabe die Bereitstellung eines Volumenstroms ist. Die Abbildung des Strömungswiderstandes in den Rohrleitungen ist nicht Bestandteil der Simulation.

## 5.4 Validierung des Systems - Energiemengen auf Tagesbasis

Unter der Vorgabe der gleichen Anlagen-Parameter und Lastgänge für den Raumwärme- und Warmwasserbedarf, die auch bei den messtechnischen Untersuchungen am KWK-Prüfstand verwendet wurden, kann die Simulation nun das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des KWK-Systems zeigen. Die jeweils verbrauchten bzw. erzeugten Energiemengen können gegenüber gestellt werden.

### SenerTec

Für die Validierung des SenerTec-KWK-Systems anhand von Tagesenergiemengen sind in **Tabelle 10-8** im Anhang die gewählten Einstellungen und Anlagenparameter aufgelistet. Diese Einstellungen bei der Validierungssimulation stimmen mit den Einstellungen am KWK-Prüfstand überein.

**Tabelle 5-9:** Vergleich der Tagessummen des SenerTec-KWK-Systems aus Messungen<sup>15)</sup> /Muehl 07/ und der Simulation

		Wintertag			Übergangstag			Sommertag		
	Einh.	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %
<b>KWK</b>										
$Q_{BS,KWK}$	kWh/d	372,1	378,4	+1,7	252,4	237,1	-6,0	172	120,8	-30,0
$Q_{el,KWK}$	kWh/d	99,6	101,2	+1,6	67,8	63,4	-6,5	45,7	32,2	-29,5
$Q_{th,KWK}$	kWh/d	250,2	254,3	+1,6	163,1	158,3	-2,9	106,6	78,5	-26,4
$g_{el,KWK}$	%	26,8	26,7	-0,2	26,9	26,7	-0,7	26,6	26,6	0
$g_{th,KWK}$	%	67,2	67,2	0	64,6	66,7	+3,3	62,0	64,9	+4,4
$g_{gesamt,KWK}$	%	94,0	93,9	-0,1	91,5	93,5	+1,4	88,6	91,6	+3,0
<b>SLK</b>										
$Q_{BS,SLK}$	kWh/d	128,5	125,1	-2,6	0	0	-	0	0	-
$Q_{th,SLK}$	kWh/d	121,8	120,7	-0,9	0	0	-	0	0	-
$g_{th,SLK}$	%	94,8	96,4	+1,7	-	-	-	-	-	-
<b>Verbraucher</b>										
$Q_{Heizkreis}$	kWh/d	272,9	272,9	0	55,6	55,6	0	0	0	-
$Q_{WWSP-Lad.}$	kWh/d	66,4	63,4	-4,5	64,3	63,1	-1,9	67,3	64,7	-3,9
$Q_{Zirkulation}$	kWh/d	28,1	28,1	0	28,2	27,9	-1,0	28,2	29,4	+4,3
$Q_{Zapfenergie}$	kWh/d	33,0	32,7	-0,9	33,0	32,6	-1,2	33,0	32,7	-0,9

**Tabelle 5-9** zeigt die Ergebnisse der Validierung für das SenerTec-KWK-System. Dabei zeigt sich, dass die Nutzungsgrade der KWK-Anlage am Wintertag gut übereinstimmen, am Übergangs- und Sommertag aber nicht die Werte der Messungen repräsentieren. Der Unterschied liegt in der Häufigkeit der Starts, die in der Simulation wohl zu positiv abgebildet

<sup>15)</sup> Werte aus den Messungen mit Heizkreismischer

ist. Die Energiemengen am Winter- und Übertagtag passen hinreichend genau mit den Messungen überein. Ein Missverhältnis zeichnet sich allerdings am Sommertag ab. Hier liegen die verbrauchten bzw. produzierten Energiemengen deutlich um bis zu 30 % unter den Messwerten. Da die simulierten Werte eigentlich plausibel sind (von 78,5 kWh Wärme-erzeugung kommen 64,7 kWh im WWSP an) besteht hier weiterer Abstimmungsbedarf.

### Ecopower

Für die Validierung des Ecopower-KWK-Systems anhand von Tagesenergiemengen sind in **Tabelle 10-9** im Anhang die gewählten Einstellungen und Anlagenparameter aufgelistet. Diese Einstellungen bei der Validierungssimulation stimmen mit den Einstellungen am KWK-Prüfstand überein.

Bei Ecopower wurden zwar die aus den Messungen vorgegebenen Nutzungsgrade am Wintertag gut wiedergegeben, jedoch fällt die Aufteilung der Erzeugung auf KWK-Anlage und Spitzenlastkessel am Winter- und Übertagtag zugunsten des Spitzenlastkessels aus. Am Sommertag tritt das bereits bei Senertec beobachtete Problem auf. In der Simulation kommen von der produzierten Wärme in Höhe von 73 kWh ca. 63 kWh im WWSP an, die fehlenden 10 kWh sind PS-Verluste. Für die Deckung des Warmwasserbedarfs reicht tagsüber der Betrieb bei Minimallast aus. Dadurch werden in der Simulation nur geringere Nutzungsgrade erreicht.

**Tabelle 5-10:** Vergleich der Tagessummen des Ecopower-KWK-Systems aus Messungen /Muehl 07/ und der Simulation

		Wintertag			Übertagtag			Sommertag		
	Einh.	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %	Mess.	Sim.	$\Delta$ in %
<b>KWK</b>										
$Q_{BS,KWK}$	kWh/d	351,3	307,9	-12,4	237,1	163,4	-31,1	164,6	118,6	-27,9
$Q_{el,KWK}$	kWh/d	84,5	73,9	-12,7	55,3	36,8	-33,5	37,6	24,6	-34,6
$Q_{th,KWK}$	kWh/d	234,9	205,3	-2,6	158,0	106,2	-32,8	109,5	75,6	-31,0
$g_{el,KWK}$	%	24,0	24,0	0	23,3	22,5	-3,4	22,9	20,7	-9,6
$g_{th,KWK}$	%	66,9	66,7	-0,3	66,7	65,0	-2,5	66,5	63,7	-4,2
$g_{gesamt,KWK}$	%	90,9	90,6	-0,3	90,0	87,5	-2,8	89,4	84,5	-5,5
<b>SLK</b>										
$Q_{BS,SLK}$	kWh/d	146,5	175,9	+20,1	19,2	42	+118	0	0	-
$Q_{th,SLK}$	kWh/d	143,3	170,2	+18,8	18,0	40	+122	0	0	-
$g_{th,SLK}$	%	97,8	96,8	-1,0	93,8	94,3	+0,5	-	-	-
<b>Verbraucher</b>										
$Q_{Heizkreis}$	kWh/d	271,8	272,9	+0,4	57,6	55,6	-3,5	0	0	-
$Q_{WWSP-Lad.}$	kWh/d	65,6	63,5	-3,2	66,1	64,8	-2,0	63,8	62,8	-1,6
$Q_{Zirkulation}$	kWh/d	29,0	27,9	-3,8	29,3	28,7	-2,0	29,7	27,3	-8,1
$Q_{Zapfenergie}$	kWh/d	33,0	32,9	-0,3	33,0	33,0	0	33,0	32,9	-0,3



### Solo und Vaillant

Für die KWK-Systeme mit dem Solo-Stirlingmotor und der Vaillant-Brennstoffzelle konnten keine Systemvalidierungen anhand von Tagesenergiemengen durchgeführt werden, was unterschiedliche Ursachen hat: Beim Solo-KWK-System lag keine Dokumentation des Regelungskonzeptes vor, sodass eine Parametereinstellung schwierig war. Die Vaillant-Brennstoffzelle wurde als Anlage und nicht im System vermessen, sodass Aussagen über das Systemverhalten fehlen.

## 5.5 Zusammenfassung der Validierung

Für die einzelnen Energieerzeugungsanlagen konnten Modelle entwickelt und mithilfe der messtechnischen Untersuchungen (/Muehl 07/) Kennlinien für alle relevanten Parameter erstellt werden. Anhand von Startvorgängen und der Tagesbilanzen der jeweils drei Typtage wurden die Modelle des SenerTec- und Ecopower-KWK-Systems validiert und kalibriert. Dabei fielen folgende Punkte auf:

- Bei den Energiemengen vom Start bis zum Erreichen des stationären Betriebs konnten für alle berücksichtigten Anlagen gute Übereinstimmungen mit Abweichungen von unter +/-2 % erreicht werden.
- Die Validierung auf Tagessummenbasis hat bei SenerTec zu sehr guten Ergebnissen sowohl bei den Nutzungsgraden als auch bei der Aufteilung der Erzeugung auf KWK-Anlage und Spitzenlastkessel geführt. Die Differenzen bei der Simulation des Sommertags konnten plausibilisiert werden.
- Bei Ecopower wurden zwar die aus den Messungen vorgegebenen Nutzungsgrade bei höheren Leistungen gut erreicht, jedoch fällt die Aufteilung der Erzeugung auf KWK-Anlage und Spitzenlastkessel am Winter- und Übergangstag zugunsten des Spitzenlastkessels aus. Auch bei Ecopower sind Differenzen bei der Simulation des Sommertags zu verzeichnen, die aber wie bei SenerTec plausibilisiert werden konnten.

Zum Abschluss der Validierung wurden Jahressimulationen mit den KWK-Systemen von SenerTec und Ecopower durchgeführt. Als Gebäude wurde das bekannte MFH-10 hinterlegt, dessen Jahresraumwärmelastgänge mithilfe eines in /Beer 05/ entwickelten Programms erzeugt wurden. In **Tabelle 5-11** sind die in /Muehl 07/ von den gemessenen Typtagen auf Jahressummen hochgerechneten Energiemengen und Nutzungsgrade, die Ergebnisse der Jahressimulationen sowie deren jeweilige Differenzen enthalten. Zunächst lassen sich die Nutzungsgrade der KWK-Anlagen vergleichen. Diese weichen in der Simulation zwischen -1,9 und 2,9 % von den Nutzungsgraden der Messungen ab. Für beide Systeme lässt sich feststellen, dass die Energieerzeugung der KWK-Anlagen in der Simulation um 2,8 bis 8,2 % zu gering ausfällt. Da die durch die KWK-Anlagen nicht erbrachten Wärmeenergiemengen die Spitzenlastkessel ausgleichen, liegt die Wärmeproduktion der Spitzenlastkessel dementsprechend um 20,6 bzw. 31,3 % höher als in den Hochrechnungen ausgewiesen.

Als zusätzliche Angabe lassen sich aus der Simulation sowohl die Laufzeiten als auch die Vollbenutzungsstunden aus der Simulation auslesen. Diese liegen bei der SenerTec-KWK-Anlage aufgrund des Ein/Aus-Betriebs bei sehr ähnlichen Werten von  $t_{\text{Laufzeit,KWK}} = 4.690 \text{ h/a}$  und  $t_{\text{Volllast,KWK}} = 4.585 \text{ h/a}$ , bei der modulierenden Ecopower-KWK-Anlage bei  $t_{\text{Laufzeit,KWK}} = 7.090 \text{ h/a}$  und  $t_{\text{Volllast,KWK}} = 4.305 \text{ h/a}$ . Die Spitzenlastkessel weisen eine Laufzeit von 575 h/a (SenerTec) bzw. 960 h/a auf.

**Tabelle 5-11:** Vergleich der Jahressummen aus der Hochrechnung in /Muehl 07/ mit der Simulation für die KWK-Systeme von SenerTec und Ecopower

Bezeichnung	Einheit	Senertec VKM			Ecopower VKM		
		Messung	Simulation	Δ in %	Messung	Simulation	Δ in %
KWK-Anlage							
W <sub>el,KWK</sub>	kWh/a	25.637	24.462	-4,6	20.358	18.693	-8,2
Q <sub>th,KWK</sub>	kWh/a	62.718	60.978	-2,8	57.681	53.377	-7,5
Q <sub>Gas,KWK</sub>	kWh/a	95.963	93.280	-2,8	86.688	78.061	-10,0
g <sub>el,KWK</sub>	%	26,7	26,2	-1,9	23,5	23,9	+1,7
g <sub>th,KWK</sub>	%	65,4	65,4	0	66,5	68,4	+2,9
g <sub>ges,KWK</sub>	%	92,1	91,6	-0,5	90,0	92,3	+2,6
t <sub>Laufzeit,KWK</sub>	h/a	k.A.	4.690	-	k.A.	7.090	-
t <sub>Vollast,KWK</sub>	h/a	k.A.	4.585	-	k.A.	4.305	-
Anteil P <sub>th,KWK</sub> /P <sub>Geb</sub>	%	25,3		-	23,8		-
Spitzenlastkessel							
Q <sub>th,SLK</sub>	kWh/a	14.301	17.249	+20,6	19.720	25.896	+31,3
Q <sub>Gas,SLK</sub>	kWh/a	15.204	17.537	+15,3	20.292	26.668	+31,4
g <sub>th,SLK</sub>	%	94,1	98,4	+4,6	97,2	97,2	0
t <sub>Laufzeit,SLK</sub>	h/a	k.A.	575	-	k.A.	960	-
t <sub>Vollast,SLK</sub>	h/a	k.A.	375	-	k.A.	565	-
Verbraucher							
Gebäude	-	MFH 10			MFH 10		
Q <sub>HK</sub>	kWh/a	49.881	49.881	0	49.881	48.190	-3,4
Q <sub>WWSP-Ladung</sub>	kWh/a	23.641	23.886	+1,0	23.641	24.648	+4,3
W <sub>Gebäude</sub>	kWh/a	30.844		-	30.844		-
W <sub>Nutzung</sub> <sup>16)</sup>	kWh/a	18.774	16.840	-10,3	18.708	17.327	-7,4
W <sub>Bezug</sub> <sup>16)</sup>	kWh/a	12.070	12.693	+5,2	12.136	12.206	+0,6
W <sub>Einspeisung</sub> <sup>16)</sup>	kWh/a	6.863	7.622	+11,1	1.650	1.367	-17,2
d <sub>el,KWK,Bedarf</sub> <sup>16)</sup>	%	60,9	54,6	-10,3	60,7	56,2	-7,4
d <sub>el,KWK,Produktion</sub> <sup>16)</sup>	%	73,2	68,8	-6,0	91,9	92,7	+0,9
d <sub>th,KWK</sub>	%	85,3	90,6	+6,2	78,5	73,3	-6,6
d <sub>th,SLK</sub>	%	19,5	25,6	+31,3	26,8	35,6	+32,8

Auf der Verbraucherseite im Gebäude weichen die Energiemengen zur Raumwärmebedarfsdeckung und Warmwasserspeicherladung zwischen -3,4 und 4,3 % voneinander ab. Die im Gebäude nutzbare Strommenge des in den KWK-Anlagen produzierten Stroms ist in der Simulation um 7,4 und 10,3 % geringer, wobei die Werte der Messung in /Arndt 07/

<sup>16)</sup> KWK-Strom-Nutzungsvariante: Betreibermodell

lediglich anhand der drei Typtage saldiert und hochgerechnet wurden. Daraus ergeben sich auch größere Abweichungen bei der KWK-Stromeinspeisung von 11,1 und -17,2 %, wohingegen der Reststrombezug mit Differenzen von 5,2 bzw. 0,6 % besser übereinstimmt. Die genannten Abweichungen führen dann in der Simulation zu um 6,3 und 4,5 %-Punkten geringeren elektrischen Bedarfsdeckungsgraden. Bei SenerTec konnte der elektrische Produktionsdeckungsgrad von 73,3 % um 4,4 %-Punkte nicht bestätigt werden, Ecopower übertrifft den schon sehr hohen Wert von 91,9 % um 0,8 %-Punkte.

Die Tatsache, dass die KWK-Systeme in der Simulation nicht zu jedem Zeitpunkt das gleiche Verhalten aufweisen, wie bei den Messungen am Prüfstand, mindert die Qualität der Simulation nicht. Eine genaue Übereinstimmung war auch nicht das Ziel bei der Entwicklung der Simulation. Einerseits sind manche Eigenarten und Phänomene, die man auch am Prüfstand oder im Praxisbetrieb nur schwerlich erklären kann, so in der Simulation nicht abbildbar. Andererseits ist ein Großteil der Abweichungen auf die nicht vollständige Kenntnis der jeweiligen Regelungsstrategien und die unterschiedliche Methodik bei der Erstellung der Jahresraumwärmelastgänge zurückzuführen, weil keine vollständige Kenntnis über die herstellerspezifischen Regelungsstrategien vorlag. Dennoch zeigt der Vergleich der Jahressummen aus der Hochrechnung in /Muehl 07/ mit der Simulation für die KWK-Systeme von SenerTec und Ecopower eine hinreichende Übereinstimmung.

Weitere KWK-Systeme können in die KWK-Simulation integriert werden, wenn einerseits verlässliche Messdaten sowohl des Start- und Stoppverhaltens als auch des stationären Betriebs vorliegen und andererseits die Regelungsstrategie für den Betrieb des KWK-Systems bekannt ist. Des Weiteren kann die KWK-Simulation auch zur Weiterentwicklung bzw. Überprüfung von bereits bestehenden KWK-Regelungsstrategien genutzt werden. Hier können Labor- oder Praxisversuche durch die Anwendung der KWK-Simulation ergänzt werden.

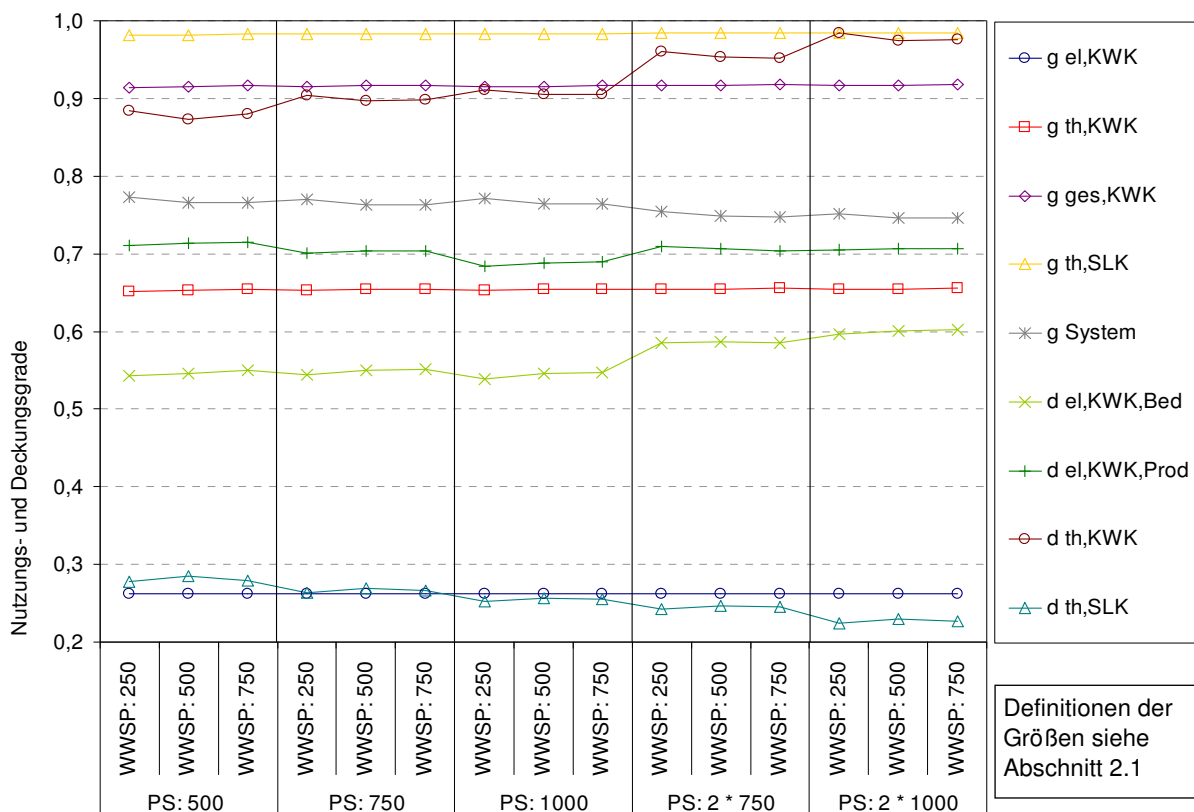
## 6 Variationsmöglichkeiten bei KWK-Systemen

In diesem Abschnitt wird die validierte Simulation genutzt, um anhand von Parametervariationen das energetische, wirtschaftliche und Betriebsverhalten von KWK-Systemen zu verbessern. Um diese Schritte dokumentieren zu können, wurde ein Ergebnisprotokoll entwickelt, in dem alle relevanten Größen festgehalten werden (siehe Anhang Tabelle 10-7).

### 6.1 Monovariablen Sensitivitäten

#### 6.1.1 Speichervolumen

Zur Wärmespeicherung stehen in KWK-Systemen Puffer- und/oder Warmwasserspeicher zur Verfügung. Für nicht-modulierende KWK-Anlagen wurden für identische Gebäude (MFH-10) 15 Jahressimulationen durchgeführt, bei denen die Pufferspeicher- und Warmwasserspeichervolumina variiert wurden. Als Pufferspeicher (PS) werden in den Simulationsdurchläufen Speicher von 500 l bis 2.000 l berücksichtigt, über 1.000 l wird das Volumen auf zwei gleich große Speicher aufgeteilt (2·750 l, 2·1.000 l). Die Warmwasserspeicher weisen ein Volumen von 250 bis 750 l auf. Sowohl SenerTec als auch Ecopower haben unabhängig voneinander ihre KWK-Systeme mit 1.000-Liter-Pufferspeichern und 500-Liter-Warmwasserspeichern ausgestattet.

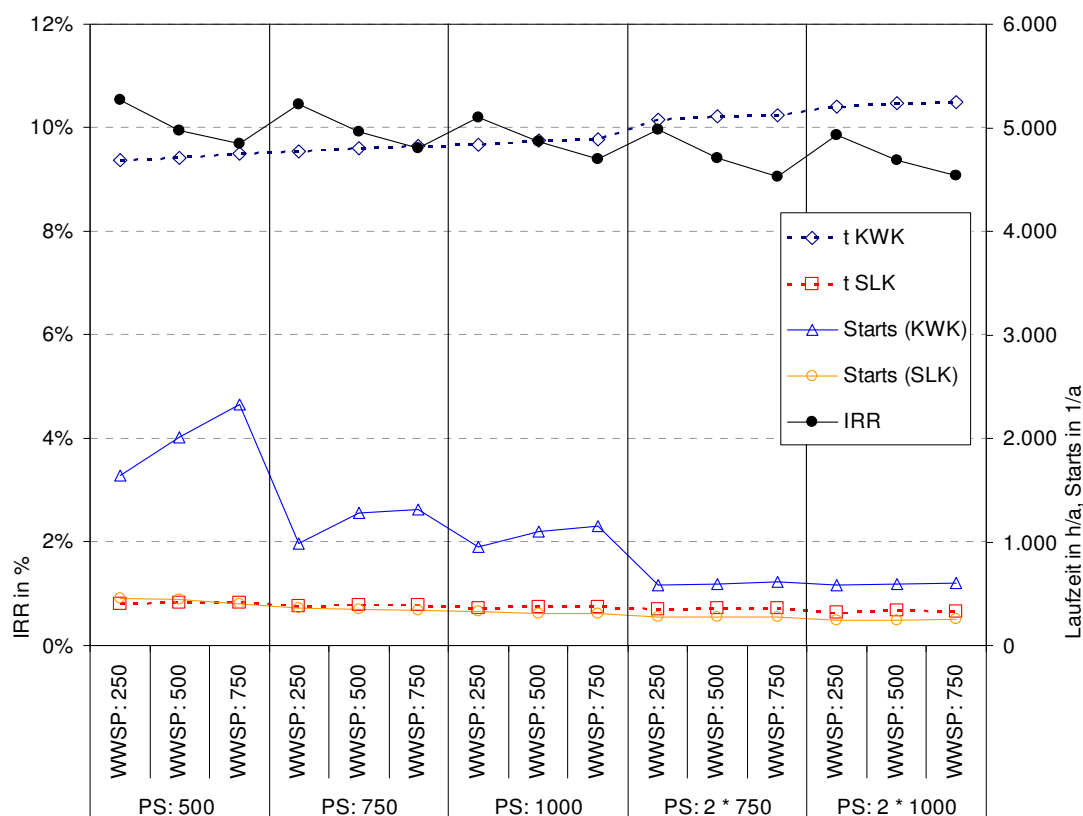


**Abbildung 6-1:** Nutzungs- und Deckungsgrade der KWK-Systeme in Abhängigkeit vom PS- und WWSP-Volumen

Die Kombination kann als Startpunkt der Variation in der Mitte angesehen werden. Bei der Simulation wurden die im Anhang in **Tabelle 10-10** aufgeführten Einstellungen gewählt.

In **Abbildung 6-1** sind die Nutzungs- und Deckungsgrade des SenerTec-KWK-Systems in Abhängigkeit vom Pufferspeicher- und Warmwasserspeichervolumen ( $V_{\text{WWSP}}$ ) dargestellt (vgl. Definitionen in Abschnitt 2.1). Die Anlagennutzungsgrade  $g_{\text{el,KWK}}$ ,  $g_{\text{th,KWK}}$  und  $g_{\text{th,SLK}}$  (KWK-Anlage und Spitzenlastkessel) zeigen sich von der Variation weitestgehend unbeeinträchtigt und sind in sehr engen Grenzen als konstant zu betrachten. Der Systemnutzungsgrad  $g_{\text{System}}$  sinkt bei steigendem PS-Volumen ( $V_{\text{PS}}$ ) aufgrund von höheren Speicherverlusten von 76,8 % (Mittelwert bei gleichem PS-Volumen) bei  $V_{\text{PS}} = 500$  l auf 74,8 % bei  $V_{\text{PS}} = 2 \cdot 1.000$  l, wobei sich bei  $V_{\text{PS}} = 1.000$  l ähnlich hohe Werte zeigen wie bei  $V_{\text{PS}} = 500$  l. Innerhalb einer Gruppe mit jeweils gleichem PS-Volumen liegt der Systemnutzungsgrad bei  $V_{\text{WWSP}} = 250$  l um 0,6 bis 0,8 % höher als bei  $V_{\text{WWSP}} = 750$  l.

Erwartungsgemäß steigt mit größerem PS-Volumen der thermische Deckungsgrad der KWK-Anlage  $d_{\text{th,KWK}}$  von 87,3 auf 98,5 % (deutlich beim Übergang von einem auf zwei PS), da mehr dynamische Lastanforderungen durch den PS abgedeckt werden. Folglich geht der thermische Deckungsgrad des Spitzenlastkessels  $d_{\text{th,SLK}}$  von 28,5 auf 22,3 % zurück. Die elektrischen Deckungsgrade  $d_{\text{el,KWK}}$  sind bei einem PS-Volumen von 1.000 l am geringsten und steigen in Richtung größerer Volumina an.



**Abbildung 6-2:** Laufzeiten, Anzahl der Starts und interner Zinsfuß der KWK-Systeme in Abhängigkeit vom PS- und WWSP-Volumen

Die deutlichste Auswirkung der verschiedenen Volumina zeigt sich in **Abbildung 6-2** bei der Anzahl der KWK-Anlagenstarts, bei denen die Bandbreite von ca. 600 bis über 2.300 Starts pro Jahr reicht. Bei den Varianten mit individuellem Pufferspeicher sind bei denen mit geringem WWSP-Volumen deutlich weniger Starts zu verzeichnen als bei großem WWSP-Volumen. Dies lässt sich mit den geringen Energiemengen erklären, die notwendig sind, um einen kleinen WWSP zu laden, sodass die Temperatur im PS nicht soweit absinkt, dass eine sofortige Nachladung durch die KWK-Anlage erfolgen muss. Der Unterschied in der Anzahl

der Starts zwischen kleinem und großem WWSP nimmt mit steigendem PS-Volumen ab. Bei den Varianten mit Doppelpufferspeicher ist nahezu keine Abhängigkeit vom WWSP-Volumen zu erkennen.

In Abbildung 6-2 sind für die gleichen Jahressimulationen des SenerTec-KWK-Systems die Laufzeiten (Vollbenutzungsstunden) und die Anzahl der Starts der KWK-Anlage und des Spitzenlastkessels sowie als wirtschaftliche Bewertungsgröße der interne Zinsfuß (IRR) aufgetragen. Erwartungsgemäß steigt mit größerem PS-Volumen die Laufzeit der KWK-Anlage an, einerseits aufgrund des höheren thermischen KWK-Deckungsgrades und andererseits, um die höheren Speicherverluste auszugleichen.

Beim IRR lassen sich deutlich die Auswirkungen der unterschiedlichen Investitionskosten erkennen. Sowohl für den PS als auch für den WWSP zeigt sich ein höherer IRR bei jeweils kleinen Volumina. Das Maximum von knapp 10,5 % weist die Variante mit  $V_{PS} = 500 \text{ l}$  und  $V_{WWSP} = 250 \text{ l}$ , das Minimum von 9,1 % die Variante mit  $V_{PS} = 2 \cdot 1.000 \text{ l}$  und  $V_{WWSP} = 750 \text{ l}$  auf. Schließt man nur aus diesem Kriterium auf das optimale Verhältnis zwischen Puffer- und Warmwasserspeichervolumen, so fallen die Volumina sehr klein aus.

### Fazit

Die Abwägung der folgenden Aspekte führt zu der favorisierten Wärmespeicherkombination  $V_{PS} = 1.000 \text{ l}$ ,  $V_{WWSP} = 250 \text{ l}$ :

- mit 77,2 % liegt der höchste Systemwirkungsgrad der 15 Simulationsdurchläufe vor;
- nur geringfügig niedrigerer IRR von 10,2 % gegenüber 10,4 % bei  $V_{PS} = 750 \text{ l}$ ;
- deutliche Reduzierung der KWK-Anlagenstarts bei kleinem  $V_{WWSP}$ .

Umgerechnet auf die thermische Leistung bedeutet das eine Richtgröße für die Pufferspeicherdimensionierung von  $80 \text{ l/kW}_{th}$  (vgl. Abschnitt 3.2.3.2). Die KWK-Anlage benötigt dann eine Laufzeit von ca. 56 min für die Aufheizung um 10 K, was einer typischen Temperaturdifferenz im Pufferspeicher entspricht.

Beim WWSP ist ein knappes Erreichen der Leistungskennzahl  $N_L$  ausreichend (vgl. Abschnitt 3.2.2.2, im gewählten Beispiel wäre  $N = 7,7$ ), da der Pufferspeicher mit „Back-up“-Wärme zur Verfügung steht. Dabei sollte auf einen ausreichend dimensionierten Heizwendelwärmeübertrager geachtet werden. Jeder Hersteller hält dort passende WWSP mit leistungsstarkem Wärmeübertrager bereit<sup>17)</sup>.

Auf den Primärenergieverbrauch und die  $\text{CO}_2$ -Emissionen hat die Variation der Speichervolumina nur einen untergeordneten Einfluss. Die Primärenergieeinsparungen gegenüber der getrennten Energieversorgung liegen zwischen 25,7 und 26,7 %, die  $\text{CO}_2$ -Reduzierung zwischen 29,0 und 30,3 % (Referenzvariante „Bestand“, vgl. Abschnitte 3.2.4 und 3.2.4.3).

### 6.1.2 Anlagenleistung

Als Auslegungskriterium für KWK-Anlagen gilt der Anteil der thermischen Leistung der KWK-Anlage an der Gebäudeauslegungsleistung  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  (vgl. Abschnitt 3.2.3.1). Für das identische Gebäude MFH-10 wurde mit der modulierenden KWK-Anlage eine Variation des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  in 5%-Schritten zwischen 10 und 30 %, dann noch 40, 50, 70 und 100 % (monovalent) durchgeführt und simuliert. Dabei wurde die Anlagen- und Regelungscharakteristik des Ecopower-KWK-Systems übernommen und die im Anhang in Tabelle 10-11 aufgeführten Einstellungen gewählt. Bei fester Gebäudeauslegungsleistung und konstanter

<sup>17)</sup> z.B. Viessmann Vitocell V-100: Volumen 300 l;  $N_L=8,7$ ; WW-Dauerleistung 23 kW bei  $T_{VL,WWSP}=70 \text{ °C}$  und  $T_{WW}-T_{KW}=50 \text{ °C}$

Stromkennzahl ergeben sich die in **Tabelle 6-1** aufgeführten Leistungen und Volumina, wobei letztere mit dem jeweils festen Verhältnis zwischen Pufferspeichervolumen  $V_{PS}$  und thermischer Leistung der KWK-Anlage  $P_{th,KWK}$  von  $80 \text{ l/kW}_{th}$  aus Abschnitt 6.1.1 errechnet wurden. Das Volumen des Warmwasserspeichers beträgt immer 300 l.

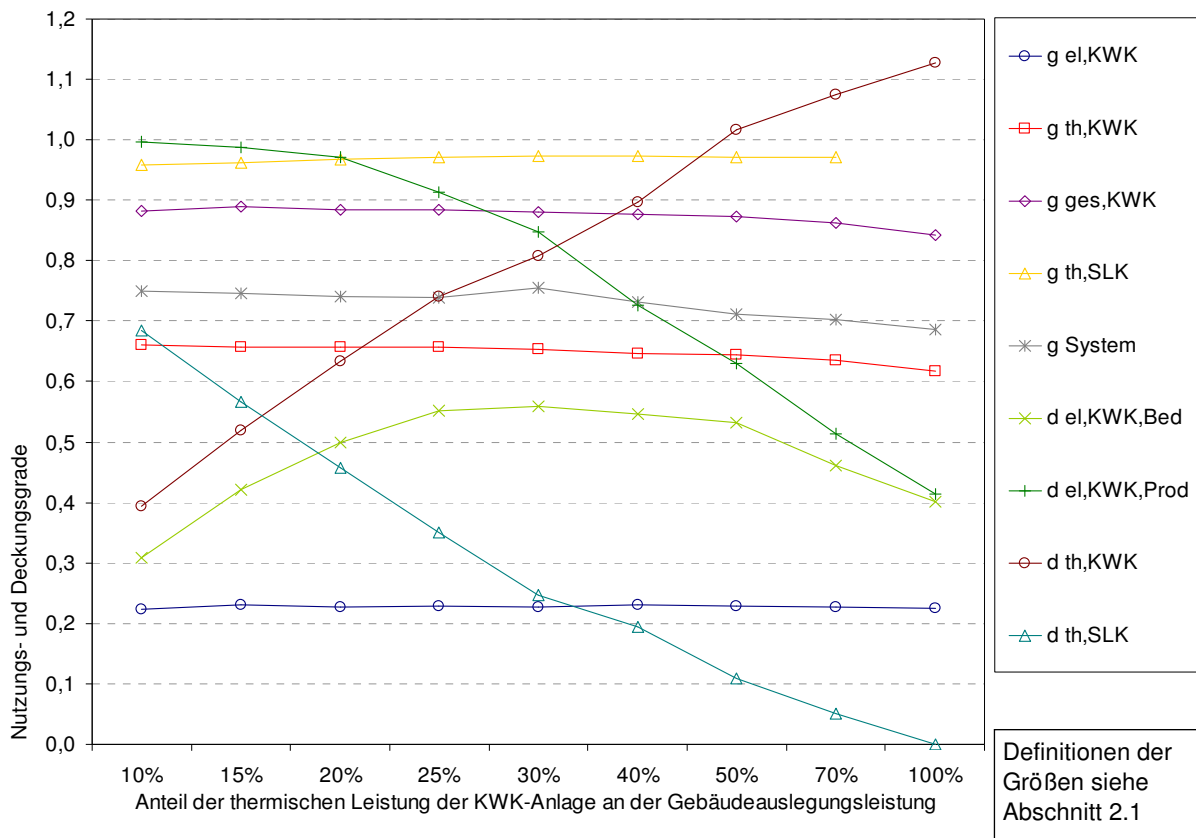
**Tabelle 6-1:** Leistungen von KWK-Anlage und Spitzenlastkessel sowie Pufferspeichervolumen in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$

	Einheit	MFH-10								
$P_{th,KWK}/P_{Geb}$	%	10	15	20	25	30	40	50	70	100
$P_{th,KWK}$	kW	5,3	7,9	10,5	13,1	15,8	21,0	26,3	36,8	52,5
$P_{el,KWK}$	kW	1,8	2,8	3,7	4,6	5,5	7,4	9,2	12,9	18,4
$P_{th,SLK}$	kW	47	45	42	39	37	32	26	16	-
$V_{PS}$ rechn.	l	420	630	840	1.050	1.260	1.680	2.100	2.940	4.200
$V_{PS}$ gewählt	l	400	600	800	1.000	1.200	2·750	2·1.000	2·1.000	2·1.000

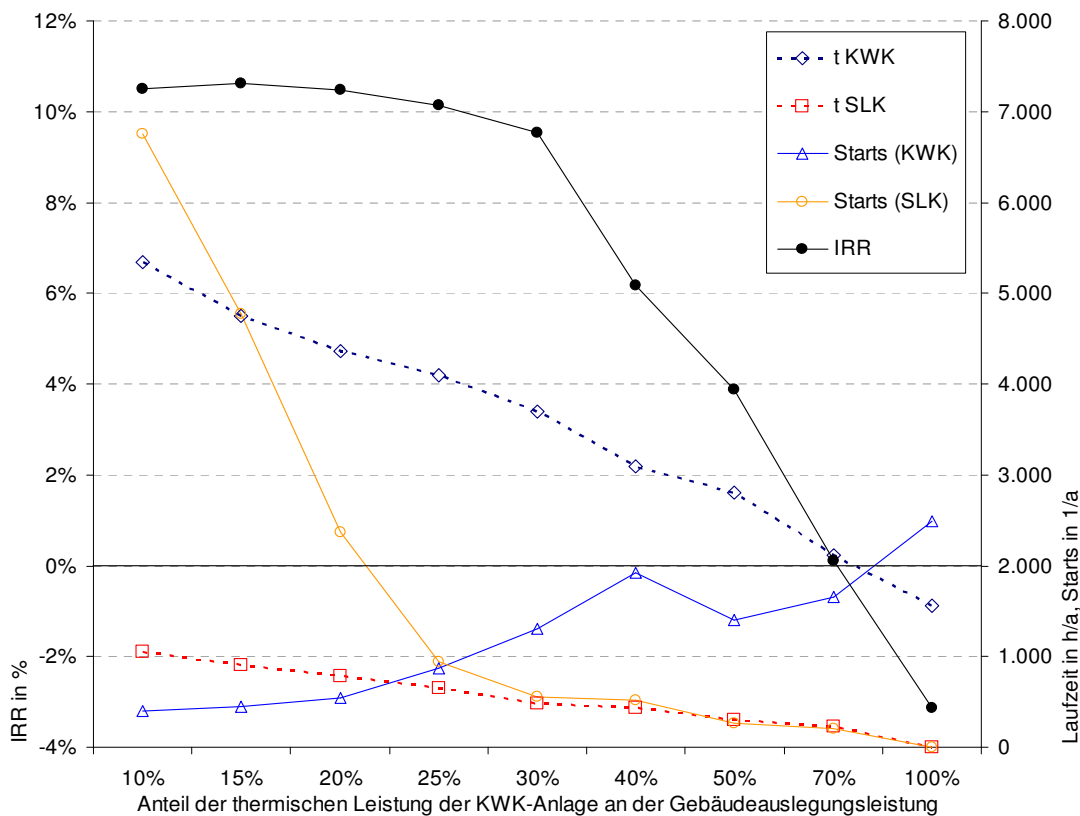
Zunächst lässt sich in **Abbildung 6-3** sowohl für die KWK-Anlage als auch für den Spitzenlastkessel ein Rückgang des thermischen Nutzungsgrades bei hoher Starthäufigkeit feststellen. Der thermische Nutzungsgrad der KWK-Anlage  $g_{th,KWK}$  geht von  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 10 \%$  bis zum monovalenten Betrieb von 66 % auf 61,7 % zurück. Gleichzeitig nimmt die in **Abbildung 6-4** dargestellte Anzahl der Starts von 400 auf 2.500 zu.

Bei einem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  von 10 % hat der Spitzenlastkessel schon fast die Funktion einer normalen Therme und startet 6.600 Mal pro Jahr. Der thermische Nutzungsgrad liegt jedoch nur um 1,5 %-Punkte unter den Werten ab einem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  von 25 %, die mit  $g_{th,SLK} = 97,2 \%$  konstant bleiben. Der elektrische Nutzungsgrad  $g_{el,KWK}$  variiert in Grenzen von weniger als 1 %-Punkt. Der Systemnutzungsgrad weist bei  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 0 \%$  ein relatives Maximum von 74,9 % und bei der letzten Variante mit nur einem Pufferspeicher ( $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 30 \%$ ) ein absolutes Maximum von 75,5 % auf.

Der elektrische Bedarfsdeckungsgrad  $d_{el,KWK,Bedarf}$  hat ein Maximum von fast 56 % bei  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 30 \%$ . Hin zu geringeren Anteilen von  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  fällt  $d_{el,KWK,Bedarf}$  auf 31 % ab. Wie in **Abbildung 6-4** dargestellt, ist dann zwar eine hohe Anzahl Vollbenutzungsstunden von 5.300 zu verzeichnen, die elektrische Leistung der KWK-Anlage ist mit 1,8 kW jedoch gering. Bei höheren Anteilen von  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  ist die elektrische Leistung höher, es fallen aber die Vollbenutzungsstunden auf einen Wert von 1.560 ab, sodass sich für  $d_{el,KWK,Bedarf}$  ein Wert von 40 % ergibt. Der elektrische Produktionsdeckungsgrad  $d_{el,KWK,Prod.}$  fällt von nahezu 1 bei  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 10 \%$  auf 41 % beim monovalenten Betrieb ab. Der thermische KWK-Deckungsgrad  $d_{th,KWK}$  steigt im gleichen Variationsbereich von 39 auf 113 %,  $d_{th,SLK}$  fällt von 68 auf logischerweise 0 % bei monovalentem Betrieb.



**Abbildung 6-3:** Nutzungs- und Deckungsgrade der KWK-Systeme in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$



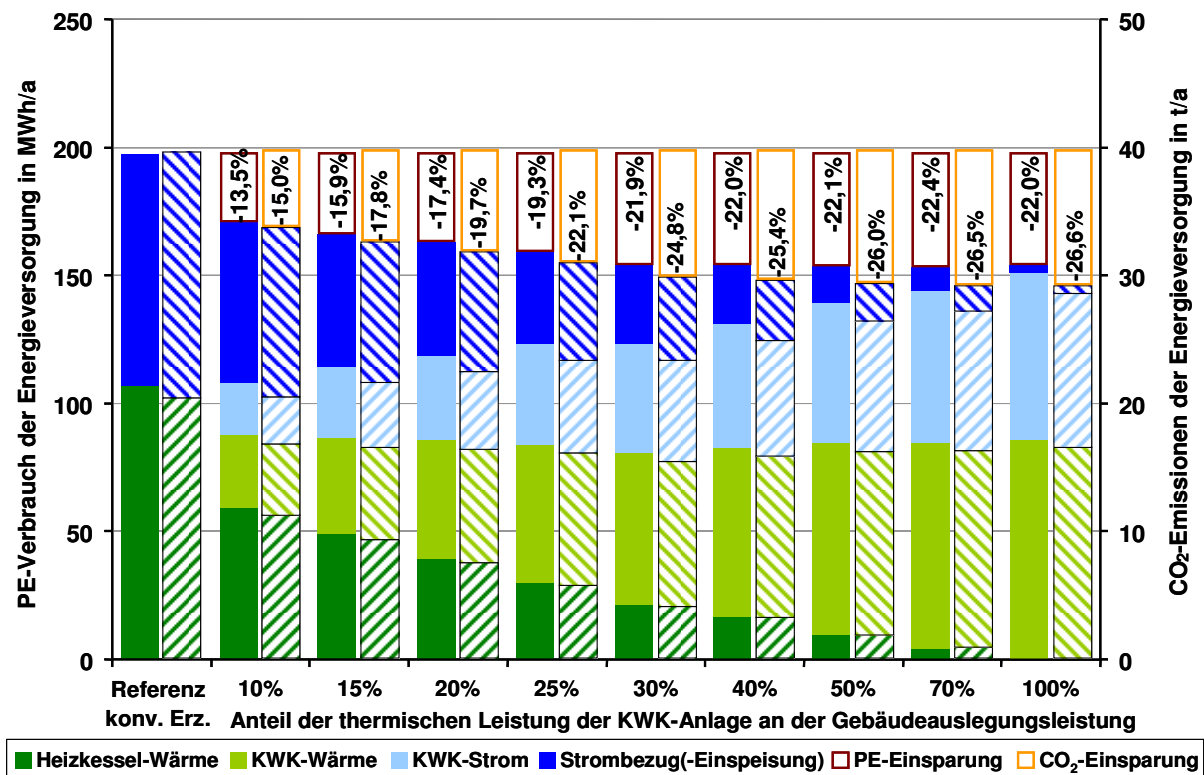
**Abbildung 6-4:** Laufzeiten, Anzahl der Starts und interner Zinsfuß der KWK-Systeme in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$



Des Weiteren ist in Abbildung 6-4 der interne Zinsfuß der KWK-Varianten in Abhängigkeit des Anteils von  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  dargestellt. Hier zeigt sich die wirtschaftlichste Variante bei einem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 15\%$  mit einem IRR von 10,6 %. Der IRR fällt stetig auf -3,1 % bei monovalentem Betrieb.

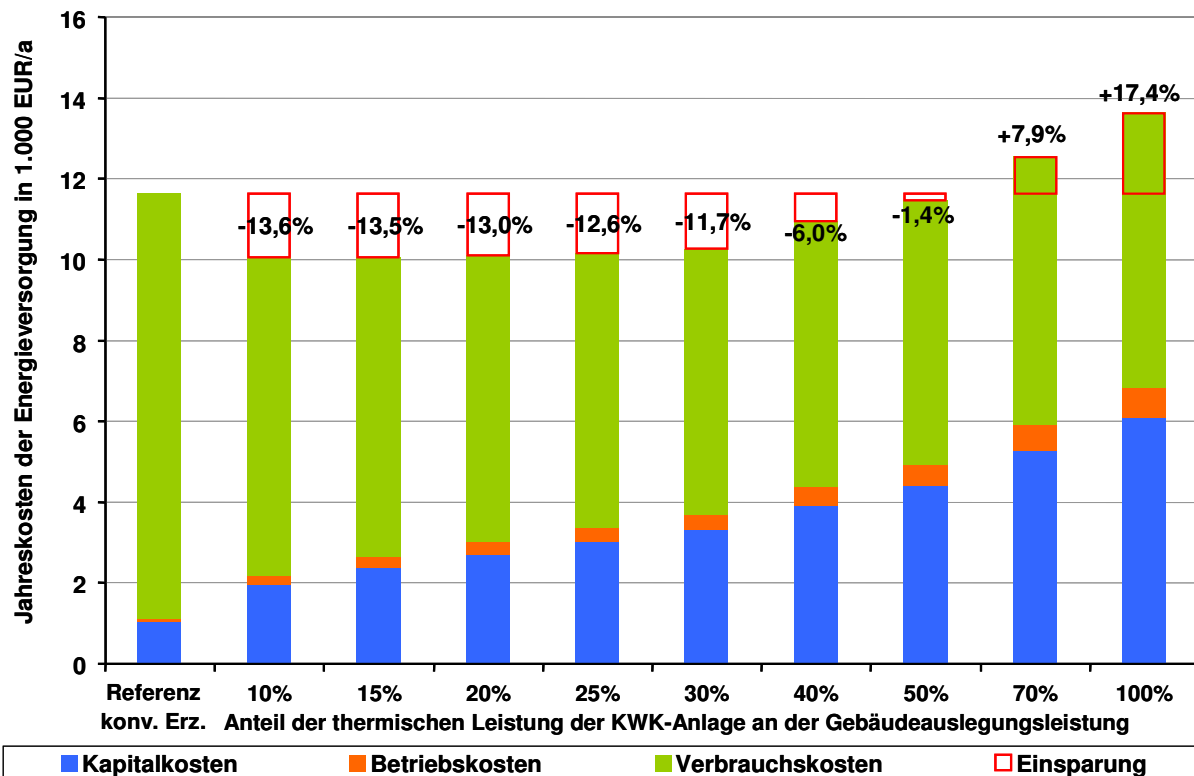
### Fazit

Mit der Variation der KWK-Anlagenleistung im gleichen Versorgungsobjekt (MFH-10) lassen sich die Auswirkungen verschiedener Dimensionierungen gut erkennen.



**Abbildung 6-5:** PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieversorgung des Referenzsystems und der KWK-Varianten in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  (Kombination „Bestand“)

In **Abbildung 6-5** sind der Primärenergieverbrauch (vollfarbig) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (schraffiert) der Energieversorgung des Referenzsystems konventioneller Energieversorgung mit Heizkessel und Strombezug sowie bei den KWK-Varianten in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  dargestellt. Als Referenzvariante wurde die Kombination „Bestand“ gewählt (vgl. Abschnitte 3.2.4 und 3.2.4.3). Es zeigt sich, dass mit höherem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  der Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen abnehmen, wobei sich ab  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 30\%$  die PE-Reduzierung gegenüber der Referenz der getrennten Energieversorgung nur noch wenig vergrößert und Werte zwischen 21,9 und 22,4 %, die CO<sub>2</sub>-Einsparung zwischen 24,8 und 26,6 % annimmt. Des Weiteren lässt sich an den Säulen die Aufteilung des Primärenergieverbrauchs bzw. der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die einzelnen Produkte erkennen. Mit zunehmendem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  vergrößern sich folglich die Anteile der KWK-Wärme (hellgrün) und des KWK-Stroms (hellblau).



**Abbildung 6-6:** Kosten der Energieversorgung des Referenzsystems und der KWK-Varianten in Abhängigkeit des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  (Kombination „Bestand“)

Gemäß **Abbildung 6-6** wird bei  $P_{th,KWK}/P_{Geb} = 10\%$  die größte Kostenersparnis von 13,6 % gegenüber des Referenzsystems der getrennten Energieversorgung erreicht. Bei den KWK-Varianten mit einem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  von 70 und 100 % liegen die Kosten um 7,9 bzw. 17,4 % über den Kosten der Energieversorgung mit Heizkessel und Strombezug. Die stetige Zunahme der Kapitalkosten hin zu größeren Anteilen von  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  können durch die Minderung der Verbrauchskosten nicht aufgefangen werden. Im Bereich von  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  von 10 bis 30 % liegen die Jahreskosten der KWK-Varianten eng beieinander und variieren zwischen 13,6 bis 11,7 % Kostenersparnis gegenüber des Referenzsystems.

### 6.1.3 Leistungsmodulation vs. feste Nennleistung

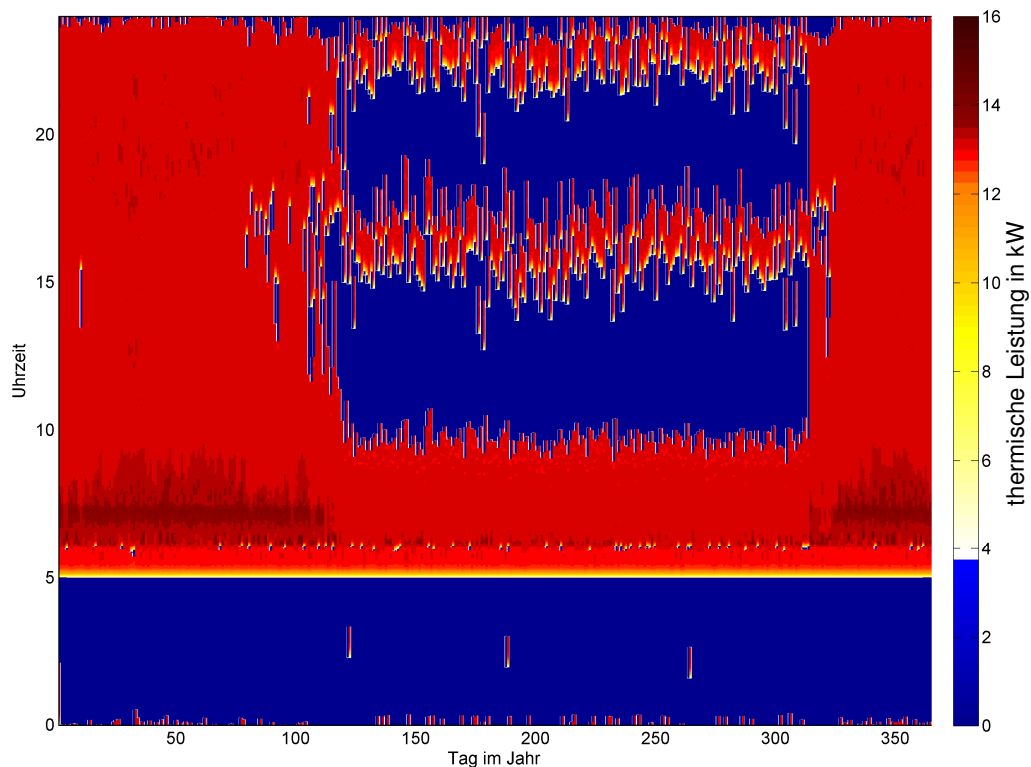
Die Frage, ob eine KWK-Anlage besser im Ein/Aus-Betrieb oder modulierend gefahren wird, hängt oft von der Philosophie des Herstellers ab. Die Vor- und Nachteile der Leistungsmodulation bei KWK-Anlagen sind in **Tabelle 6-2** aufgeführt.

Die Auswirkungen der Modulation können in Jahressimulationen gezeigt werden, in denen identische Versorgungsobjekte sowohl mit einer Ein/Aus-geregelten als auch mit einer modulierenden KWK-Anlage betrieben werden. Bei den Simulationen wurden die im Anhang in **Tabelle 10-12** und **Tabelle 10-13** aufgeführten Einstellungen gewählt.

**Tabelle 6-2:** Pro und Contra Leistungsmodulation bei KWK-Anlagen

Pro	Contra
<ul style="list-style-type: none"> <li>genaue Leistungsanpassung an den Bedarf ist möglich</li> <li>geringerer Verschleiß durch weniger Startvorgänge und längere Laufzeiten</li> <li>höhere elektrische Deckungsgrade durch Nachtbetrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausgleich zwischen Bedarf und Produktion auch durch ausreichend dimensionierten Pufferspeicher möglich</li> <li>Teillastbetrieb mit schlechterem elektrischen Wirkungsgrad (gilt nicht für BZ)</li> <li>aufwändigere Anlagenregelung für Teillastbetrieb</li> </ul>

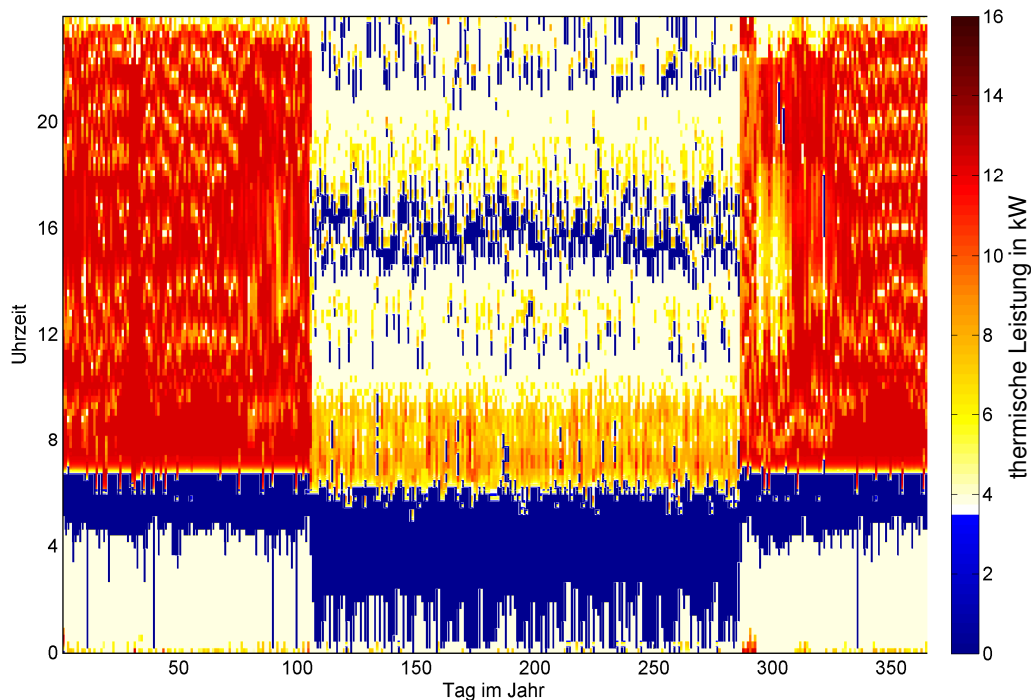
In **Abbildung 6-7** ist das Rasterdiagramm<sup>18)</sup> der elektrischen Nettoleistung einer nicht modulierenden KWK-Anlage dargestellt. Die Farbskala enthält die thermische Leistung von 0 bis 16 kW. Deutlich zu erkennen ist, dass im Wesentlichen nur die Farben Blau und Rot vorherrschen, die für „KWK-Anlage ist aus“ und „KWK-Anlage läuft bei Nennleistung“ stehen.

**Abbildung 6-7:** Rasterdiagramm der thermischen Leistung einer nicht modulierenden KWK-Anlage

Die KWK-Anlage startet täglich um 5 Uhr, um den Pufferspeicher zu erwärmen. Bei genauer Betrachtung lässt sich an den orangenen Farben das Warmlaufen nach dem Kaltstart erkennen.

<sup>18)</sup> Ein Rasterdiagramm (engl. Carpet-Plot) ist die graphische Darstellung von Ausprägungen in ihrem zeitlichen Zusammenhang. Jeder Messpunkt wird in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen, wobei die Achsen unterschiedliche zeitliche Auflösungen (z.B. Tag auf der x-Achse und Stunde auf der y-Achse) haben. Dadurch werden Beobachtungen, die zur gleichen Uhrzeit auftreten, in einer Zeile angezeigt. Alle Beobachtungen eines Tages werden in einer Spalte dargestellt. Die Beobachtungen werden farbig kodiert.

nen. Der Beginn des Tagbetriebs um 6 Uhr ist am waagerechten Übergang von Dunkelorange nach Rot zu sehen. Im Winter und in der Übergangszeit ist in der Zeit von 6 bis 8 Uhr die Funktion des Abgaswärmeübertragers an den dunkelroten Farbtönen zu identifizieren. In dieser Zeit ist der Heizkreisrücklauf aufgrund der Gebäudeauskühlung kälter, sodass der Abgaswärmeübertrager mit Kondensation eine höhere Leistung hat. Die Sommermonate kennzeichnet das häufige Ausschalten während des Tages, wohingegen in den Übergangszeiten und im Winter die KWK-Anlage tagsüber durchläuft. Über das ganze Jahr ist die Anlage in der Zeit von 0 bis 5 Uhr nicht in Betrieb. Es ergibt sich eine Laufzeit von ca. 4.700 h, was in etwa den Vollbenutzungsstunden mit 4.600 h entspricht.



**Abbildung 6-8:** Rasterdiagramm der elektrischen Nettoleistung einer modulierenden KWK-Anlage

In **Abbildung 6-8** ist das Rasterdiagramm der thermischen Leistung im Wertebereich von 0 bis 16 kW der modulierenden KWK-Anlage im identischen Versorgungsobjekt dargestellt, wobei sich im Vergleich zur nicht modulierenden Anlage in Abbildung 6-7 ein sehr unterschiedliches Bild ergibt. Zuerst fällt auf, dass die Anlage wesentlich länger in Betrieb ist, die blauen Anteile sind sehr gering. Es ergibt sich über das Jahr eine Laufzeit von 7.400 h, die Anzahl der Vollbenutzungsstunden liegt bei 4.600 h/a.

Ganzjährig über weite Teile der Nacht und im Sommer von vormittags bis in die Nacht läuft die KWK-Anlage bei Minimal- bis niedriger Leistung, was an den hellgelben Flächen zu erkennen ist. Der Betrieb bei mittlerer Last in Orange lässt sich vereinzelt im Sommer in den Morgenstunden von 7 bis 10 Uhr und in der Übergangszeit mittags verzeichnen. Eine höhere Leistung bis hin zur Nennleistung ist im Winter während des Tagbetriebs an der roten bis dunkelroten Färbung zu sehen.

### Fazit

Trotz der unterschiedlichen Fahrweise der beiden Anlagen ist die Anzahl der Vollbenutzungsstunden mit jeweils 4.600 h identisch. Unterschiede gibt es bei der Anzahl der Anlagenstarts. Diese liegen bei der nicht modulierenden KWK-Anlage bei 1.100, die modulieren-

de Anlage bei lediglich 780 Starts pro Jahr. Des Weiteren zeigt sich, dass die modulierende KWK-Anlage zwar den gesamten Modulationsbereich nutzt, sehr häufig allerdings bei Nenn- oder Minimalleistung fährt. Da in /Muehl 07/ gezeigt wurde, dass der elektrische Wirkungsgrad bei Minimalleistung um ca. 3 %-Punkte im Vergleich zur Nennleistung zurückgeht, wäre evtl. eine Anlagenuptimierung in diesem Arbeitspunkt empfehlenswert.

#### **6.1.4 Nachtabschaltung vs. Nachtabsenkung**

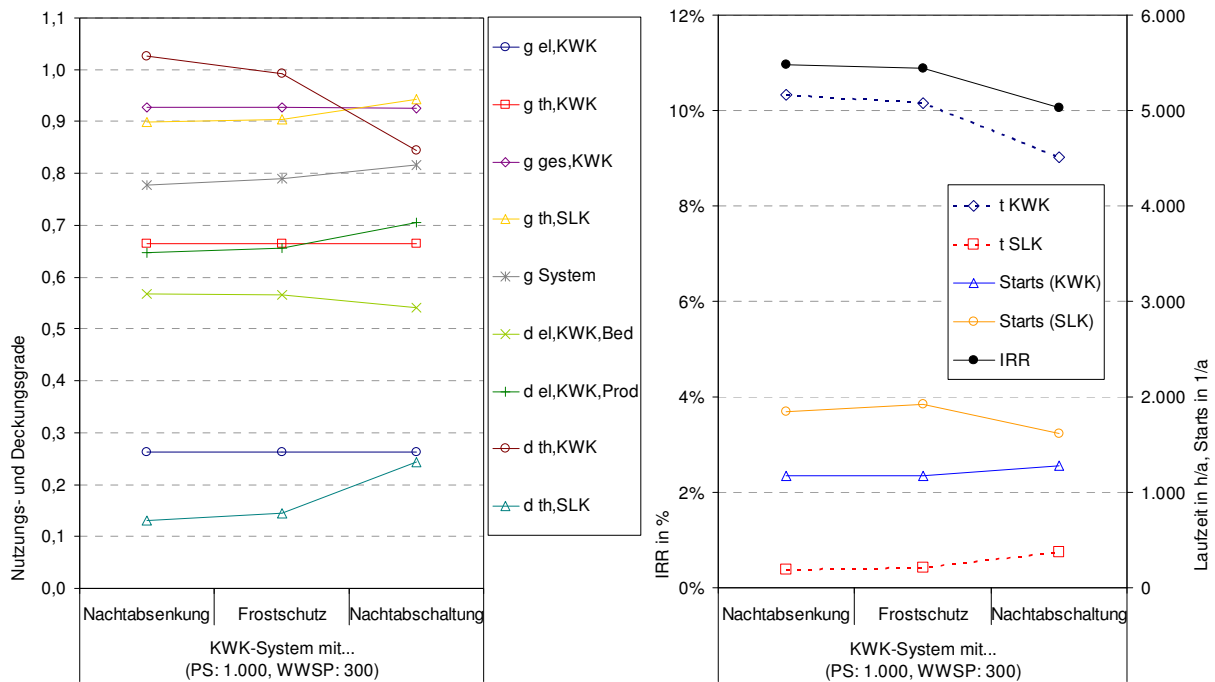
Bei der Beheizung von Gebäuden gibt es verschiedene Konzepte der Gebäudetemperierung während der Nacht. Die Nachtabschaltung verhindert, dass Heizenergie in den Heizkreis übergeben wird. Dies wird entweder durch Abschalten der Heizkreisumwälzpumpe oder Schließen des Heizkreismischers bewerkstelligt und nur oberhalb von einer Außentemperatur von ca. 4 °C praktiziert, um ein Einfrieren zu vermeiden. Die Nachtabsenkung gibt dem Heizsystem eine niedrigere Vorlauftemperatur vor, sodass theoretisch eine geringere Heizenergiemenge übergeben werden kann. In der Praxis verhindern die im Vergleich zum Tagbetrieb zumeist unverändert eingestellten Thermostatventile dieses Ziel und gleichen diese „Regelabweichung“ in gewissen Grenzen aus, sodass eine ähnliche Heizenergiemenge nur bei veränderten Heizkreisparametern übergeben wird. Für die Beheizung des Gebäudes mit einem KWK-System ist die letztgenannte Nachtabsenkung vorteilhaft, da im Gebäude ein gleichmäßigerer Raumwärmebedarf besteht. Durch die Nachtabschaltung entsteht eine ausgeprägte Morgenspitze des Raumwärmebedarfs, dessen Deckung der KWK-Anlage oftmals nur durch Unterstützung des Spitzenlastkessels gelingt.

Die zugrunde gelegten Raumwärmelastgänge weisen auch in der Nacht einen Verbrauch auf, da die Raumtemperatur nur auf 15 °C abgesenkt wird. Bei der Nachtabschaltung wird der Heizkreismischer während der Nacht geschlossen. Der nicht übergebene Heizwärmebedarf wird während der Nacht aufsummiert und muss zu Beginn des Tagbetriebs abgebaut werden. Bei der Nachtabsenkung bleibt der Heizkreismischer in Betrieb, das KWK-System kann den geringeren Heizwärmebedarf decken.

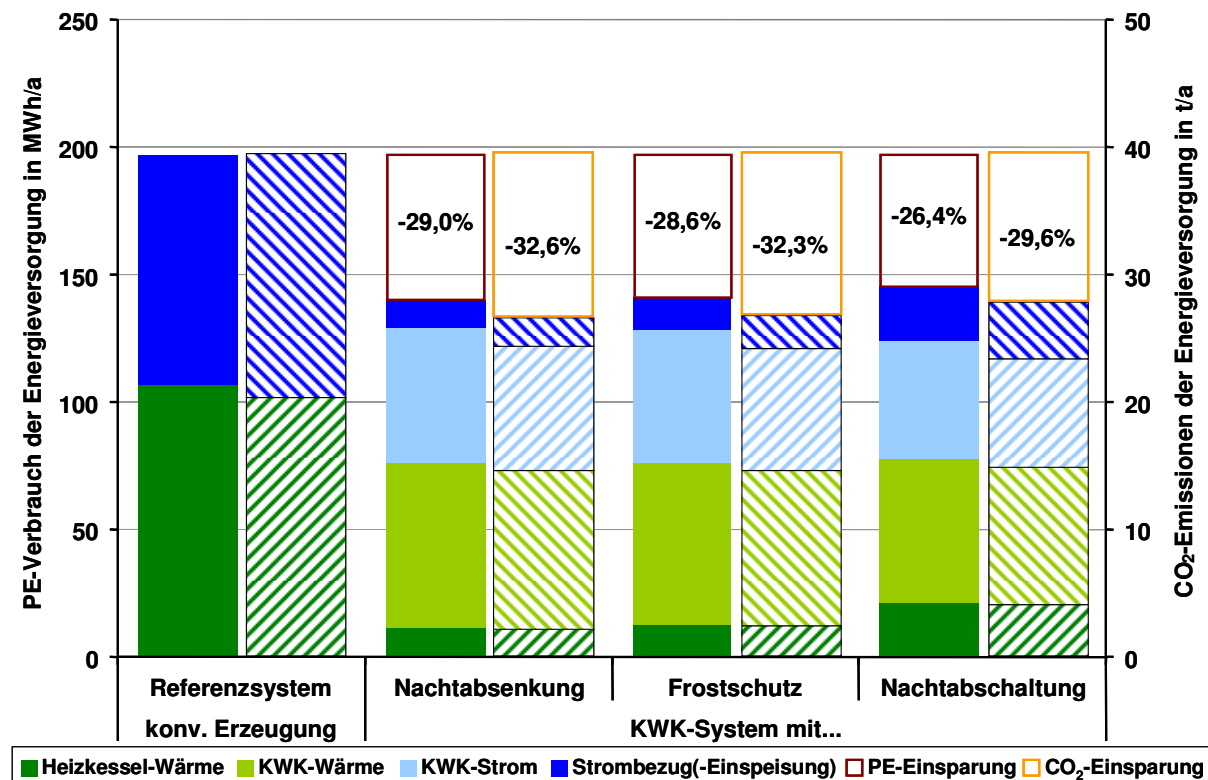
Mithilfe der KWK-Simulation wurden drei Jahressimulationen mit den Betriebsarten Nachtabsenkung, Nachtabschaltung mit Frostschutz und Nachtabschaltung ohne Frostschutz an identischen Gebäuden durchgeführt. Dabei wurden die im Anhang in Tabelle 10-12 aufgeführten Einstellungen gewählt.

Die Auswirkungen auf den Betrieb des KWK-Systems werden in **Abbildung 6-9** gezeigt. Die Betriebsarten Nachtabsenkung und Nachtabschaltung mit Frostschutz weisen recht ähnliche Eigenschaften auf. Im Vergleich dazu ist bei der Nachtabschaltung der thermische KWK-Deckungsgrad  $d_{th,KWK}$  geringer und der thermische SLK-Deckungsgrad  $d_{th,SLK}$  höher, weil die Morgenspitze des Raumwärmebedarfs nur durch Einsatz des Spitzenlastkessels abgebaut werden kann. Dementsprechend verhalten sich die Laufzeiten der KWK-Anlage und des Spitzenlastkessels. Der interne Zinsfuß ist bei der Nachtabschaltung um knapp 1 %-Punkt niedriger als bei der Nachtabsenkung.

Die Auswirkungen der Betriebsarten in der Nacht auf den Primärenergieverbrauch (vollfarbig) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (schraffiert) sind in **Abbildung 6-10** im Vergleich zur Referenz der getrennten Energieversorgung dargestellt (Kombination „Bestand“). Hier zeigt sich, dass die Nachtabsenkung und die Nachtabschaltung mit Frostschutz höhere Primärenergie- (29,0 und 28,6 %) und CO<sub>2</sub>-Einsparungen (32,6 und 32,3 %) versprechen als die Nachtabschaltung. Der Unterschied liegt geringfügig über der Abschätzung von 1-2 % in /Muehl 07/ und beträgt 2,6 (PE) bzw. 3,0 %-Punkte (CO<sub>2</sub>).



**Abbildung 6-9:** Nutzungs- und Deckungsgrade, Laufzeiten, Anzahl der Starts und interner Zinsfuß der KWK-Systeme bei verschiedenem Nachtbetrieb



**Abbildung 6-10:** PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieversorgung des Referenzsystems und der KWK-Varianten bei verschiedenem Nachtbetrieb (Kombination „Bestand“)

## 6.2 Optimierungsziele

Für die Dimensionierung von KWK-Systemen wurden in Abschnitt 3.2.4 unterschiedliche Optimierungsziele identifiziert. Je nach Anforderungen können grundsätzlich verschiedene KWK-Systeme für das gleiche Gebäude ausgelegt werden. Mithilfe der Ergebnisse der letzten Abschnitte können jeweils für das vorgegebene Ziel optimale KWK-Systeme ausgewiesen werden. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen bieten dafür eine ausreichende Bandbreite.

### Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Aus energiewirtschaftlicher Sicht können die Aspekte Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen gemeinsam behandelt werden. Dies zeigt sich auch bei der Auswertung der Simulationsdurchläufe.

Den größten Einfluss auf den Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen hat die Dimensionierung der KWK-Anlage. In Abschnitt 6.1.2 hat sich gezeigt, dass der Anteil der thermischen Leistung der KWK-Anlage an der Gebäudeauslegungsleistung  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  der relevante Variationsparameter ist. Ab einem Anteil  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  von 30 % bis zum monovalenten Betrieb liegt die Primärenergieeinsparung zwischen 21,9 und 22,4 % gegenüber der getrennten Energieversorgung (Kombination „Bestand“). Die größte CO<sub>2</sub>-Reduzierung ergibt sich in der Höhe von 26,6 % beim monovalenten Betrieb der KWK-Anlage, da hier die größtmögliche Strom und Wärmemenge in der effizienten KWK-Anlage erzeugt wird.

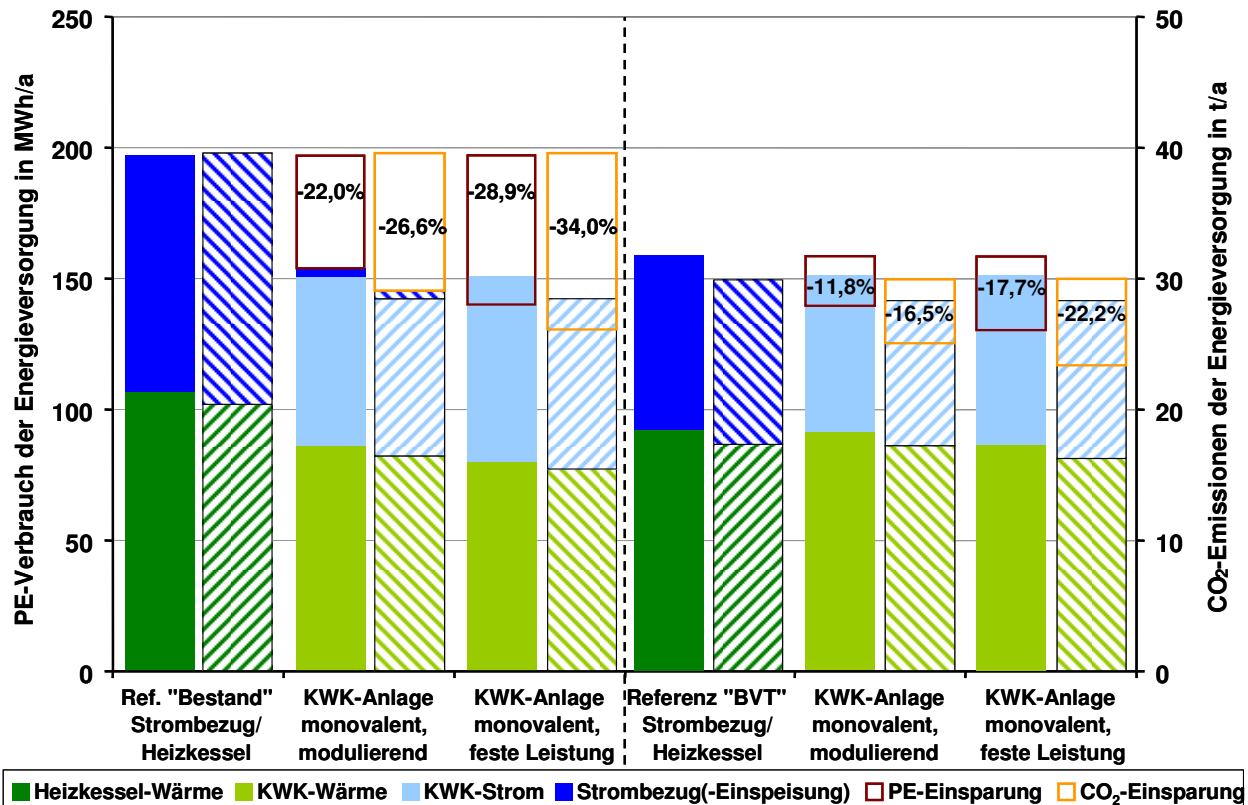
Die Variation der Speichervolumina hat auf den Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur einen untergeordneten Einfluss. Hier zeigte sich, dass die Variante mit einem Pufferspeichervolumen von 1.000 l und einem Warmwasserspeichervolumen von 250 l die größte Primärenergieeinsparung gegenüber der getrennten Energieversorgung (Kombination „Bestand“) in Höhe von 26,7 % aufweist. Dieses Verhältnis wurde mit leichten Modifikationen in den darauf folgenden Variationen genutzt.

Die Betrachtung in Abschnitt 6.1.4 hat mit der Betriebsart Nachtabenkung eine weitere Möglichkeit der Primärenergieeinsparung aufgedeckt, die aber bei monovalentem Betrieb keine Auswirkungen zeigt, da hier keine Verlagerung von Wärmemengen vom Spitzenlastkessel zur KWK-Anlage möglich ist.

Das KWK-System mit der höchsten Primärenergieeinsparung und den geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen weist die folgende Dimensionierung auf:

- Monovalenter Betrieb, Auslegung der thermischen Leistung der KWK-Anlage auf die Gebäudeauslegungsleistung;
- Pufferspeichervolumen von 80 l/kW<sub>th</sub>;
- Warmwasserspeichervolumen: knappes Erreichen der Leistungskennzahl  $N_L$ ;
- Nachtabenkung (nur bei bivalentem Betrieb).

In **Abbildung 6-11** sind als Ergebnisse der Simulationen des MFH-10 der Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der optimalen KWK-Systeme dargestellt, bei denen die o.g. Kriterien berücksichtigt wurden. Jeweils eine modulierende und eine mit fester Leistung betriebene KWK-Anlage wurden betrachtet. Der Vergleich erfolgt auf der linken Diagrammseite gegenüber dem Referenzsystem „Bestand“, rechts gegenüber der besten verfügbaren Technik (BVT) der getrennten Energieversorgung.



**Abbildung 6-11:** PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieversorgung der Referenzsysteme „Bestand“ (links) und „BVT“ (rechts) sowie der optimalen KWK-Varianten

Die Primärenergieeinsparung gegenüber der Referenzvariante „Bestand“ beträgt bei der modulierenden 22,0 % und bei der Ein/Aus-geregelten KWK-Anlage 28,9 %, die CO<sub>2</sub>-Einsparung beläuft sich auf 26,6 bzw. 34,0 %. Da der Saldo aus Strombezug und -einspeisung negativ ist, erhält die Ein/Aus-geregelten KWK-Anlage eine Primärenergie- bzw. CO<sub>2</sub>-Gutschrift. Der Primärenergieverbrauch beträgt 151 MWh/a, der –bedarf aufgrund des Saldos nur 140 MWh/a.

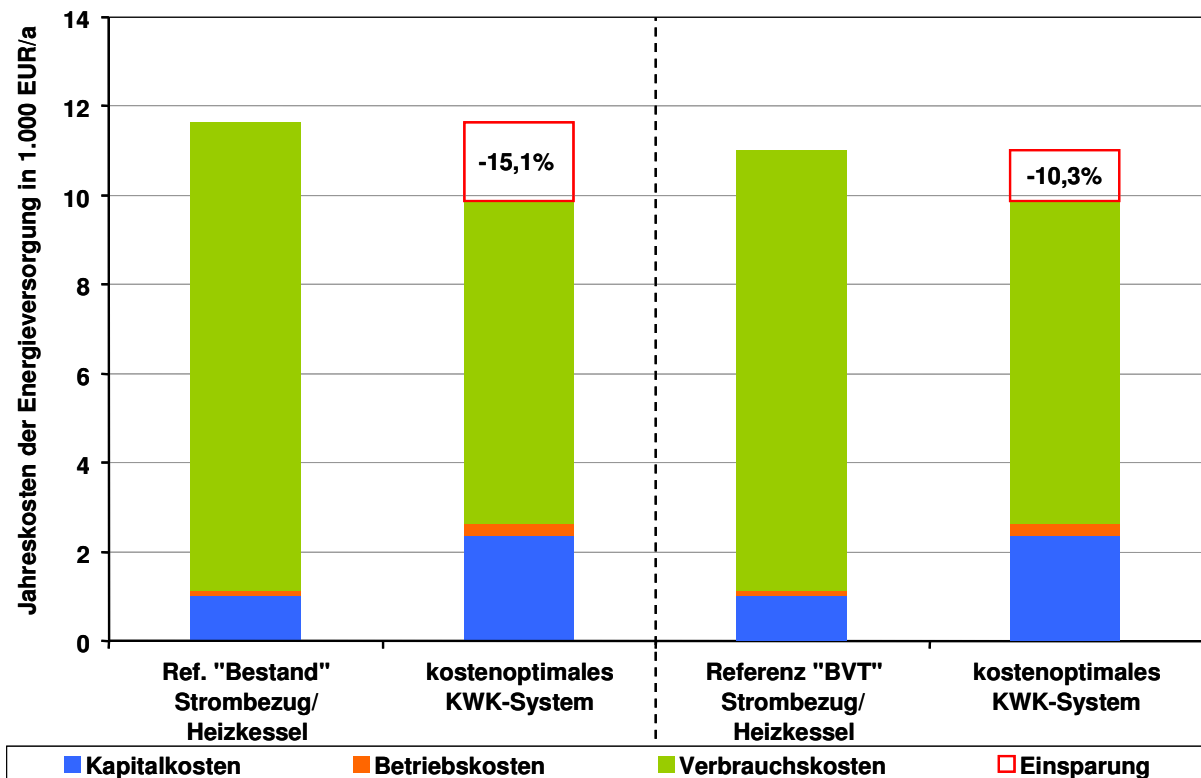
Selbst gegenüber der Referenzvariante „BVT“ ergeben sich für die KWK-Anlagen Primärenergieeinsparungen in Höhe von 11,8 (modulierend) und 17,7 % (Ein/Aus-geregelt). Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen liegen bei 16,5 und 22,2 %.

### Wirtschaftlicher Betrieb

Wenn ausschließlich der wirtschaftlichste Betrieb das Bewertungskriterium für die Dimensionierung eines KWK-Systems ist, folgt aus den Ergebnissen des Abschnitts 6.1.2 eine Auslegung der thermischen Leistung der KWK-Anlage auf einen Anteil an der Gebäudeausgangsleistung  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  im Bereich um 15 %. Hinzu kommt ein Abweichen von der in Abschnitt 6.1.1 entwickelten Dimensionierungsregel für das Pufferspeichervolumen von 80 l/kW<sub>th</sub> durch eine Verkleinerung des Pufferspeichervolumens auf 400 l, was in diesem Fall 50 l/kW<sub>th</sub> entspricht. Auch führt die Nachtabenkung im Vergleich zur Nachtabstaltung zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

In **Abbildung 6-12** sind die Jahreskosten der Energieversorgung des MFH-10 mithilfe der Referenzvarianten „Bestand“ (linke Diagrammseite) und „BVT“ (rechte Diagrammhälfte) sowie der kostenoptimalen KWK-Systeme dargestellt.



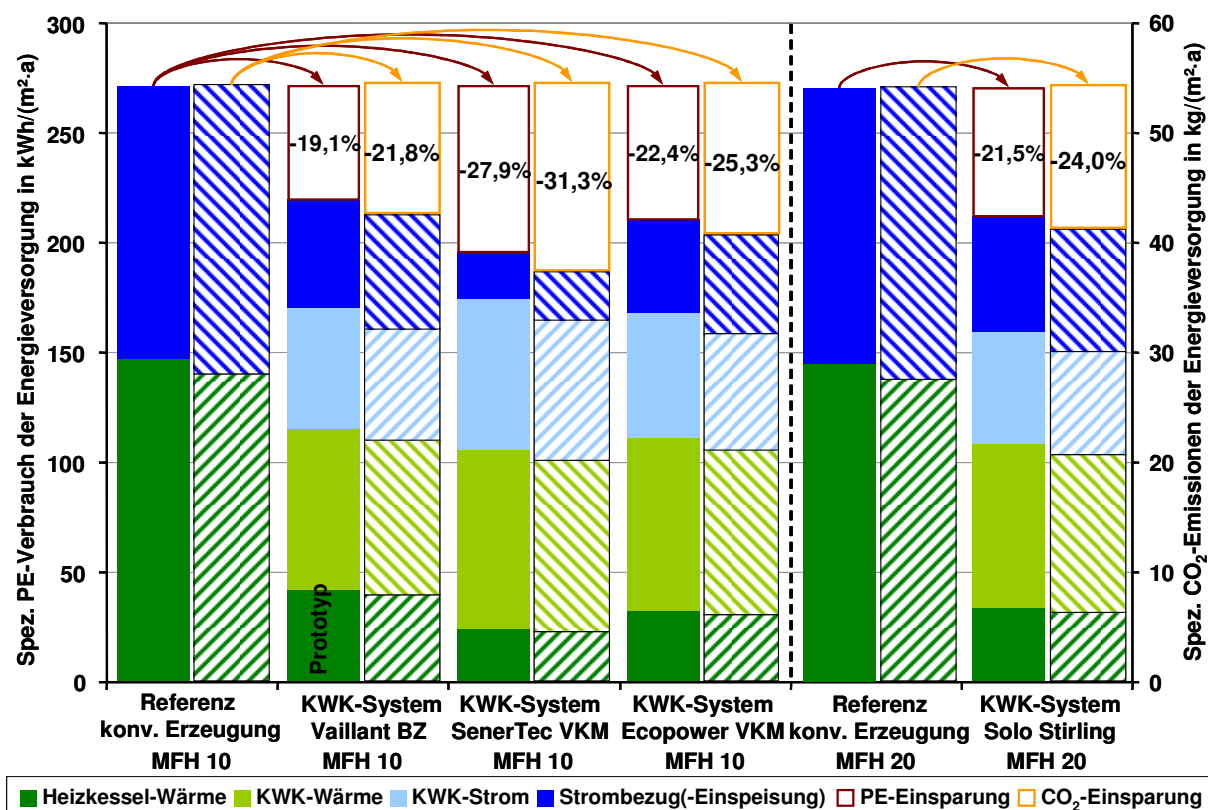


**Abbildung 6-12:** Kosten der Energieversorgung der Referenzsysteme „Bestand“ (links) und „BVT“ (rechts) sowie der optimalen KWK-Varianten

Gegenüber der Referenzvariante „Bestand“ ergeben sich Kosteneinsparungen von 15,1 %. Die Kosten des optimalen KWK-Systems liegen dann bei knapp unter 10.000 €/a, der interne Zinsfuß beträgt 11,4 %. Der Unterschied bei den Kosten der Referenzsysteme ist ausschließlich auf die Verbrauchskosten zurückzuführen, da aufgrund der effizienteren Energieversorgung bei der BVT-Variante weniger Erdgas zur Wärmebereitstellung benötigt wird. An der Kostenstruktur der KWK-Systeme ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Referenzvarianten keine Änderungen. Dennoch ist die Energieversorgung des kostenoptimalen KWK-Systems gegenüber der Referenzvariante „BVT“ um 10,3 % günstiger, der interne Zinsfuß liegt bei 7,3 %.

## 7 Zusammenfassung

Dass der Einsatz von KWK-Systemen eine energetisch sinnvolle und wirtschaftlich darstellbare Alternative zur Energieversorgung von Wohngebäuden darstellt, wurde ausführlich in /Arndt 07/ gezeigt. Die in **Abbildung 7-1** dargestellten Ergebnisse des dort durchgeführten Systemvergleichs bestätigen, dass die Primärenergieverbräuche der betrachteten KWK-Systeme (einschließlich Spitzenlastkessel und Speicher) zwischen 19,1 und 27,9 % unter der jeweiligen Referenzvariante „Bestand“ mit getrennter Energieversorgung liegen (vollfarbige Säulen). Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen der KWK-Varianten zeigt sich ein noch höherer Einspareffekt: die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen zwischen 21,8 und 31,3 % niedriger (schraffierte Säulen). Selbst bei der Referenzvariante „Beste-verfügbare-Technik“ (BVT) sind bei den KWK-Varianten die PE-Verbräuche um 5,2 bis 12,7 % und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 5,9 bis 13,5 % niedriger als bei einer hocheffizienten, getrennten Energieversorgung.



**Abbildung 7-1:** Spez. Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Referenzsystems und der KWK-Varianten (Kombination „Bestand“) /Arndt 07/

Bei der Ausweisung dieser Einsparungen durch den KWK-Einsatz half die Effizienzmethode, deren methodischer Ansatz die Aufteilung einer Größe im Verhältnis der entsprechenden Größen der Referenztechnologien enthält. So kann eine einzige Methode für die Bewertung der KWK gegenüber den Referenztechnologien anhand des Primärenergieeinsatzes und der Emissionen sowie für die Ermittlung der Energiegestehungskosten genutzt werden. Dadurch wird eine hohe Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und Transparenz erreicht.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der KWK-Systeme in /Arndt 07/ zeigen, dass die Nutzung des durch die KWK-Anlage produzierten Stroms physikalisch und abrechnungs-

technisch weitestgehend im Gebäude erfolgen sollte. Von den drei vorgestellten KWK-Strom-Nutzungsvarianten verspricht am ehesten das Betreiber-Modell einen wirtschaftlichen Betrieb des KWK-Systems. Um das Betreiber-Modell umsetzen zu können, müssen sowohl anschlusstechnische als auch rechtliche und steuerliche Fragen gelöst werden. Von Seiten der Bundesregierung ist der Ausbau der KWK gewünscht. Das KWK-Gesetz verleiht diesem Wunsch Ausdruck und bietet verlässliche Förderbedingungen. Nur kann besonders das EnWG je nach Auslegung Schwierigkeiten bei der Errichtung einer KWK-Anlage bereiten. Nur wenn die Errichtung von KWK-Anlagen zu einem verwaltungstechnischen Standardvorgang wird, lässt sich ein größerer Anteil des KWK-Potenzials als bisher erschließen (detaillierte Ausführungen in /Schr 07/).

Des Weiteren wurden die Erkenntnisse aus den messtechnischen Untersuchungen genutzt, um eine Simulation der KWK-Systeme zu erstellen. Diese vermag die dynamischen Vorgänge darzustellen, die sich aus der Interaktion der einzelnen Elemente des KWK-Systems untereinander und der Reaktion des KWK-Systems auf die Anforderungen aus Heizwärme-, Warmwasser- und ggf. elektrischer Last ergeben. Die Simulation ist validiert und kalibriert. Vergleiche von Start- und Stoppvorgängen sowie auf der Basis von Tages- und Jahressummen zwischen Messung bzw. Hochrechnung und der Simulation weisen sehr gute bis hinreichend genaue Übereinstimmungen auf.

Die Variationen der KWK-Systeme hinsichtlich Speichervolumen und Anlagenleistung, aber auch bezüglich verschiedener Betriebsarten haben profunde Einblicke in das Betriebsverhalten von KWK-Systemen gegeben.

In der KWK-Simulation wurden im Wesentlichen zwei sehr unterschiedliche Systemansätze und Regelungsstrategien umgesetzt: einerseits die „klassische“ Variante, bei der an den Pufferspeicher nur die Ein/Aus-betriebene KWK-Anlage angeschlossen und fehlende Wärmemengen auf dem Weg zum Heizkreisverteiler durch den Spitzenlastkessel ausgeglichen werden, und andererseits die Variante mit dem Pufferspeicher als verbindendes Glied, an den die modulierende KWK-Anlage sowie alle weiteren Komponenten einschließlich des Warmwasserspeichers direkt angeschlossen wurden. Dies zeigt die Möglichkeiten der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen KWK-Simulation. Die Variationen der KWK-Systeme haben gezeigt, welche Potenziale damit bei der Optimierung von KWK-Systemen vorhanden sind. Für alle Komponenten von KWK-Systemen sind entsprechende Modelle vorhanden, die nahezu nach Belieben, aber mit Sachverstand miteinander kombiniert werden können. Die Voraussetzung für die Implementierung weiterer KWK-Systeme ist allerdings die Kenntnis der zugrunde liegenden bzw. die Entwicklung neuer Regelungsstrategien.

## 8 Ausblick

Die untersuchten KWK-Systeme haben sich sowohl in den messtechnischen Untersuchungen am IfE (/Muehl 07/) als auch im internationalen Vergleich des Annex 42 der Internationalen Energie Agentur (IEA) bewährt und konnten ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen. Der politische Wille in Deutschland zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist mit Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Einsparung begründet /KWKModG/. In /Arndt 07/ wurden die möglichen Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Vergleich zur getrennten Energieerzeugung ausgewiesen und in /Schr 07/ das Marktpotenzial der KWK und deren Hemmnisse in Wohngebäuden aufgezeigt.

Der Betrieb und die Auswertung der Messdaten verschiedener KWK-Systeme haben gezeigt, dass im Bereich der Regelungsstrategien und der hydraulischen Verschaltungen noch zusätzlicher Forschungsbedarf besteht, um das Betriebsverhalten und die Effizienz der KWK-Systeme weiter zu verbessern.

Die für die messtechnischen Untersuchungen von den Herstellern konfigurierten KWK-Systeme unterscheiden sich je nach Optimierungsziel deutlich von den optimierten in der Simulation berechneten Systemoptima. Die in dieser Arbeit erarbeiteten Abhängigkeiten und Erkenntnisse können Eingang in die Planung und Dimensionierung neuer KWK-Systeme finden.

Möchte man die Effizienz der Energieversorgung verbessern, ist der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung eine geeignete Technik, die auch im Bereich der Hausenergieversorgung eingesetzt werden kann und muss: Wenn man bedenkt, dass alleine für die Raumwärme- und Warmwasserbereitung im Bereich der Haushalte knapp 25 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland eingesetzt werden /AGEB 06/, birgt dieser Bereich durch den Einsatz der KWK und den damit verbundenen Effizienzgewinn ein großes Energieeinsparpotenzial.

## 9 Literaturverzeichnis

- AGEB 06      Bruttostromerzeugung nach Energieträgern 2005, Website der AG Energiebilanzen unter <http://www.ag-energiebilanzen.de>, Berlin, 11.08.2006
- AGFW 01      Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW): Pluralistische Wärmeversorgung, Band 1: Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung - Zertifizierungsverfahren und Fördermodelle, Frankfurt, 2001
- AGFW 03      Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW): Hauptbericht der Fernwärmeerzeugung 2002, Frankfurt, 2003
- Arndt 07      Arndt, U. et al: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung, Endbericht des Forschungsvorhabens im Auftrag der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und des Bundesministeriums für Wirtschaft in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2007
- ASUE 01      ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Mikro-KWK, Veröffentlichung, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2001
- ASUE 02      ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: KWK-Gesetz 2002 - Grundlagen, Fördermechanismus, praktische Hinweise, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2002
- ASUE 03      ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Die „Ökologische Steuerreform“, Vorteil für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen - Stand: 1.1.2003, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2003
- AVBEltV      Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung von Tarifkunden vom 21. Juni 1979 Bundesgesetzblatt Teil I 1979, S. 684, zuletzt geändert durch Art. 17 G vom 9. Dezember 2004, Bundesgesetzblatt Teil I S. 3214
- BAY 01      Website von Bayerngas unter <http://www.bayerngas.de>, 30.10.2001
- BayBO      Bayerische Bauordnung (BayBO) vom 4. August 1997, Bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt 1997, S. 433
- Baygas 04      Informationen von D. Jelinek und J. Müller, Bayerngas GmbH 2004/2005
- BdE 06      Bund der Energieverbraucher, Website unter <http://www.energienetz.de>, 27.01.2006
- BDH 04      Marktentwicklung von Erdgas-Brennwertgeräten; Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V., Köln, 2004
- Beer 05      Beer, M.; Gobmaier, T.: Vergleich von Kälte- und Wärmeerzeugungstechnologien – Analyse unterschiedlicher Erzeugungsvarianten, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2005
- BlmSchV      Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen), 1. BlmSchV - Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen vom 15. Juli 1988, Bundesgesetzblatt Teil 1, 1988 S. 1059; 1993 S. 2378; 1994 S. 1680; 1997 S. 491
- BioV 01      Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung – BiomasseV) vom 21. Juni 2001, Bundesgesetzblatt 2001 Teil 1, Nr. 29, S. 1234-1236
- BKWK 05      Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.: Fakten zur Kraft-Wärme-Kopplung, 26. Januar 2005

- BMU 05 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung, Berlin, Juni 2005
- BMWA 01 BMWA: Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung in Ergänzung zur Klimaververeinbarung. Berlin, 25.06.2001
- BNetzA 07 Beschluss der 6. Beschlusskammer der Bundesnetzagentur vom 19.03.2007, Aktenzeichen BK6-06-071
- Bouvy 04 Bouvy, C.; Kuperjans, I.: Mikrogasturbinen: Eine neue Technologie zur Kraft-Wärme-Kopplung in kleinen und mittleren Unternehmen?, VDI-GET- Expertenforum Entwicklungslinien der Energietechnik 2004, Themengebiet Rationelle Energieverwendung, Düsseldorf, 2004.
- BRL 04/8/EG Berichtigung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, Amtsblatt der Europäischen Union L 192 vom 29. März 2004
- BVS 03 Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV): Altersstruktur von Feuerungsanlagen für die Bundesrepublik Deutschland 2003, Sankt Augustin, 2004
- Celan 02 Pressemitteilung der Celanese AG vom 2.9.2002: Celanese nimmt Pilotanlage zur Herstellung von Membran-Elektroden-Einheiten für Brennstoffzellen in Betrieb, unter [www.celanese.com](http://www.celanese.com), 20.4.2005
- CO2KWK 05 Mauch, W.; Beer, M.; Hauptmann, F.; von Roon, S.: Bestandsaufnahme der KWK und Prognose der Kohlendioxid-Minderung bis 2010. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2005.
- ConGB 03 Heating Europe 2004 - Multi-Country Market Research and Database Services, Consult GB, Canterbury, Dezember 2003
- Destatis 04 Website des Statistischen Bundesamts, Wiesbaden, unter <http://www.destatis.de>, 05.08.2004
- DIBt 02 Deutsches Institut für Bautechnik: Auslegungsfragen zur Energieeinsparverordnung – Teil 1 vom 12.04.2002
- Dief 02 Diefenbach, N.: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, November 2002
- Diel 01 Dielmann, K.: Mikrogasturbinen - Technik und Anwendungen, BWK Band 53 (2001), Heft Nr. 6, S. 6-9, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- Diel 02 Dielmann, K.: Mikro-Gasturbinen – Aufbau und Anwendung. Vortrag auf der Tagung „Klein- und Mini-Blockheizkraftwerke“, Haus der Wirtschaft, Stuttgart, 24.10.2002.
- DIN 4108-6 DIN 4108 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, 11/2001
- DIN 4701-10 DIN 4701 - Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, 02/2001
- DIN 4708-2 DIN 4708 - Zentrale Wassererwärmungsanlagen – Teil 2: Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden, 04/1994
- Doku MGT Technische Dokumentation zur Mikro-Gasturbinenanlage Capstone µT 28-60/80 L, G.A.S. Energietechnik GmbH, Krefeld, 2000
- DVGW 551 DVGW Arbeitsblatt W 551: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen - Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums - Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen; Deutsche Vereini-

- gung des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, 2004
- E&M 06 Mühlstein, J.: KWK-Monitoring mit vielen Fragezeichen; Artikel in der Energie & Management - Zeitung für den Energiemarkt 9/06, Herrsching 2006
- EEG 04 Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, Bundesgesetzblatt I 2004, Seite 1918-1930, 21. Juli 2004
- EEX 07 European Energy Exchange AG, Leipzig, Website unter <http://www.eex.de>
- EnEV 02 Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 16. November 2001, Bundesgesetzblatt 2001 Teil 1, Nr. 59, S. 3085 ff
- Engel 04 Engel, H.: Enginions SteamCell ergänzt die Energieversorgung, ASUE-Innovationstagung, Berlin 05.05.2004
- EnStG 06 Energiesteuergesetz, Bundesgesetzblatt 2006 Teil I, Nr. 1534 vom 15. Juli 2006, geändert durch Artikel 1 des Gesetzes, Bundesgesetzblatt 2006 Teil I, Nr. 3180 vom 18. Dezember 2006
- EnWG 05 Zweites Gesetz zur Neuordnung des Energiewirtschaftsrechts, Bundesgesetzblatt 2005 Teil I, Nr. 42 vom 7. Juli 2005
- EnWG 98 Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz), Bundesgesetzblatt 1998 Teil 1, Nr. 730 vom 24. April 1998
- EVA 01 Website der Energieverwertungsagentur unter <http://www.eva.wsr.ac.at>, 30.10.2001
- FFE 02 Datenaktualisierung der ganzheitlichen Bilanzierung der Energiebereitstellung an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2002
- FFE 97-05 Verschiedene Autoren: FfE-interne Unterlagen und unveröffentlichte Studien, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1997-2005
- FGDüs 03 Finanzgericht Düsseldorf: Urteil 4 K 3876/02 VSt vom 14.05.2003 unter [http://www.fg-duesseldorf.nrw.de/recht/fgd/archiv2003/4k3876\\_02.pdf](http://www.fg-duesseldorf.nrw.de/recht/fgd/archiv2003/4k3876_02.pdf)
- Fünf 99 Fünfgeld, C.: Repräsentative Lastprofile, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 1999
- FW 308 Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft - AGFW -e. V.: Arbeitsblatt FW 308 - Zertifizierung von KWK-Anlagen - Ermittlung des KWK-Stromes, Bundesanzeiger Nr. 218 a vom 22. November 2002
- GAB 99 Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Energiebereitstellung, Endberichte I - V, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1999
- Geiger 01 Geiger, B.: Feldversuche – ein Instrument für reale Verbrauchskennwerte, Vortrag zur Tagung „Techniken und Instrumente einer innovativen Energiewirtschaft“, Mai 2001
- Geiger 03 Geiger, B.; Wittke, F.: Die energiewirtschaftlichen Daten der Bundesrepublik Deutschland, BWK Band 55 (2003), Heft Nr. 1/2, S. 56-63, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- Geiger 05 Geiger, B.; Mühlbacher, H.: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung - Endbericht Phase I (Prüfstandserweiterung und Validierung), im Auftrag der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München, Oktober 2005
- GEMIS 4.2 Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.2, Öko-Institut e.V., Freiburg, Dezember 2004
- HeizV Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten (Verordnung über Heizkostenabrechnung - HeizkostenV) in der Fassung der

- Bekanntmachung vom 20. Januar 1989 (Bundesgesetzblatt Teil I S. 115)
- Hutter 00 Hutter, C.; Krammer, Th.: Stationäre Anwendung von Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (Teil 2), Wasserstoff-Initiative Bayern, München, 2000
- IER 05 Blesl, M.; Fahl, U.; Voß, A.: Untersuchung der Wirksamkeit des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, Gutachten im Auftrag des BMWA, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2005
- Krantz 04 Krantz, J.: Honda Mikro-BHKW - die erste marktfähige Lösung für Einfamilienhäuser, ASUE-Innovationstagung Berlin, 5. Mai 2004
- KWKModG Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz), Bundesgesetzblatt 2002 Teil 1, Nr. 19 vom 22.03.2002
- Mahl 00 Mahlendorf, F., Roes, J.: Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie. Beitrag auf dem 7. Fachforum Brennstoffzellen (17./18.10.2000). Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V., Würzburg 2000
- Muehl 02a Mühlbacher, H.; Arndt, U.; Schwärzer, M.; Geiger, B.: Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung – Verbundprojekt ISOTEG im Auftrag der Bayerischen Forschungsförderung in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München und dem ZAE Bayern e.V., Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. München, 2002.
- Muehl 02b Mühlbacher, H.; Carter, J.; Geiger, B.: Warmwasserbereitung: Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung – Verbundprojekt ISOTEG im Auftrag der Bayerischen Forschungsförderung in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München und dem ZAE Bayern e.V., Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. München, 2002.
- Muehl 07 Mühlbacher, H.; Geiger, B.: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung - Endbericht Phase II / Gesamtauswertung, im Auftrag der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München, Mai 2007
- ÖkoSR 99 Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform, Stromsteuergesetz (StromStG), Änderung des Mineralölsteuergesetzes, Gesetz der Bundesrepublik Deutschland, 1999
- OTAG 05 Website der OTAG GmbH & CO KG unter [www.otag.de](http://www.otag.de), 20.4.2005
- Pehnt 04 Pehnt, M.: Ottomotor, Stirlingmotor, Brennstoffzelle, Dampfmaschine – Technologien und ihre Ökobilanz, Vortrag bei den Berliner Energietagen über das TIPS-Projekt, 17. Mai 2004
- Peters 05 Telefonat mit Herrn B. Peters, E-quad Mehlkopf & Peters GbR, Aachen am 27.01.2005
- PPT 04 Powerplus Technologies: Installationsvorschriften Ecopower-BHKW, Powerplus Technologies GmbH, Gera, 2004
- RL 04/8/EG Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, Amtsblatt der Europäischen Union L 52 vom 21. Februar 2004
- Roon 05 Von Roon, S.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung, FfE-Fachtagung am 27./28.04.2005, FfE-Schriftenreihe 27, Energie & Management-Verlagsgesellschaft, Herrsching 2005



- Scha 01      Schaefer, H.: Vorschlag für die VDI-Richtlinie 4608, München, 2001
- Schr 07      Schröder, J.-H.: Holistic and Dynamic Assessment of the Market Potential for Micro Cogeneration Systems in Germany, Diplomarbeit an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2007
- SchTer 97    Schmidt, R., Terberger, E.: Grundzüge der Investitions- und Finanzierungstheorie, 4. Auflage, Verlag Gabler, Wiesbaden, 1997
- Sen 00      SenerTec: Datenblatt und Planungshilfe HKA-Kondenser, SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Schweinfurt, 2000
- Sen 01      SenerTec: Technische Dokumentation HKA, SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Schweinfurt, 2001
- Solo 06      Solo: Technische Dokumentation, Planungsunterlagen, Solo Stirling 161 micro KWK Modul, Solo Stirling GmbH, Sindelfingen, 2006
- Stat 05      Statistisches Jahrbuch 2005 - Für die Bundesrepublik Deutschland, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2005
- Stat 06      Statistisches Jahrbuch 2006 - Für die Bundesrepublik Deutschland, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2006
- StNEV 05    Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen – StromNEV, Bundesgesetzblatt 2005 Teil I, Nr. 2225 vom 25. Juli 2005
- SWM 04      Erdgas-Preisblatt im Versorgungsgebiet der Stadtwerke München Versorgungs GmbH, gültig ab 1.10.2004 unter [www.swm.de](http://www.swm.de), 17.03.2005
- SWM 05      Tarifübersicht zum Allgemeinen Tarif der SWM Versorgungs GmbH für die Landeshauptstadt München, gültig ab 1.02.2005, Geschäftsbereich Privatkunden unter [www.swm.de](http://www.swm.de), 17.03.2005
- TA Lärm 98   Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26. August 1998, Gemeinsames Ministerialblatt 1998, Nr. 26, S. 503
- TA Luft 02   Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002, Gemeinsames Ministerialblatt 2002, Nr. 25–29, S. 511–605
- TEHG 04      Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (TEHG) vom 8. Juli 2004 Bundesgesetzblatt Teil I, S. 1578, 2004
- Vail 03      Vaillant: Installations- und Wartungsanleitung Brennstoffzellen-Heizgerät FCU 10 - 4600/2, Vaillant GmbH, Remscheid, 2003
- VDEW 03      Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.: VDEW Jahresbericht 2003, Berlin 2004
- VDEW 06      Verband der Elektrizitätswirtschaft - VDEW - e.V.: Endenergieverbrauch in Deutschland 2004, [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de), Frankfurt am Main, 2006
- VDEW 85      Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke – VDEW: Ermittlung der Lastganglinien bei der Benutzung elektrischer Energie durch die bundesdeutschen Haushalte während eines Jahres, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH – VWEW, Frankfurt/Main, 1985
- VDI 1752    Wismann, G.: Erfahrungen der Thyssengas GmbH mit dem 1 kW-SOFC-System von Sulzer Hexis, in VDI-berichte 1752, VDI-GET-Fachtagung Stationäre Brennstoffzellen, Heilbronn, 2003
- VDI 2067-1   Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenrechnung, Düsseldorf, VDI 1999

- VDN 03      Auslegung des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 29.03.2000 durch den VDN – EEG-Verfahrensbeschreibung – Verband der Netzbetreiber – VDN – e.V. beim VDEW, Januar 2003
- VIK 04      Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.: Statistik der Energiewirtschaft, Ausgabe 2004, Verlag Energieberatung GmbH, Essen, 2004
- VV2+ 01      Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und über Prinzipien der Netznutzung, BDI, VIK, VDEW, VDN, ARE, VKU, Berlin/Essen/Hannover /Köln, 2001
- Waerdt 03      Waerdt, S.; Willenbrink, B.: Micro-Gasturbinen - Neue Wege und Varianten bei der Nutzung regenerativer Gase, Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung, VDI, Stuttgart, März 2003
- Wagner 04      Wagner, U.: Erzeugung elektrischer Energie - Thermische Stromerzeugungsanlagen, IfE Schriftenreihe Heft 11, Vorlesung Energiesysteme, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München, 7. Auflage 2004
- WI 05      Lechtenböhmer, S.: Treibhausgasemissionen des russischen Erdgas-Exportpipeline-Systems, Studie des Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Auftrag der E.ON Ruhrgas AG, Wuppertal und Mainz, 2005
- wiba 04      Arndt, U.; Duschl, A.; Köhler, D.; Schwaegerl, P.: Energiewirtschaftliche Bewertung dezentraler KWK-Systeme für die Hausenergieversorgung, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft Teil 5, Wasserstoff-Initiative Bayern (wiba), Energie & Management Verlagsgesellschaft, Herrsching, 2004
- WSchV 95      Verordnung über einen Energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzVO) vom 16. August 1994, Bundesgesetzblatt 1994 Teil 1, Nr. 55, S. 2121-2132

## 10 Anhang

### 10.1 Benutzeroberfläche des Excel-Tools „Bewertung von KWK-Anlagen“

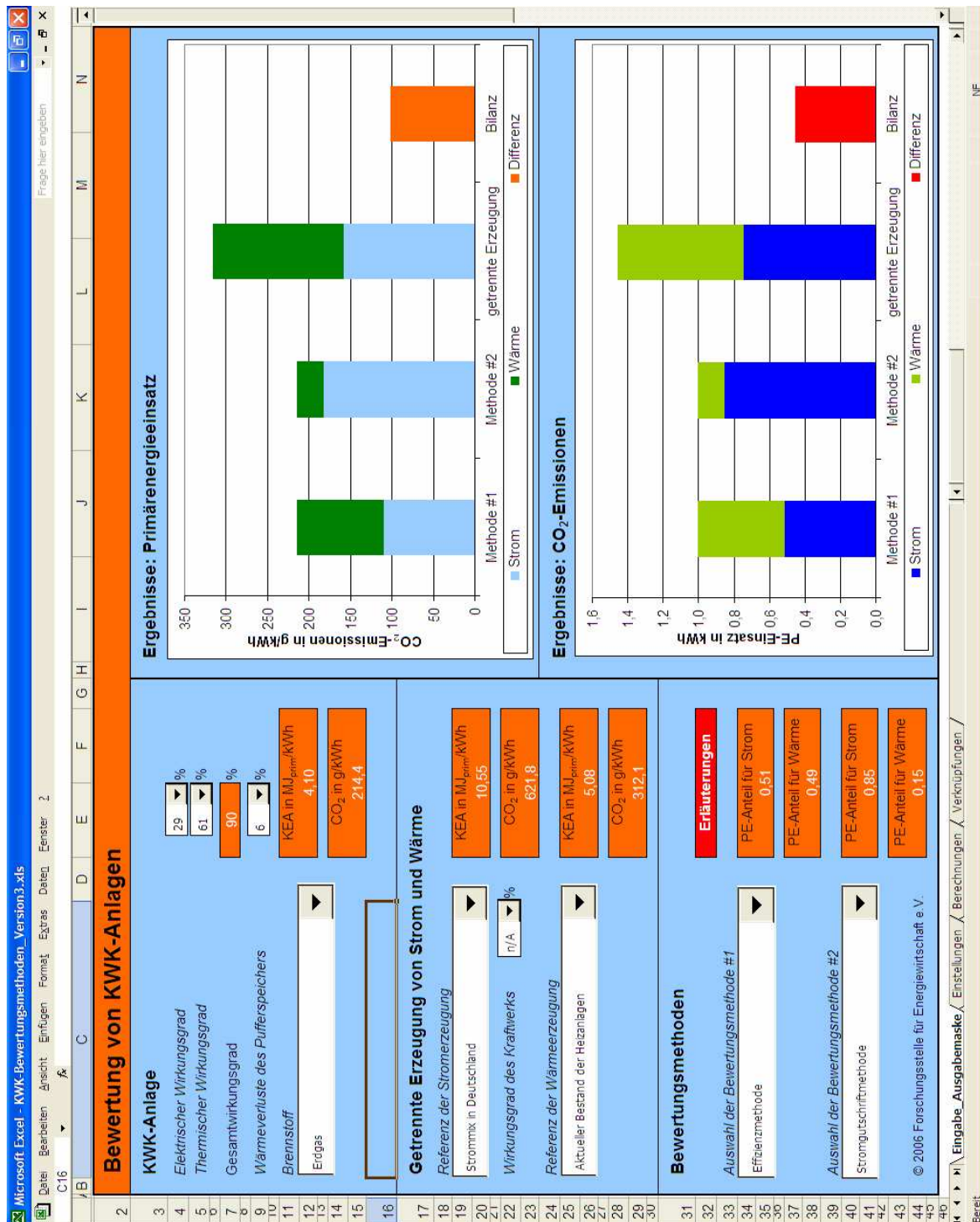
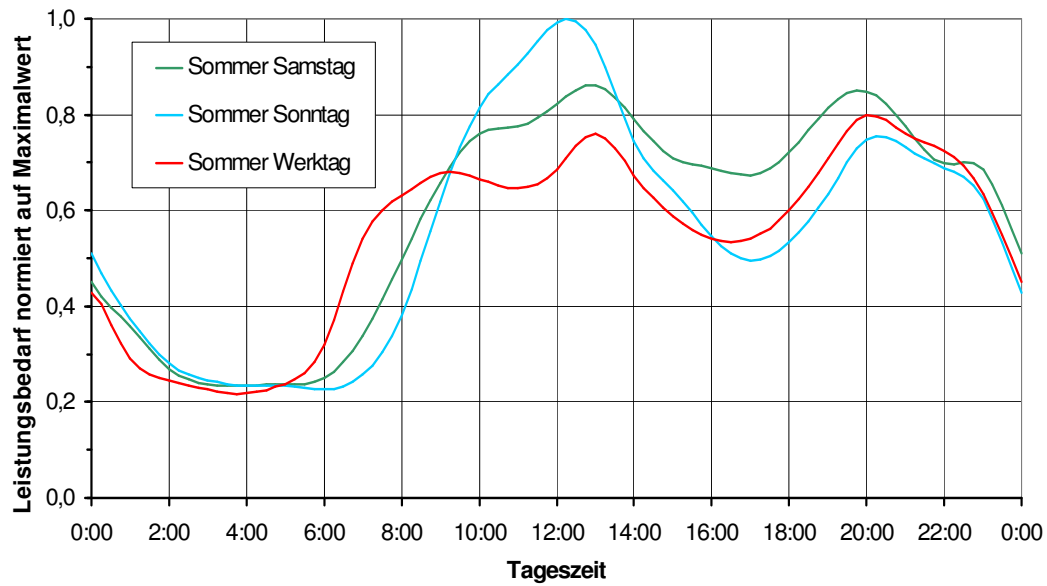
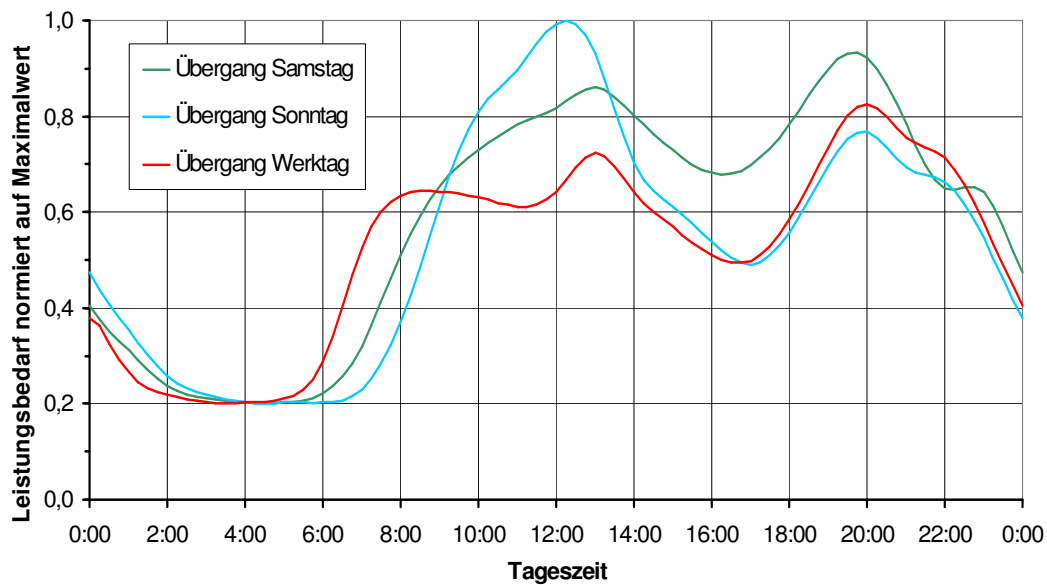


Abbildung 10-1: Ein- und Ausgabemaske des Excel-Tools „Bewertung von KWK-Anlagen“

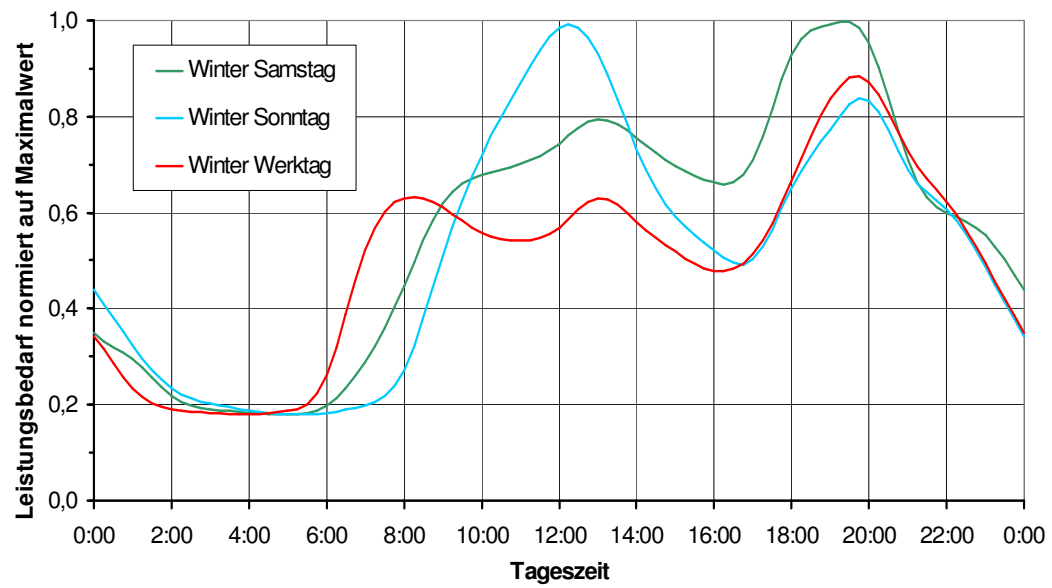
## 10.2 Normierte Stromlastgänge für Haushaltskunden



**Abbildung 10-2:** Normierte Stromlastgänge der Sommertage für Haushalte nach /Fünf 99, VDEW 06/



**Abbildung 10-3:** Normierte Stromlastgänge der Übergangstage für Haushalte nach /Fünf 99, VDEW 06/



**Abbildung 10-4:** Normierte Stromlastgänge der Wintertage für Haushalte nach /Fünf 99, VDEW 06/

### 10.3 Daten und Kennzahlen der skalierbaren Typgebäude

**Tabelle 10-1: Dimensionierung und Auslegung der Typgebäude**

	Bezeichnung	Einheit	MFH 10	MFH 20
<b>Gebäudedaten</b>	Standort	-	München	
	Sanierungszustand	-	saniert nach WSVO '95	
	Anzahl Wohnungen	WE/Gebäude	10	20
	Bewohner pro WE	Pers./WE	2,2	2,2
	Bewohner pro Gebäude	Pers./Gebäude	22	44
	Wohnfläche	m <sup>2</sup>	698,1	1.396,3
	mittlere Wohnungsgröße	m <sup>2</sup>	69,8	69,8
	Nutzfläche	m <sup>2</sup>	722,8	1.432,2
	Gebäudehüllfläche A	m <sup>2</sup>	1.237,6	2.190,1
	beheiztes Gebäudevolumen V (brutto)	m <sup>3</sup>	2.823,5	5.594,5
	A/V-Verhältnis	1/m	0,44	0,39
<b>Raumheizung</b>	spez. Jahresheizwärmebedarf (Nutzfläche)	kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	66,9	64,4
	spez. Jahresheizwärmebed. (Wohnfläche)	kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	69,4	66,2
	Jahresheizwärmebedarf	kWh/a	48.428	92.377
	Verteilungsverluste (3%)	kWh/a	1.452,9	2.771,3
	Jahresheizwärmeverbrauch	kWh/a	49.881	95.148
<b>Warmwasser</b>	Zapfenergie bezogen auf 38 °C / 10 °C	kWh/(Pers.·a)	774	774
	Zapfenergie bezogen auf 38 °C / 18 °C	kWh/(Pers.·a)	547,5	547,5
	Zapfenergie	kWh/a	12.045	24.090
	Warmwasser- und Zirkulationsleitungen	m	180,2	373,6
	spez. Rohrleitungsverluste	W/m	8	8
	Rohrleitungsverluste	W	1.441,4	2.988,9
	Laufzeit Zirkulationspumpe	h/d	18	18
	Zirkulationsverluste	kWh/a	9.470	19.637
	Aufheizverluste Zirkulationsstart	kWh/a	1.140,1	2.364,0
	Inhalt Warmwasserspeicher	l	500	1.000
	Speicherverluste	kWh/a	985,5	2.062,3
	Trinkwasserwärmeverbrauch	kWh/a	23.641	48.153
<b>Summe</b>	Wärmeverbrauch	kWh/a	73.522	143.301
	Brennerlaufzeit	h/a	1.400	1.400
	Gebäudeauslegungsleistung	kW	52,5	102,4
	gewählte KWK-Anlage	-	Ecopower VKM, SenerTec VKM, Vaillant BZ	Solo Stirling
<b>Strom</b>	Netto-Stromverbrauch pro Person	kWh/(Pers.·a)	1.402	1.402
	Netto-Stromverbrauch	kWh/a	30.844	61.688

## 10.4 Kosten, Erlöse und Gesamtannuität nach VDI-Richtlinie 2067

### 10.4.1 Kosten

In /VDI 2067-1/ werden die Kosten in:

- kapitalgebundene Kosten,
- verbrauchsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten sowie
- sonstige Kosten

unterteilt und in den folgenden Abschnitten erläutert.

#### 10.4.1.1 Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten enthalten nach /VDI 2067-1/ die Ausgaben für Anlagenkomponenten, bauliche Anlagen, Maßnahmen zum Schall- und Wärmeschutz, Anschlusskosten und Aufwendungen für die Instandsetzung. Die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Versorgungssysteme liegen in den Anlagen selbst und deren Konfigurationen. Die baulichen Anlagen (z.B. Schornstein, Heizungsraum, Warmwasser- und Wärmeverteilungssystem inkl. Heizkreisverteiler), die Maßnahmen zum Schall- und Wärmeschutz sowie die Anschlusskosten (Erdgas- und Stromanschluss) fallen jedoch im Rahmen dieser Arbeit für alle Versorgungssysteme gleichermaßen an und werden als gegeben angenommen.

Für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten werden zunächst für alle Anlagenkomponenten der Versorgungssysteme die Investitionskosten  $A_0$ , die Nutzungsdauer  $T_N$ , die Ersatzhäufigkeit  $n$  im Betrachtungszeitraum  $T_B$  und der Instandsetzungsfaktor  $f_K$  ermittelt. Basierend auf den Investitionskosten kann für jede Systemkomponente die Annuität der kapitalgebundenen Kosten  $A_{N,K}$  berechnet werden:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_W) * a + \frac{f_K}{100} * A_0 \quad \text{Gleichung 10-1}$$

$A_0$  Investitionsbetrag in €

$A_{1,2,\dots,n}$  Barwert der 1., 2., ..., n-ten Ersatzbeschaffung in €

$R_W$  Barwert des Restwerts in € am Ende des Betrachtungszeitraums  $T_B$

$a$  Annuitätsfaktor [-]

$f_K$  Faktor für Instandsetzung in %/a von  $A_0$  gemäß Tabelle 10-2

Wie in Gleichung 10-1 ersichtlich ist, werden bei der Annuitätenmethode der Restwert der Bauteile am Ende des Betrachtungszeitraums und die Instandsetzung mit berücksichtigt.

Für Bauteile, deren Nutzungsdauer  $T_N$  geringer ist als der Betrachtungszeitraum  $T_B$ , werden die Barwerte  $A_n$  der Ersatzbeschaffung gemäß /VDI 2067-1/ berechnet.

$$A_n = A_0 * \frac{r^{(n * T_N)}}{q^{(n * T_N)}} \quad \text{Gleichung 10-2}$$

$q$  Zinsfaktor

$r$  Preisänderungsfaktor

$T_N$  Nutzungsdauer in a

Übersteigt die Nutzungsdauer  $T_N$  der betrachteten Komponente bzw. der Ersatzinvestition den Betrachtungszeitraum  $T_B$ , wird diese linear abgeschrieben. Der Restwert  $R_W$  ergibt sich nach der Gleichung 10-3:

$$R_W = A_0 * r^{(n * T_N)} * \frac{(n + 1) * T_N - T_B}{T_N} * \frac{1}{q^T} \quad \text{Gleichung 10-3}$$

Der Annuitätsfaktor  $a$  ergibt sich aus:

$$a = \frac{q^{T_B} * (q - 1)}{q^{T_B} - 1} \quad \text{Gleichung 10-4}$$

In **Tabelle 10-2** sind die rechnerische Nutzungsdauer sowie der Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Bedienung nach /VDI 2067-1/ für die in KWK-Systemen genutzten Anlagenkomponenten aufgeführt. Die grau hinterlegten Positionen werden als gegeben angenommen. Die rechnerischen Nutzungsdauern variieren zwischen 10 und 50 Jahren.

**Tabelle 10-2:** Rechnerische Nutzungsdauer  $T_N$  sowie Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Bedienung nach /VDI 2067-1/

Anlagenkomponente	Rechnerische Nutzungsdauer	Aufwand für Instandsetzung	Aufwand für Wartung	Aufwand für Bedienung
Einheit	a	%/a der Inv.	%/a der Inv.	h/a
<b>Blockheizkraftwerk</b>	15	6	2	100
<b>Gas-Brennwertkessel, wandhängend &lt; 100 kW</b>	18	1,5	1	20
<b>Gas-Brennwertkessel, bodenstehend &lt; 200 kW</b>	20	1	1	20
<b>Spezialkessel f. Gasfeuerung &lt; 120 kW</b>	20	2	1,5	10
<b>Schornsteinanschluss</b>	10	1	1	0
<b>Schornstein</b>	50	1	1	0
<b>Warmwasserspeicher</b>	25	1	0,3	0
<b>Umwälzpumpe</b>	10	2	0	0
<b>Rohrleitungen</b>	40	1	0	0
<b>Dämmung</b>	20	1	0	0
<b>Armaturen</b>	20	1,5	0	0
<b>Ausdehnungsgefäß</b>	15	0	0,5	0
<b>Regelung</b>	20	1,5	1	0
<b>Warmwasserspeicher</b>	25	1	0,3	0
<b>Stromzähler (geeicht) und -anschluss</b>	50	0	0,2	0
<b>Hausanschluss Erdgas</b>	50	0	0	0



Bei der Analyse der kapitalgebundenen Kosten für das gesamte KWK-System ist es nötig, die Barwerte der Komponenten einzeln zu bestimmen und dabei die Ersatzbeschaffung im Betrachtungszeitraum zu berücksichtigen.

Zu den kapitalgebundenen Kosten zählt neben den Annuitäten der Investitionen auch der jährliche Aufwand für die Instandsetzung der Anlagenkomponenten. Der in /VDI 2067-1/ angegebene Wert von 6 %/a der Investitionssumme für Blockheizkraftwerke markiert das obere Ende der Bandbreite. Realistische Werte lassen sich aus Angeboten für Vollwartungsverträge der KWK-Anlagenhersteller oder deren Servicepartner ermitteln. Im Folgenden wird auf die tatsächlichen Kosten für Vollwartungsverträge (Wartung inkl. Instandsetzung) zurückgegriffen, sofern diese Informationen vorliegen.

#### 10.4.1.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten enthalten die Energiekosten  $p_{\text{Brennstoff}}$  (Grund- und Arbeitspreis) des eingesetzten Brennstoffs, die Kosten für den Reststrombezug  $p_{\text{Bezug}}$  inkl. der Hilfsenergie, wenn der Strombedarf des Versorgungsobjektes die Eigenerzeugung übersteigt, und die Kosten für Betriebsstoffe (Schmierstoffe, Betriebsmittel wie Wasseraufbereitung etc.) für das komplette KWK-System /VDI 2067-1/. Die Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten  $A_{N,V}$  wird mit Gleichung 10-5 ermittelt.

$$A_{N,V} = Q_{\text{Brennstoff}} * p_{\text{Brennstoff}} + W_{\text{Bezug}} * p_{\text{Bezug}} + M_{\text{BS}} * p_{\text{BS}} \quad \text{Gleichung 10-5}$$

$Q_{\text{Brennstoff}}$  Brennstoffbedarf des KWK-Systems in kWh/a

$W_{\text{Bezug}}$  Reststrombezug des Versorgungsobjektes und Hilfsenergiebedarf des KWK-Systems in kWh/a

$M_{\text{BS}}$  eingesetzte Betriebsstoffe in l/a oder kg/a

$p$  Preis in €/kWh bzw. €/l oder €/kg

Wie in Abschnitt 10.5.2 bis 10.5.4 dargestellt, gibt es beim Betrieb von KWK-Anlagen unter gewissen Voraussetzungen gesetzliche Vergütungen und Steuervorteile. Die jeweiligen Abschläge auf die Energiekosten hängen von der verbrauchten Brennstoffmenge oder der produzierten Strommenge ab.

#### 10.4.1.3 Betriebsgebundene Kosten

Unter den Oberbegriff „betriebsgebundene Kosten“ fallen gemäß /VDI 2067-1/ die Kosten für die Bedienung, die Reinigung und die Instandhaltung der betreffenden Anlage. Unter Instandhaltung werden die Aufwendungen für Wartung und Inspektionen subsumiert, wohingegen Maßnahmen zur Instandsetzung bereits in den kapitalgebundenen Kosten enthalten sind (siehe Abschnitt 10.4.1.1).

Für die Bedienung werden in der Regel die tatsächlichen Personalkosten (Bedienungspersonal) angesetzt, gleiches gilt für die Reinigungs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten (Material). Wenn keine tatsächlichen Kosten ermittelt werden können, bietet die /VDI 2067-1/ Erfahrungswerte für den Wartungs- und Bedienungsaufwand an. Diese sind in Tabelle 10-2 für die relevanten Anlagenkomponenten der KWK-Systeme aufgeführt und werden entweder prozentual von der Investitionssumme oder nach dem jährlichen Zeitaufwand angegeben. Die Berechnungen der Annuität der betriebsgebundenen Kosten  $A_{N,B}$  erfolgt dann nach Gleichung 10-6.

$$A_{N,B} = f_B * A_0 \quad \text{Gleichung 10-6}$$

$f_B$  Faktor für Wartung in %/a von  $A_0$  gemäß Tabelle 10-2

Der in /VDI 2067-1/ angegebene jährlich anfallende prozentuale Anteil der Investitionskosten für Wartung deckt sich wesentlich besser mit Erfahrungswerten der KWK-Anlagenhersteller oder deren Servicepartnern. Im Folgenden wird auf die tatsächlichen Kosten für Wartungsverträge zurückgegriffen, sofern diese Informationen vorliegen.

#### **10.4.1.4 Sonstige Kosten**

Die sonstigen Kosten  $A_{N,S}$  beinhalten Ausgaben für Versicherungen, Steuern, allgemeine Abgaben (Messkosten, Prüfgebühren) sowie Verwaltungskosten. Diese werden für alle Anlagen als gleich angenommen und können deshalb vernachlässigt werden.

#### **10.4.2 Erlöse**

Grundsätzlich können die Erlöse analog zu den im Abschnitt 10.4.1 dargestellten Kosten aufgeteilt und mit den dort angegebenen Gleichungen berechnet werden, sodass auch eine Annuität der Erlöse  $A_{N,E}$  ausgewiesen werden kann.

##### **10.4.2.1 Kapitalgebundene Erlöse**

Die kapitalgebundenen Erlöse  $A_{N,EK}$  können z.B. in Form von Investitionshilfen oder Zuschüssen aus Förderprogrammen berücksichtigt werden. Dabei ist es aber unerheblich, ob die Erlöse gleich mit den kapitalgebundenen Kosten saldiert werden oder eine getrennte Betrachtung der kapitalgebundenen Erlöse erfolgt. Die Annuität der kapitalgebundenen Erlöse  $A_{N,EK}$  wird analog zu den Kosten mit Gleichung 10-2 berechnet, wenn sie über mehrere Jahre geltend gemacht werden sollen.

##### **10.4.2.2 Verbrauchsgebundene Erlöse**

Die verbrauchsgebundenen Erlöse, wie Vergütungen für Strom und Wärme, nehmen bei den Einnahmen eine dominierende Stellung ein. Dazu kommen noch weitere Erlöse aus gesetzlichen Vergütungen, deren Höhe von der in das Netz eingespeisten Strommenge abhängt (vgl. Abschnitt 10.5.2 bis 10.5.4).

Sowohl der Wärme- als auch der Strompreis werden vom KWK-Anlagenbetreiber festgelegt, da in der Heizkosten-Verordnung eine Wärmeerzeugung mit KWK-Anlagen keine Berücksichtigung findet /HeizV/. Die Brennstoffkosten als bedeutendster Teil der kurzfristigen Grenzkosten beeinflussen die erzielbaren Energiepreise und damit die Erlöse aus dem Energieverkauf. Dabei sollte sich der KWK-Anlagenbetreiber an den marktüblichen Preisen orientieren und hat die Möglichkeit, mit der Preisgestaltung seine Kunden an sich zu binden.

Da bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Jahreskosten ermittelt und alle in dieser Arbeit betrachteten KWK-Systeme mit Erdgas betrieben werden, erfolgt die Einspeisevergütung nach /KWKModG/, bei dem der „übliche Preis“<sup>19)</sup> als Mittelwert über das Jahr 2005 einfließt (vgl. Abschnitt 10.5.2).

Die Berechnungen der Annuität der verbrauchsgebundenen Erlöse  $A_{N,EV}$  erfolgt nach Gleichung 10-7.

<sup>19)</sup> Nach dem KWK-Gesetz ist dies der durchschnittlich erzielte Baseload-Preis des jeweils vorangegangenen Quartals an der Leipziger Strombörse EEX.

$$A_{N,EV} = Q_{\text{Wärme}} * p_{\text{Wärme}} + W_{\text{Strom}} * p_{\text{Strom}} + W_{\text{Einspeisung}} * p_{\text{Vergütung}} \quad \text{Gleichung 10-7}$$

$Q_{\text{Wärme}}$	Wärmeverbrauch des Versorgungsobjektes in kWh/a
$p_{\text{Wärme}}$	Wärmepreis in ct/kWh
$W_{\text{Strom}}$	Stromverbrauch des Versorgungsobjektes in kWh/a
$p_{\text{Strom}}$	Strompreis in ct/kWh
$W_{\text{Einspeisung}}$	in das allgemeine Netz eingespeiste Strommenge in kWh/a
$p_{\text{Vergütung}}$	Vergütung für eingespeisten Strom in ct/kWh

#### 10.4.2.3 Betriebsbedingte Erlöse

Betriebsbedingte Erlöse  $A_{N,EB}$  sind im Zusammenhang mit der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung z.B. dann zu berücksichtigen, wenn das Kraftwerk mit in die Regelleistungsvorhaltung der Übertragungsnetzbetreiber einbezogen wird. In einem solchen Fall wird eine Leistungsbereitstellung vergütet. Dafür ist jedoch notwendig, dass Leistungsreserven für den Bedarfsfall vorgehalten werden. Außerdem ist die Möglichkeit zu schaffen, auf den Betrieb der Anlage von außen einzugreifen (virtuelles Kraftwerk). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden betriebsbedingte Erlöse nicht berücksichtigt.

#### 10.4.3 Gesamtannuität

Bei der Gesamtannuität werden alle Kosten und Erlöse berücksichtigt. Die Differenz aus den Auszahlungs- und Einzahlungsannuitäten ergibt die Gesamtannuität  $A_N$  aller Zahlungen einer Anlage:

$$A_N = A_{N,EK} + A_{N,EV} + A_{N,EB} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S}) \quad \text{Gleichung 10-8}$$

### 10.5 Gesetze und Verordnungen

Im Zusammenhang mit der KWK existiert eine Reihe von Gesetzen und Vorschriften, die während der Planung von KWK-Anlagen bedacht werden muss und die den wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen beeinflusst. Dies wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet und die Relevanz für die KWK erörtert.

#### 10.5.1 Energiewirtschaftsgesetz

Das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung, Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) genannt, wurde im Juli 2005 durch das Zweite Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts ersetzt, welches in einigen Bereichen die Belange der Kraft-Wärme-Kopplung berührt. Die relevanten Punkte werden in diesem Abschnitt erörtert.

Der Zweck des Gesetzes ist, eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas zu gewährleisten. Des Weiteren soll die Regulierung der Elektrizitäts- und Gasversorgungsnetze der Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs dienen.

Wer zur Deckung des Eigenbedarfs eine Anlage zur Erzeugung von Energie betreibt oder sich von einem Dritten versorgen lässt, kann sich nicht auf die allgemeine Anschlusspflicht nach § 18 EnWG, Absatz 2, Satz 1 berufen. Er kann aber Anschluss und Versorgung im

Umfang und zu Bedingungen verlangen, die für das Energieversorgungsunternehmen wirtschaftlich zumutbar sind. Hier existiert eine Ausnahmeregelung für die Deckung des Eigenbedarfs von Tarifabnehmern aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung bis 150 kW<sub>el</sub> und aus erneuerbaren Energien /EnWG 05/.

Gemäß § 37 ist derjenige von der Grundversorgungspflicht des Energieversorgers ausgenommen, wer zur Deckung des Eigenbedarfs eine Anlage zur Erzeugung von Energie betreibt oder sich von einem Dritten versorgen lässt. Dies gilt nicht für in Niederspannung belieferte Haushaltskunden aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung bis 50 kW<sub>el</sub> und aus erneuerbaren Energien /EnWG 05/.

Die Vergütung aufgrund vermiedener Netznutzung ist in § 24 geregelt. Bei Einspeisungen von Elektrizität aus dezentralen Erzeugungsanlagen ist eine Erstattung eingesparter Entgelte für die Netznutzung in den vorgelagerten Netzebenen vorzusehen /EnWG 05/.

In § 110 wird der Begriff „Objektnetz“ definiert. Dort wird erörtert, dass der Betrieb einer KWK-Anlage, der überwiegend der Eigenversorgung dient und sich auf einem räumlich eng zusammengehörenden Gebiet befindet, nicht den gleichen Aufgaben und Verpflichtungen unterliegt, die ein Netzbetreiber zu erfüllen hat. Im EnWG ist vorgesehen, dass die Regulierungsbehörde auf Antrag entscheidet, ob die Voraussetzungen des § 110, Absatz 1 vorliegen /EnWG 05/. Hier ist jedoch die Passage „überwiegend der Eigenversorgung“ kritisch, da z.B. ein Vermieter in einem Mehrfamilienhaus eine KWK-Anlage nicht zur Eigenversorgung installieren wird.

Die Alternative wäre, dass der Betrieb einer KWK-Anlage als „Kundenanlage“ ohne gesetzliche Einschränkungen und Verpflichtungen gilt, die zwischen den Parteien vertraglich geregelt wird.

### **10.5.2 KWK-Gesetz**

Das KWK-Gesetz (KWKModG) regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Strom) auf Basis von Erdgas, anderen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen sowie Steinkohle, Braunkohle, Abfall und Biomasse, der in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird. KWK-Strom, der bereits nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, siehe Abschnitt 10.5.4) vergütet wird, fällt nicht in den Anwendungsbereich dieses Gesetzes. Eine Doppelförderung einer Anlage wird somit explizit ausgeschlossen. Der Zweck und die Inhalte des KWK-Gesetzes wie Kategorien der zuschlagsberechtigten KWK-Anlagen, Höhe und Dauer der Förderung, Deckelung etc. werden nachfolgend erläutert /KWKModG, in Anlehnung an ASUE 02/.

#### **Zweck des Gesetzes**

Durch das KWK-Gesetz sollen KWK-Anlagen über einen befristeten Zeitraum geschützt, die Modernisierung von KWK-Anlagen sowie der Ausbau der Stromerzeugung in kleinen KWK-Anlagen unterstützt und die Markteinführung von Brennstoffzellen-Anlagen gefördert werden. Damit soll ein Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele der Bundesregierung geleistet werden. Das KWK-Gesetz ist am 01.04.2002 in Kraft getreten und gilt bis zum 31.12.2010, sofern durch den Bundestag keine Verlängerung beschlossen wird.

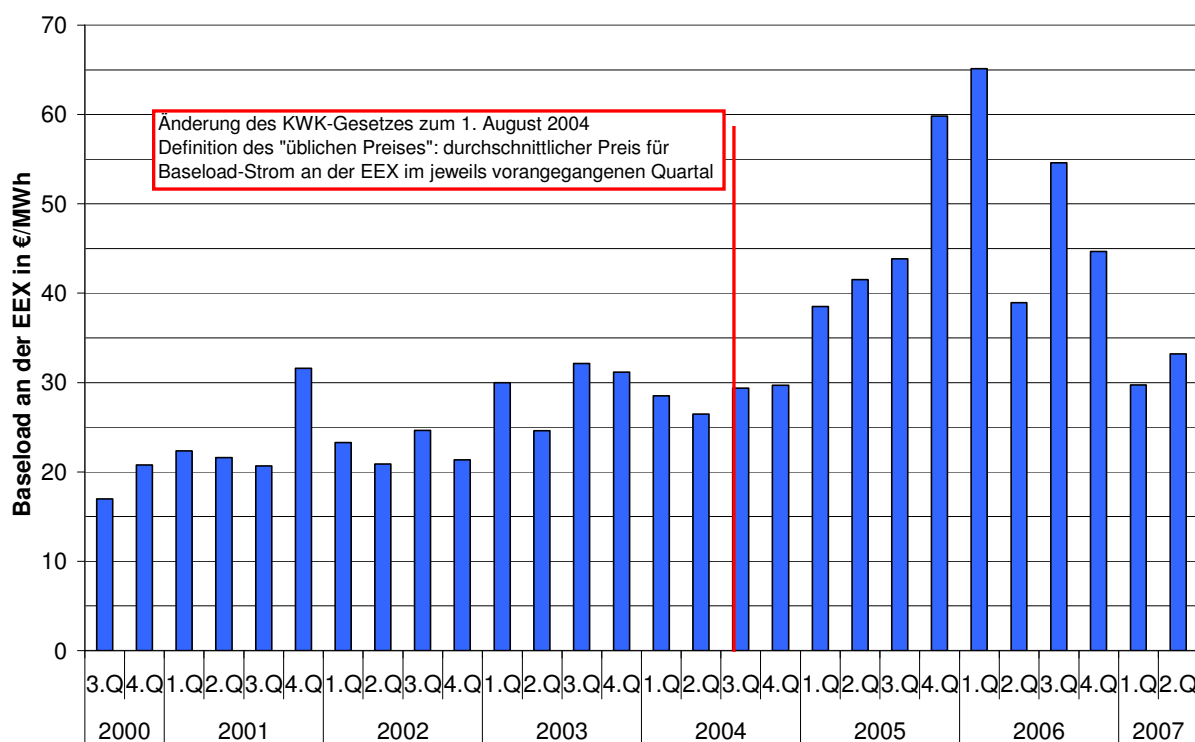
#### **Abnahme- und Vergütungspflicht**

Netzbetreiber sind verpflichtet, zuschlagsberechtigten KWK-Anlagen an ihr Netz anzuschließen und den in diesen Anlagen erzeugten KWK-Strom abzunehmen.

Die Vergütung des KWK-Stroms, der in das allgemeine Netz eingespeist und nicht selbst genutzt wird, besteht i.d.R. aus drei Komponenten: der Stromvergütung nach dem „üblichen Preis“, einen nach den anerkannten Regeln der Technik berechneten Teil der Netznutzungsentgelte, der durch die dezentrale Einspeisung durch diese KWK-Anlage vermieden wird (Kompensationszahlung nach /VV2+/-) und eine Zuschlagszahlung nach dem KWK-Gesetz.

Als üblicher Preis gilt der an der Leipziger Strombörse EEX erzielte durchschnittliche Baseload-Preis des jeweils vorangegangenen Quartals. **Abbildung 10-5** zeigt die Entwicklung der Baseload-Preise an der Leipziger Strombörse im Quartalsmittel ab Mitte 2000. Seitdem sind die Durchschnittspreise für Baseload-Strom von 1,7 auf zwischenzeitlich 6,5 Ct/kWh gestiegen und pendeln nun um ca. 4 Ct/kWh.

Bei der Kompensationszahlung erhält der Einspeiser ein Entgelt, welches den eingesparten Netznutzungsentgelten in den jeweils vorgelagerten Netzebenen entspricht und mit Hilfe des in der Anlage 6 der „Verbändevereinbarung 2 Plus“ angegebenen Formelsatzes berechnet wird /VV2+/-.



**Abbildung 10-5:** Quartals-Durchschnittspreise für Baseload-Strom an der Leipziger Strombörse /EEX 07/

Dabei wird für Einspeisungen aus KWK-Anlagen ohne Leistungsmessung ( $<30 \text{ kW}_{\text{el}}$ ), die in der Regel an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind, die Höhe des Entgeltes in Abhängigkeit von der Jahresbenutzungsdauer  $T$  berechnet. Für  $T < 2.500 \text{ h}$  gilt ein konstanter Wert von  $E_{<2.500} = 0,25 \text{ Ct/kWh}$ , für  $T > 2.500 \text{ h}$  gilt Gleichung 10-9:

$$E_{>2.500} = 0,25 * \frac{T - 2.500 \text{ h}}{8.760 \text{ h} - 2.500 \text{ h}} \text{ ct / kWh} + 0,25 \text{ ct / kWh} \quad \text{Gleichung 10-9}$$

Die VV2+ ist mittlerweile durch den § 18 StromNEV ersetzt. Die vermiedenen Netznutzungs-entgelte müssen den, tatsächlichen gegenüber den vorgelagerten Netz- oder Umspannebenen durch die jeweilige Einspeisung vermiedenen Netzentgelten entsprechen. Für nicht leistungsgemessene Anlagen wird nur der Arbeitspreis kompensiert /StNEV 05/.

Neben der variablen Einspeisevergütung erhält der KWK-Betreiber zusätzlich eine gesetzlich vorgeschriebene Zuschlagszahlung, auf die in den folgenden Abschnitten ausführlich eingegangen wird.

### Kategorien der zuschlagsberechtigten KWK-Anlagen

Zuschlagsberechtigte KWK-Anlagen werden in zwei Kategorien unterschieden. Dabei ist maßgeblich, ob eine KWK-Anlage bereits vor dem Inkrafttreten des KWK-Gesetzes in Dauerbetrieb genommen wurde (Bestands- und modernisierte Anlagen) oder ob dies erst im Anschluss daran erfolgte (Neuanlagen).

Für diese Arbeit sind nur die Neuanlagen genannte KWK-Anlagen relevant, die eine Leistung von bis zu 50 kW<sub>el</sub> haben und die bis zum 31. Dezember 2008 in Dauerbetrieb gehen. Die Beschränkungen gelten nicht für Brennstoffzellen-Anlagen.

### Höhe des Zuschlags und Dauer der Förderung

Der Gesetzgeber hat eine Beschränkung der Gesamthöhe in Bezug auf die Zuschlagszahlungen für „neue kleine KWK-Anlagen“ vorgeschrieben. Insgesamt 14 Mrd. kWh KWK-Strom aus neuen kleinen KWK-Anlagen (Leistung bis 2 MW<sub>el</sub>) gelten als zuschlagsberechtigt. Sobald die durch neue kleine KWK-Anlagen eingespeiste KWK-Strommenge auf über 11 Mrd. kWh anwächst, werden die Zuschlagszahlungen nur noch bis zum 31. Dezember des darauf folgenden Jahres weitergeführt. Die Höhe des Zuschlages und die Dauer der Zahlung sind der **Tabelle 10-3** zu entnehmen.

**Tabelle 10-3:** Zuschlagszahlungen nach dem KWK-Gesetz

Angaben in €-Cent pro kWh <sub>el</sub>	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>alte Bestandsanlagen</b>	1,53	1,53	1,38	1,38	0,97				
<b>neue Bestandsanlagen</b>	1,53	1,53	1,38	1,38	1,23	1,23	0,82	0,56	
<b>modernisierte Anlagen</b>	1,74	1,74	1,74	1,69	1,69	1,64	1,64	1,59	1,59
<b>neue kleine KWK-Anlagen</b> > 50 kW <sub>el</sub> bis < 2 MW <sub>el</sub> und < 50 kW <sub>el</sub> (Inbetriebnahme nach dem 31.12.2008)	2,56	2,56	2,40	2,40	2,25	2,25	2,10	2,10	1,94
<b>neue kleine KWK-Anlagen</b> < 50 kW <sub>el</sub> (Inbetriebnahme zwischen 01.04.2002 und 31.12.2008)	5,11 für einen Zeitraum von 10 Jahren ab Aufnahme des Dauerbetriebes der Anlage								
<b>neue Brennstoffzellen</b> (Inbetriebnahme nach 01.04.2002)	5,11 für einen Zeitraum von 10 Jahren ab Aufnahme des Dauerbetriebes der Anlage								

Eine Ausnahmeregelung besteht für kleine KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 50 kW<sub>el</sub>, die zwischen dem 1. April 2002 und dem 31. Dezember 2008, sowie für Brennstoff-

zellen-Anlagen, die nach dem 1. April 2002 den Dauerbetrieb aufgenommen haben. In diesen Fällen ist das KWK-Gesetz jeweils bis zum Ende der 10 Jahre umfassenden Vergütungsdauer weiter anzuwenden /KWKModG, in Anlehnung an ASUE 02/.

Ende 2004 sollte eine Zwischenüberprüfung über die Erreichung der CO<sub>2</sub>-Minderungsziele, die mit 10 Mio. t für 2005 und 20 Mio. t für 2010 quantifiziert wurden, über die Entwicklung der Rahmenbedingungen für den wirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen und über das Finanzvolumen durchgeführt werden. Sollten nach dem Ergebnis der Zwischenüberprüfung die genannten Ziele und Vorgaben nicht erreicht werden, sind von der Bundesregierung geeignete Maßnahmen zur Zielerreichung vorzuschlagen.

Das Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieverwendung (IER) an der Universität Stuttgart hat im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums ein Gutachten zur Wirksamkeit des KWK-Gesetzes angefertigt, welches im April 2006 den Verbänden und der Politik vorgestellt wurde. Hier wurde eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 8,5 bis 10 Mio. t für 2005 und 11,4 bis 13,4 Mio. t für 2010 ausgewiesen /IER 05/. In /E&M 06/ werden die präsentierten Zahlen als zu hoch angezweifelt und es wird auf eine Plausibilitätsprüfung verwiesen. Die Diskussion um die tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Mengen, die durch den Einsatz von KWK eingespart wurden, ist damit nicht beendet sondern weiter angefacht.

### **Kosten für KWK-Betreiber**

Für Amtshandlungen, wie z.B. Bearbeitung des Zulassungsantrages, werden Kosten (Gebühren und Auslagen) fällig. Diese sind in der „Verordnung über Gebühren und Auslagen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle bei der Durchführung des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes“ vom 2. April 2002 festgelegt und reichen von 75 € für kleine KWK-Anlagen bis zu 600 € für komplexe Anlagen /KWKModG, in Anlehnung an ASUE 02/.

### **10.5.3 Ökologische Steuerreform**

Am 1. April 1999 ist das Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform in Kraft getreten. Über eine Stromsteuer und eine erhöhte Mineralölsteuer sollen in mehreren Stufen Anreize zur Verbreitung dezentraler Energieversorgungsstrukturen und sparsamer Technologien, die zur Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung beitragen, geschaffen werden. Das Gesetz verteuert dabei einerseits die Verwendung von Energie, bietet andererseits aber steuerliche Vorteile für KWK-Anlagen.

Am 1. Januar 2003 ist die fünfte Stufe des Gesetzes in Kraft getreten. Aus dem Netz bezogene Elektrizität und eigenerzeugter Strom aus Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 2 MW unterliegen seitdem grundsätzlich einer Stromsteuer von 2,05 Ct/kWh<sub>el</sub>. Strom ist von dieser Steuer befreit, wenn er in Anlagen mit einer Nennleistung bis zu 2 MW<sub>el</sub> erzeugt und in räumlichen Zusammenhang zu dieser Anlage entnommen und von demjenigen, der die Anlage betreibt oder betreiben lässt, genutzt wird. Dieser räumliche Zusammenhang ist auch dann gegeben, wenn der Strom in ein örtliches Verteilnetz, also das Nieder- oder Mittelspannungsnetz, eingespeist wird und aus diesem Netz ohne Umspannung wieder entnommen wird /FGDüs 03/.

Zusätzlich wurde die Öko-Mineralölsteuer für Brennstoffe erhöht, sie beträgt seit dem 1. Januar 2003 für Heizöl 2,05 Ct/l und für Erdgas 0,366 Ct/kWh (H<sub>o</sub>). KWK-Anlagen mit einem Jahresnutzungsgrad  $\geq 60$  % werden jedoch von der Öko-Mineralölsteuer befreit. Für KWK-Anlagen mit einem Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad  $\geq 70$  % entfällt sogar die gesamte Mineralölsteuer, d.h. sowohl die seit dem 1. Januar 2003 gültige Öko-Mineralölsteuer als auch die bereits vor dem 1. April 1999 abzuführende Mineralölsteuer. **Tabelle 10-4** und

**Tabelle 10-5** liefern eine Übersicht über die Steuersätze in Abhängigkeit von Betreiber, Anlagengröße und Jahresnutzungsgrad /ÖkoSR 99, in Anlehnung an ASUE 03/.

**Tabelle 10-4:** Übersicht über die Steuersätze für das Allgemeine Gewerbe und Contractoren in Abhängigkeit von Anlagengröße und Jahresnutzungsgrad

	ohne KWK	mit KWK-Anlage			
		$\leq 2 \text{ MW}$		$> 2 \text{ MW}$	
		60 bis $\leq 70 \%$	$> 70 \%$	60 bis $\leq 70 \%$	$> 70 \%$
<b>Stromsteuer</b>	2,05 Ct/kWh <sub>el</sub>	0	0	2,05 Ct/kWh <sub>el</sub>	2,05 Ct/kWh <sub>el</sub>
<b>bisherige Mineralölsteuer auf Erdgas</b>	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0
<b>zus. Mineralölsteuer auf Erdgas (Ökosteuern)</b>	0,366 Ct/kWh <sub>th</sub>	0	0	0	0

**Tabelle 10-5:** Übersicht über die Steuersätze für Energieversorger in Abhängigkeit von Anlagengröße und Jahresnutzungsgrad

	ohne KWK	mit KWK-Anlage			
		$\leq 2 \text{ MW}$		$> 2 \text{ MW}$	
		60 bis $\leq 70 \%$	$> 70 \%$	60 bis $\leq 70 \%$	$> 70 \%$
<b>Stromsteuer</b>	durchlaufender Posten				
<b>bisherige Mineralölsteuer auf Erdgas</b>	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0	0,184 Ct/kWh <sub>th</sub>	0
<b>zus. Mineralölsteuer auf Erdgas (Ökosteuern)</b>	0,2196 Ct/kWh <sub>th</sub>	0	0	0	0

Am 1.7.2006 löste das Energiesteuergesetz das Mineralölsteuergesetz ab. Die Steuersätze sind gleich geblieben. Für KWK-Anlagen ist eine Vereinfachung eingeführt worden. Eine Erlaubnis vom Hauptzollamt zum Betrieb von KWK-Anlagen ist nicht mehr erforderlich /EnStG 06/.

#### 10.5.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz

Ziel des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) ist es, im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen. Das Gesetz regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom aus regenerativen Energieträgern.

Danach sind Netzbetreiber verpflichtet, Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Grubengas unverzüglich vorrangig an ihr Netz anzuschließen und den gesamten aus diesen Anlagen angebotenen Strom vorrangig abzunehmen, zu übertragen und zu vergüten. Der vorgelagerte Übertragungsnetzbetreiber ist ebenso zur vorrangigen



Abnahme und Übertragung der von dem Netzbetreiber aufgenommenen Energiemenge verpflichtet.

Im Zusammenhang mit der Kraft-Wärme-Kopplung sind § 7 und § 8 relevant, in denen die Vergütung für Strom aus Deponie-, Klär- und Grubengas sowie aus Biomasse geregelt wird. Tabelle 10-6 enthält die aktuellen Vergütungssätze für Strom aus Deponie-, Klär- und Grubengas sowie Biomasse in Abhängigkeit von der Anlagengröße.

**Tabelle 10-6:** Übersicht über die Vergütungssätze für Strom aus Deponie-, Klär- und Grubengas sowie Biomasse in Abhängigkeit von der Anlagengröße nach /EEG 04/

Brennstoff	Einheit	Deponie-, Klär-, Grubengas <sup>20)</sup>		Biomasse			
<b>Leistung</b>	MW <sub>el</sub>	≤ 0,5	≤ 5	≤ 0,15	≤ 0,5	≤ 5	5 - ≤ 20
<b>Vergütung</b>	Ct/kWh <sub>el</sub>	7,67	6,65	11,5	9,9	8,9	8,4
<b>Bonus für Pflanzen / Gülle</b>	Ct/kWh <sub>el</sub>	-	-	+6,0	+6,0	+4,0	+0,0
<b>KWK-Bonus</b>	Ct/kWh <sub>el</sub>	-	-	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0
<b>Technologie-Bonus</b>	Ct/kWh <sub>el</sub>	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+0,0

Bei Einsatz von Deponie- und Klärgas existiert für die Förderung des eingespeisten Stroms eine Leistungsobergrenze von 5 MW<sub>el</sub>. Der Vergütungssatz liegt bei Anlagen mit einer Leistung bis einschließlich 500 kW<sub>el</sub> bei 7,67 Ct/kWh<sub>el</sub>, darüber bei 6,65 Ct/kWh<sub>el</sub>. Bei Anlagen mit einer Leistung über 500 kW wird nach Gleichung 10-10 der Anteil des eingespeisten Stroms, der dem Verhältnis von 500 kW zur tatsächlichen Leistung der Anlage P<sub>B</sub> entspricht, mit dem hohen Vergütungssatz entlohnt, der restliche Strom erhält den geringeren Vergütungssatz /VDN 03/.

$$V = A * \left[ \left( \frac{500 \text{ kW}}{P_B} \right) * 7,67 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}} + \left( \frac{P_B - 500 \text{ kW}}{P_B} \right) * 6,65 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}} \right] \quad \text{Gleichung 10-10}$$

Auf der Basis von Biomasse sind Anlagen bis zu einer installierten Leistung von 20 MW<sub>el</sub> förderfähig. Die jeweilige Vergütung wird analog für die aus Tabelle 10-6 entnommenen Werte gemäß Gleichung 10-10 berechnet.

Die Biomasse-Verordnung (BiomasseV) vom 21. Juni 2001 regelt, welche Stoffe und technischen Verfahren bei der energetischen Nutzung von Biomasse in den Anwendungsbereich des EEG fallen und welche Umweltauflagen dabei einzuhalten sind /BioV 01/.

Die Vergütungssätze können unter bestimmten Voraussetzungen durch verschiedene Bonussätze erhöht werden. So erhält der eingespeiste Strom aus Biomasse-Anlagen einen Bonus, wenn ausschließlich Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder im Rahmen der Landschaftspflege anfallen, und/oder Gülle eingesetzt werden.

<sup>20)</sup> bei Grubengas gibt es keine Leistungsbegrenzung auf 5 MW<sub>el</sub>

Der KWK-Bonus wird für Strom aus Biomasse-Anlagen gezahlt, sofern es sich um Anlagen im Sinne des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes handelt und dem Netzbetreiber ein entsprechender Nachweis nach dem von der AGFW e.V. herausgegebenen Arbeitsblatt FW 308 vorgelegt wird. Anstelle des Nachweises können für serienmäßig hergestellte KWK-Anlagen mit einer Leistung von bis zu 2 MW geeignete Unterlagen des Herstellers vorgelegt werden, aus denen die thermische und elektrische Leistung sowie die Stromkennzahl hervorgehen.

Sowohl bei den Vergütungssätzen für Strom aus Deponie-, Klär- und Grubengas als auch für Biomasse wird ein Technologie-Bonus gezahlt, sofern die eingesetzte Biomasse durch thermochemische Vergasung oder Trockenfermentation umgewandelt, das zur Stromerzeugung eingespeiste Gas auf Erdgasqualität aufbereitet worden ist oder der Strom mittels Brennstoffzellen, Gasturbinen, Dampfmotoren, Organic-Rankine-Anlagen, Mehrstoffgemisch-Anlagen, insbesondere Kalina-Cycle-Anlagen, oder Stirling-Motoren gewonnen wird.

Die Mindestvergütung sinkt beginnend mit dem 1. Januar 2005 jährlich um jeweils 1,5 % für ab diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen. Die Vergütungssätze bleiben dann für die gesamte Förderdauer von 20 Jahren plus das Jahr der Inbetriebnahme unverändert /EEG 04/.

### **10.5.5 Emissionshandel**

Der Emissionshandel ist das von der Europäischen Union und deren Mitgliedsstaaten festgelegte primäre Instrument zur Erfüllung der Anforderungen aus dem Kyoto-Protokoll. Die wesentliche Funktionsweise wird beschrieben mit dem Schlagwort „cap and trade“, d.h. für alle am Handel teilnehmenden Parteien wird eine verbindliche absolute Obergrenze für die zulässigen Emissionen festgelegt, indem entsprechende Mengen an Emissionsrechten zugeteilt werden. Der jährliche Abgleich von tatsächlichen Emissionen und zugeteilten Rechten mit entsprechenden Sanktionen stellt sicher, dass keine Partei mehr Emissionen erzeugt als Rechte vorhanden sind. Der Handel mit Rechten stellt im Idealfall eine kostenoptimale Erfüllung der Emissionsminderungsziele sicher, da Emissionen dort reduziert werden, wo dies unterhalb des Marktpreises möglich ist und dort Rechte zugekauft werden, wo die Reduktion nur zu Kosten oberhalb des Marktpreises möglich ist.

Der Emissionshandel hat für KWK-Anlagen den Nachteil, dass die durch KWK erzeugte Wärme i.d.R. mit Anlagen außerhalb des Zertifikatehandels, wie z.B. Heizanlagen zur Gebäudeheizung konkurriert. Um diesen Nachteil auszugleichen werden KWK-Anlagen bei der Zuteilung mit einem KWK-Bonus in Form zusätzlicher Emissionsrechte (27 kg/MWh) bedacht. Ob dieser Bonus im Vergleich zur ungekoppelten Erzeugung einen Wettbewerbsvorteil bedeutet, ist anlagenabhängig und wird stark von Stromkennzahl, Nutzungsgrad und Brennstoff bestimmt /Roon 05/.

Der Emissionshandel ist in der aktuellen 1. Zuteilungsperiode (2005 bis 2007) beschränkt auf energieintensive Branchen. Der Sektor Energieerzeugung/-umwandlung ist selbstverständlich betroffen, wobei die Frage, ob eine Anlage vom Emissionshandel betroffen ist, zusätzlich von der Anlagengröße abhängt. Im Bereich Energieerzeugung/-umwandlung besteht erst ab einer Anlagenleistung von 20 MW (Feuerungswärmeleistung) eine Verpflichtung zur Teilnahme am Emissionshandel /TEHG 04/.

### **10.5.6 Verordnungen über den wärmetechnischen Standard von Gebäuden**

Zur Definition der wärmetechnischen Anforderungen von Gebäuden gab es in der nahen Vergangenheit zwei Verordnungen, die zum jeweiligen Zeitpunkt die einzuhaltenden Grenz-

werte vorgeschrieben haben. Die 1995 noch getrennten Verordnungen über den Wärmeschutz und die Heizanlagen wurden in der Verordnung von 2002 gemeinsam behandelt.

#### **10.5.6.1 Wärmeschutzverordnung '95 / Heizanlagenverordnung**

Vor der Energieeinsparverordnung (EnEV, siehe folgender Abschnitt) von 2002 war die Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSV '95) und die Heizungsanlagenverordnung (HeizAnIV '98) in der letzten Fassung von 1998 gültig.

Die WSV '95 begrenzte durch ihre Vorgaben den Jahresheizwärmebedarf für Wohnhäuser im Neubau und baulich veränderte Bestandsgebäude. Hier wurde insbesondere auf eine dichte bauliche Hülle, das heißt Dämmmaßnahmen Wert gelegt, um Wärmeverluste weitgehend zu vermeiden. Die Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz von Gebäuden trat am 1. Januar 1995 in Kraft.

Der wesentliche Unterschied zwischen der WSV '95 und der EnEV besteht darin, dass bei der WSV '95 die Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs durch Bilanzierung der Wärmeverluste, infolge von Transmission und Lüftung sowie der nutzbaren internen und passiven-solaren Wärmegegewinne, durchgeführt wird. Bei der EnEV dagegen, geht der bisher vorgeschriebene Nachweis des Heizwärmebedarfs darüber hinaus, indem für zu errichtende Gebäude mit normalen Innentemperaturen zusätzlich eine Berechnung des Jahres-Heizenergiebedarfs und des dafür benötigten Jahres-Primärenergiebedarfs verlangt wird. Bei der erweiterten Bilanzierung berücksichtigt die EnEV im Vergleich zur WSV '95 noch zusätzlich:

- den Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung bei Wohngebäuden;
- die Verluste der Anlagentechnik bei der Wärmebereitstellung;
- den elektrischen Hilfsenergiebedarf der Anlagentechnik (Pumpen, Brenner usw.);
- die energetischen Auswirkungen von mechanisch betriebenen Lüftungsanlagen.

In der WSV '95 gab es zusätzlich zum ausführlichen Verfahren (Begrenzung des maximal zulässigen Jahres-Heizwärmebedarfs für Gebäude mit normalen Innentemperaturen) ein vereinfachtes Rechenverfahren, bei dem die maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten für Wohngebäude mit bis zu zwei Vollgeschossen und nicht mehr als drei Wohneinheiten der Bauteile nicht überschritten werden durften. Die Anforderungen der EnEV dagegen bestehen für alle zu errichtenden Gebäude mit normalen Innentemperaturen in der Begrenzung des maximal zulässigen Jahres-Primärenergiebedarfs. Weiterhin werden in der EnEV getrennte Höchstwerte für die Transmissionswärmeverluste festgeschrieben. Damit soll verhindert werden, dass eine hochwertige Anlagentechnik in zu hohem Maße zur Kompensation einer ungenügenden Wärmedämmung genutzt wird. Das Niveau des Wärmeschutzes, das in der WSV '95 festgelegt wurde, soll im Wesentlichen erhalten bleiben.

Die HeizAnIV '98 enthielt Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Warmwasseranlagen mit einer thermischen Nennleistung von mindestens 4 kW. Dazu gehörten mit Wasser als Wärmeträger betriebene Zentralheizungen oder Einzelheizgeräte, soweit sie der Raumheizung dienen. Heizkessel für Zentralheizungen durften nur dann in Betrieb genommen werden, wenn die Nennleistung nicht größer war als der nach den anerkannten Regeln der Technik berechnete Gebäudewärmebedarf. Dabei waren aber angemessene Zuschläge für raumluftechnische Anlagen sowie Sonstiges zulässig. Neben Dimensionierungsregeln für Heizkessel enthielt die HeizAnIV '98 noch Bestimmungen zu:

- der Verminderung von Bereitschafts- und Wärmeverlusten der Heizkessel bzw. Wärmeverlusten der Rohrleitungen und Armaturen;

- der Notwendigkeit von Einrichtungen zur raumweisen Temperaturregelung;
- dem Betrieb der Warmwasseranlagen inkl. Temperaturbegrenzung auf 60 °C;
- den Pflichten des Betreibers (Wartung, Instandhaltung).

### 10.5.6.2 Energieeinsparverordnung

Die Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, kurz Energieeinsparverordnung (EnEV), trat am 1. Februar 2002 in Kraft und ersetzt die WSV '95 sowie die HeizAnIV '98. Sie beinhaltet den Ansatz, Bauphysik und Heizungsanlagentechnik nicht getrennt, sondern gemeinsam zu betrachten.

Die EnEV begrenzt den zulässigen Primärenergiebedarf des Gebäudes und beinhaltet auch den verbrauchten Brennstoff (Öl, Gas, Holz, Strom etc.) sowie den Aufwand für dessen Bereitstellung, inklusive Förderung, Veredelung (z.B. Raffinerie), Transport, Energiewandlung, Wärmeverteilung, Regelung etc. Dies bedeutet, dass der Primärenergiebedarf auch in einem weniger gut wärmedämmten Haus unter dem zulässigen Grenzwert gehalten werden kann, wenn die Heizungsanlagentechnik entsprechend gewählt wird. Die Berechnung des Primärenergiebedarfs  $Q_p$  erfolgt nach Gleichung 10-11:

$$Q_p = (Q_h + Q_{tw}) \cdot e_p \leq Q_{p,max} \quad \text{Gleichung 10-11}$$

$Q_h$	Jahresheizwärmebedarf nach DIN V 4108-6 (basiert auf EN 832)
$Q_{tw}$	Wärmebedarf für das Trinkwasser nach EnEV
$e_p$	Anlagen-Aufwandszahl nach DIN V 4701-10 als Ergebnis der Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung
$Q_{p,max}$	maximal zulässiger Primärenergiebedarf

Zur Ermittlung der Anlagen-Aufwandszahl gibt es verschiedene Verfahren. Am einfachsten ist hier das Diagrammverfahren. Wenn die Anlagenkonfiguration (Heizung, Warmwasser und Lüftung) bekannt ist und in einer der Diagramme der DIN V 4701-10 enthalten ist, kann die Anlagen-Aufwandszahl direkt aus dem Diagramm abgelesen werden. Als genaueres Verfahren bietet sich das Tabellenverfahren mit Standardwerten aus der DIN V 4701-10 oder sofern vorhanden mit Herstellerangaben an /DIN 4701-10/.

Bei der Berechnung der Anlagen-Aufwandszahl wird die gesamte Vorkette der Energiegewinnung berücksichtigt und stellt damit einen Qualitätsmaßstab für die Heizungsanlage dar.

Die EnEV unterscheidet in ihrer Vorgabe der Grenzwerte bei zu errichtenden Gebäuden zwischen normalen und niedrigen Innentemperaturen sowie dem Fensterflächenanteil und gibt Anforderungen an die Dichtigkeit und den Mindestwärmeschutz vor.

Bei Veränderungen an bestehenden Gebäuden gibt die EnEV Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenbauteile vor, wenn davon mindestens 20 % der Bauteilflächen betroffen sind. Diese Bedingung ist auch dann erfüllt, wenn das gesamte Gebäude die Vorgaben für zu errichtende Gebäude um nicht mehr als 40 % überschreiten.

### Relevanz der EnEV für KWK-Anlagen

Zu errichtende Gebäude mit normaler Innentemperatur unterliegen nicht der Begrenzung des Jahres-Primärenergiebedarfs, sofern sie zu mindestens 70 % durch Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung beheizt werden. Da man sich aber auf das Erreichen dieses Wertes i.d.R.

nicht verlassen kann, sollte die im letzten Abschnitt beschriebene Vorgehensweise zur Berechnung durchgeführt werden.

Im Rechenverfahren nach DIN V 4701-10, auf das die EnEV verweist und das grundsätzlich auch als Basis für die Bestimmung des Grenzwertes des Jahres-Primärenergiebedarfs nach § 3 Abs. 3 Nr. 1 gelten muss, kann der für den Nachweis erforderliche Primärenergiefaktor für Fern- oder Nahwärme pauschal nach der DIN V 4701-10, Tabelle C.4-1 oder durch Berechnung nach Nr. 5.4.1 oder 5.4.2 ermittelt werden.

Bei der pauschalen Ermittlung nach Tabelle C.4-1 kann als Randbedingung entweder die Bereitstellung der Wärme durch Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (Primärenergiefaktor bei fossilen Brennstoffen: 0,7; bei erneuerbaren Brennstoffen: 0,0) oder durch Heizwerke (Primärenergiefaktor bei fossilen Brennstoffen: 1,3; bei erneuerbaren Brennstoffen: 0,1) angenommen werden. Erfolgt eine Wärmebereitstellung vollständig auf eine der genannten Arten, kann der Planer die pauschalen Faktoren nutzen.

I.d.R. liegt jedoch ein Mischfall unterschiedlicher Wärmeerzeuger vor. Für diese Fälle haben die genannten pauschalen Angaben keine Gültigkeit. Der Primärenergiefaktor muss in diesem Fall für das konkrete Wärmeversorgungssystem nach DIN V 4701-10, Nr. 5.4.1 (oder im Falle geplanter Netze nach 5.4.2) ermittelt werden.

Die Regelung des § 3 Abs. 3 Nr. 1 muss nicht zwingend in Anspruch genommen werden. Für die Mehrzahl der Fälle ist ein Nachweis der Begrenzung des Jahres-Primärenergiebedarfs nach DIN V 4701-10 möglich und nach der Verordnung auch zulässig. Es ist ferner davon auszugehen, dass sich dabei für den Bauherrn im Allgemeinen keine schärferen materiellen Anforderungen ergeben als im Falle der Inanspruchnahme der Regelung des § 3 Abs. 3 Nr. 1./DIBt 02, EnEV 02/

## 10.6 Auswertungshilfen

**Tabelle 10-7:** Ergebnisprotokoll zur Auswertung von Simulationsdurchläufen

Ergebnisprotokoll KWK-System			Vorgabe	Ergebnis: V..Vektor, S..Skalar		Rechnung
KWK-Anlage						
el. Leistung $P_{el,KWK}$	kW	max min	V	Vorlauftemperatur $T_{VL,KWK}$	°C	V
Stromproduktion $W_{el,KWK}$	kWh/a	S		Rücklauftemperatur $T_{RL,KWK}$	°C	V
th. Leistung $P_{th,KWK}$	kW	max min	V	el. Nutzungsgrad $g_{el,KWK}$	%	
Wärmeproduktion $Q_{th,KWK}$	kWh/a	S		th. Nutzungsgrad $g_{th,KWK}$	%	
Brennstoffleistung $P_{Gas,KWK}$	kW	V		Gesamtnutzungsgrad $g_{ges,KWK}$	%	
Brennstoffverbrauch $Q_{Gas,KWK}$	kWh/a	S		Laufzeit $t_{KWK}$	h/a	S
				Anlagenstarts $a_{KWK}$	1/a	S
Spitzenlastkessel						
th. Nennleistung $P_{th,SLK}$	kW	max min	V	Vorlauftemperatur $T_{VL,SLK}$	°C	V
Wärmeproduktion $Q_{th,SLK}$	kWh/a	S		Rücklauftemperatur $T_{RL,SLK}$	°C	V
Brennstoffleistung $P_{Gas,SLK}$	kW	V		th. Nutzungsgrad $g_{th,SLK}$	%	
Brennstoffverbrauch $Q_{Gas,SLK}$	kWh/a	S		Laufzeit $t_{SLK}$	h/a	S
				Anlagenstarts $a_{SLK}$	1/a	S
Verbraucher						
Gebäudegröße	WE			WWSP-Ladeleistung $P_{WWSP-Lad}$	kW	V
Heizleistung $P_{HK}$	kW	V		WWSP-Ladung $Q_{WWSP-Ladung}$	kWh/a	S
Raumwärmeverbrauch $Q_{HK}$	kWh/a			Zapfenergie $Q_{WW}$	kWh/a	
Gebäudeauslegungsleistung $P_{Geb}$	kW			Vorlauftemperatur $T_{VL,WWSP-Ladung}$	°C	V
Vorlauftemperatur $T_{VL,HK}$	°C	V		Rücklauftemperatur $T_{RL,WWSP-Lad}$	°C	V
Rücklauftemperatur $T_{RL,HK}$	°C	V		Zirkulationsverluste $Q_{Zirk}$	kWh/a	S
Volumen Pufferspeicher $V_{PS}$	l			Volumen WW-Speicher $V_{PS}$	l	
Verluste Pufferspeicher $Q_{PS}$	kWh/a	S		Verluste WW-Speicher $Q_{PS}$	kWh/a	S
Strombedarf $W_{Gebäude}$	kWh/a			KWK-Strom-Nutzungsmodell	-	
Allgemein						
Primärenergieeinsatz $PE_{ges.}$	kWh/a			Stromeigennutzung $W_{Nutzung}$	kWh/a	S
PE-Einsatz KWK-Strom $PE_{el,KWK}$	kWh/a			Reststrombezug $W_{Bezug}$	kWh/a	S
PE-Einsatz Strombezug $PE_{el,Netz}$	kWh/a			Rückspeisung $W_{Einspeisung}$	kWh/a	S
PE-Einsatz KWK-Wärme $PE_{th,KWK}$	kWh/a			el. KWK-Bedarfsdeckungsgrad $d_{el,KWK,Bedarf}$	%	
PE-Einsatz SLK-Wärme $PE_{th,SLK}$	kWh/a			el. KWK-Produktionsdeckungsgrad $d_{el,KWK,Prod.}$	%	
Anteil $P_{th,KWK}/P_{Geb}$	%			th. KWK-Deckungsgrad $d_{th,KWK}$	%	
Systemnutzungsgrad $g_{System}$	%			th. SLK-Deckungsgrad $d_{th,SLK}$	%	
Wirtschaftlichkeit						
Interner Zinsfuß IRR	%			Stromgestehungskosten $k_{Strom}$	ct/kWh	
Amortisationszeit $t_{amort}$	a			Wärmegestehungskosten $k_{Wärme}$	ct/kWh	

## 10.7 Einstellungen bei der Validierung der Simulation

**Tabelle 10-8:** Einstellungen für das SenerTec-KWK-System im Startmenü der Simulation zum Vergleich der Tagessummen

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	SenerTec	SLK-Einschalthyst.	K	10
Anschluss SLK	-	hinter PS	SLK-Ausschalthyst.	K	0
Anschluss WWSP	-	an HKV	Bivalenzverzögerung	min	30
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	500
KWK-Mindestlaufzeit	min	60	PS	l	1.000
Externer Lastgang	h	5:00 – 7:00 10:00 – 12:00	Zeitschritt	s	15

**Tabelle 10-9:** Einstellungen für das Ecopower-KWK-System im Startmenü der Simulation zum Vergleich der Tagessummen

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	Ecopower	SLK-Einschalthyst.	K	8
Anschluss SLK	-	parallel PS	SLK-Ausschalthyst.	K	2
Anschluss WWSP	-	an PS	Bivalenzverzögerung	min	0
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	500
KWK-Mindestlaufzeit	min	-	PS	l	1.000
Externer Lastgang	h	-	Zeitschritt	s	15

## 10.8 Einstellungen bei den Variationen der KWK-Systeme

**Tabelle 10-10:** Einstellungen bei der Variation der Speichervolumina für das SenerTec-KWK-System im Startmenü der Simulation

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	SenerTec	SLK-Einschalthyst.	K	10
Anschluss SLK	-	hinter PS	SLK-Ausschalthyst.	K	0
Anschluss WWSP	-	an HKV	Bivalenzverzögerung	min	30
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	250 - 750
KWK-Mindestlaufzeit	min	60	PS	l	500 – 2·1.000
Externer Lastgang	h	5:00 – 7:00 10:00 – 12:00	Zeitschritt	s	15

**Tabelle 10-11:** Einstellungen bei der Variation des Anteils  $P_{th,KWK}/P_{Geb}$  für das KWK-System mit Ecopower-Regelungscharakteristik im Startmenü der Simulation

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	Ecopower	SLK-Einschalthyst.	K	8
Anschluss SLK	-	parallel PS	SLK-Ausschalthyst.	K	2
Anschluss WWSP	-	an PS	Bivalenzverzögerung	min	0
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	300
KWK-Mindestlaufzeit	min	-	PS	l	500 – 2·1.000
Externer Lastgang	h	-	Zeitschritt	s	15

**Tabelle 10-12:** Einstellungen bei der Variation „Leistungsmodulation vs. feste Nennleistung“ für das SenerTec-KWK-System im Startmenü der Simulation

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	SenerTec	SLK-Einschalthyst.	K	10
Anschluss SLK	-	hinter PS	SLK-Ausschalthyst.	K	0
Anschluss WWSP	-	an HKV	Bivalenzverzögerung	min	30
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	300
KWK-Mindestlaufzeit	min	60	PS	l	1.000
Externer Lastgang	h	5:00 – 7:00 10:00 – 12:00	Zeitschritt	s	15

**Tabelle 10-13:** Einstellungen bei der Variation „Leistungsmodulation vs. feste Nennleistung“ für das Ecopower-KWK-System im Startmenü der Simulation

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
KWK-Anlage	-	Ecopower	SLK-Einschalthyst.	K	8
Anschluss SLK	-	parallel PS	SLK-Ausschalthyst.	K	2
Anschluss WWSP	-	an PS	Bivalenzverzögerung	min	0
KWK-Hysterese	K	3	WWSP	l	300
KWK-Mindestlaufzeit	min	-	PS	l	1.000
Externer Lastgang	h	-	Zeitschritt	s	15