

# Anwendungspotenziale innovativer Gasanwendungstechnologien Kraft-Wärme-Kopplung/Brennstoffzellen im System Gebäude/Anlagentechnik

## Management Summary

**G 8/01/10**

**G 8/02/10**

**gefördert durch:** DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.  
Technisch-wissenschaftlicher Verein

**ausgeführt durch:** Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.  
DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg  
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe

## **Hintergrund und Zielsetzung**

Mikro-KWK-Anlagen zur Bereitstellung von Strom und Wärme sind zunehmend am Markt verfügbar und gelten als hocheffiziente Alternative zu konventionellen Heizungsanlagen insbesondere im Wohnungsbau. Mikro-KWK-Systeme können zur Erfüllung der Forderung aus dem integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms der Bundesregierung, den Anteil von KWK-Strom an der Gesamtstromerzeugung bis zum Jahr 2020 auf 20 % zu erhöhen, beitragen. Mit der erreichten und zunehmenden Marktreife ist die Information der Nutzer, Anlagenbetreiber und Installateure zu dieser komplexen Technologie unerlässlich.

Ziel dieses Projektes ist die Zusammenführung und Weiterentwicklung der Kriterien für eine optimale Bewertung, Dimensionierung und Anwendung der Technologie in Abhängigkeit der Randbedingungen durch die Anlagen- und Gebäudetechnik. Als Projektrahmen gelten Wohngebäude sowohl im Bestand als auch im Neubau.

## **Vorgehensweise**

Neben einem Marktscreening von bereits etablierten und in der Entwicklung befindlichen Mikro-KWK-Technologien werden Eignungsvergleiche auf Basis theoretischer und experimenteller Untersuchungen durchgeführt in denen unter anderem Abwärmepotenziale, mögliche Kombinationen mit Wärmepumpen und der synergetische Einsatz mit Dämmmaßnahmen betrachtet werden. Zum Nachweis von Herstellerangaben werden experimentelle Versuche durchgeführt und durch dynamische Messungen von Gesamtsystemen sowie Langzeituntersuchungen ergänzt. Der Aufbau von Demonstrations-Zentren an den Institutsstandorten für Infoveranstaltungen und Schulungen soll die komplexe Technik begreifbarer machen.

## **Recherche zum Geräteportfolio**

Die durchgeführte Marktrecherche beinhaltet Systeme mit Stirling- oder Ottomotor sowie Anlagen auf Basis eines Dampf-Expansionsprozesses. Neben den Festoxid- und Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen, die sich im Übergang zur Markteinführung befinden, werden als neue Mikro-KWK-Technologien der Wankelmotor, der Stirling-Vuilleumier- und der Organic-Rankine-Cycle-Prozess betrachtet. Ferner werden das Energieliefer-, Einspar- und Finanzierungs-Contracting sowie das Technische Anlagenmanagement als mögliche Betreibermodelle beschrieben.

## **Simulationen zum Technologieeinsatz**

Bei der theoretischen Betrachtung von Neu- und Bestandsbauten werden Kombispeicher mit KWK-Systemen und Zusatzheizgeräten auf Basis der VDI 4655 simuliert. Es kann gezeigt werden, dass alle am Markt verfügbaren KWK-Systeme bei Auslegung auf den jeweiligen Gebäudewärmebedarf energetisch effizient eingesetzt werden können. Aus dem weiterführende Vergleich von Mikro-KWK-Systemen mit einem Brennwertsystem, einer Elektro- oder Gaswärmepumpe als Zusatzheizgerät wird abgeleitet, dass Kombinationen von hocheffizienten Technologien unter ökologischen Aspekten sinnvoll sind. Die Untersuchungen zur Substitution der elektrischen Warmwasserbereitung in Wasch- und Spülmaschinen identifizieren eine geringe Steigerung der Laufzeit des KWK-Systems.

## **Dämmung und Technologieeinsatz**

Ein weiterer Untersuchungsansatz befasst sich mit der synergetischen Kombination von Dämmung und KWK-Systemen. Hierzu wird eine allgemeine Wärmeverlustverteilung für ein repräsentatives Gebäude ermittelt. Für die darauf aufbauende wirtschaftliche Betrachtung wird eine normierte

Richtpreisfunktion für Mikro-KWK-Systeme beruhend auf den Ergebnissen einer durchgeführten Herstellerbefragung entwickelt und genutzt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt auf, dass beide Maßnahmen mit hohen Fixkosten belastet sind, sodass eine Kombination in den meisten Fällen als nicht sinnvoll erachtet wird. Das primärenergetische und ökologische Optimum kann jedoch bei der kombinierten Umsetzung erreicht werden. In Bezug auf den Einsatz von Mikro-KWK-Systemen wird herausgestellt, dass hohe Stromkennzahlen mit einer vergleichsweise hohen Effizienz und Laufzeit korrelieren. Durch die Analyse konnte weiterhin hergeleitet werden, dass die Maximierung der Stromeigennutzung zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führt. Folglich stellen daher zwei Parameter, die KWK-Laufzeit und der Stromeigennutzungsanteil die zentralen Einflussgrößen für die optimale Dimensionierung von KWK-Systemen aus wirtschaftlicher Sicht dar.

### **Experimentelle Untersuchungen**

Bei den experimentellen Versuchen und Messungen im Labor werden unterschiedliche Mikro-KWK-Systeme untersucht. Die eingesetzten Mikro-KWK-Geräte lassen sich in der Regel einfach installieren und in Betrieb nehmen. Neben den statischen Wirkungsgradmessungen nach EN 50465 werden dynamische Nutzungsgradmessungen nach DIN 4709 vorgenommen. Die ermittelten Ergebnisse spiegeln im Wesentlichen die Herstellerangaben wider und zeigen, dass es sich bei den untersuchten Mikro-KWK-Systemen um hocheffiziente Systeme nach den BAFA-Kriterien handelt, die zudem sehr gute Emissionswerte erzielen. Zusätzlich wird der Jahresnutzungsgrad und das Betriebsverhalten in Langzeitmessung untersucht. Beispielsweise wird die Hochtemperatur-Feststoff-Brennstoffzelle BlueGen seit 25 Monaten störungsfrei betrieben und zeigt eine mittlere Degradation von weniger als 0,5 % pro 1.000 Betriebsstunden auf.

### **Demonstrationszentren**

Die Ausweitung der Öffentlichkeitsarbeit ist durch die projektbezogene Errichtung von Demonstrationszentren an den beteiligten Instituten vorangetrieben worden. Eine Sensibilisierung von Nutzern, Anlagenbetreibern und Installateuren mit der komplexen Technologie wird durch praxisnahe Schulungen und Weiterbildungsmaßnahmen vorgenommen.

### **Handlungsempfehlungen und weiterer F&E-Bedarf**

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Dimensionierungsgrundlagen und zur Optimierung des Anlagenbetriebs auf und weisen auf weiteren Forschungsbedarf hin. Die aufgezeigten Ergebnisse sind für DVGW-Mitgliedsunternehmen wie z. B. Hersteller von Mikro-KWK-Systemen von großem Interesse.

# Anwendungspotenziale innovativer Gasanwendungstechnologien Kraft-Wärme-Kopplung/Brennstoffzellen im System Gebäude/Anlagentechnik

Abschlussbericht

G 8/01/10

G 8/02/10

**gefördert durch:** DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.  
Technisch-wissenschaftlicher Verein

**ausgeführt durch:** Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.  
DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg  
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe



Die DVGW-Innovationsoffensive.  
[www.dvgw-innovation.de](http://www.dvgw-innovation.de)



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Motivation und Zielstellung .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Eignungsvergleich und Nutzungskonzepte .....</b>	<b>14</b>
2.1	Technologiebeschreibung .....	14
2.1.1	Stirlingmotor .....	14
2.1.2	Ottomotor .....	16
2.1.3	Dampfexpansion .....	17
2.1.4	Brennstoffzellen.....	18
2.1.5	Zusammenfassende Darstellung der Technologien .....	21
2.2	Neue Technologien .....	23
2.2.1	Stirling-Vuilleumier .....	23
2.2.2	Wankelmotor .....	27
2.2.3	Organischer Rankine Kreisprozess .....	29
2.3	Contracting-Varianten .....	32
2.3.1	Energieliefer-Contracting.....	32
2.3.2	Einspar-Contracting.....	33
2.3.3	Finanzierungs-Contracting .....	34
2.3.4	Technisches Anlagenmanagement .....	34
2.3.5	Kombination .....	34
2.4	Simulationsgestützte Eignungsvergleiche .....	35
2.4.1	Methodik.....	36
2.4.2	Simulations-Varianten .....	45
2.4.3	Ergebnisse der Simulation .....	47
2.4.4	Wesentliche Erkenntnisse .....	53
2.5	Kombination von KWK und GWP/EWP im Neubau.....	54
2.6	Abwärmenutzungskonzepte im Neubau .....	57
2.6.1	Waschmaschine .....	58
2.6.2	Spülmaschine.....	58
2.6.3	Einsatz im Neubau .....	59
2.6.4	Einfluss der Wohnungsbelegung.....	60
2.6.5	Fazit zur Substitution von Warmwasserbedarfen .....	61

---

<b>3</b>	<b>Korrelation von Dämmung und Mikro-KWK-Anlagen im Bestand .....</b>	<b>62</b>
3.1	Methodischer Ansatz .....	62
3.1.1	Betrachtungsweisen .....	63
3.1.2	Konstruktive und bauphysikalische Grundlagen .....	66
3.1.3	Einsatz von Technologie .....	73
3.1.4	Grundlagen der Kombination .....	75
3.1.5	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen .....	76
3.2	Ergebnisse der Potenzialanalyse .....	83
3.2.1	Wirtschaftliche Betrachtung .....	85
3.2.2	Primärenergetische und ökologische Betrachtung .....	89
3.2.3	Wirtschaftlich-ökologische Betrachtung .....	93
3.3	Sensitivitätsanalyse .....	99
3.3.1	Auswirkungen der Stromverteilung .....	100
3.3.2	Änderung der Wohnungsbelegung .....	103
3.3.3	Einfluss der Wohnfläche .....	104
3.3.4	Veränderung des Strombedarfs .....	105
3.3.5	Variation des Strom- und Gaspreises .....	106
3.3.6	Entwicklung des Strommix .....	112
3.3.7	Verminderung der Investitionskosten .....	113
3.4	Wesentliche Erkenntnisse .....	116
<b>4</b>	<b>Experimentelle und Praktische Untersuchungen .....</b>	<b>120</b>
4.1	Ergebnisse alter Messungen und Feldtestuntersuchungen .....	120
4.1.1	Feldtestuntersuchungen WhisperGen - GWI .....	120
4.1.2	Feldtestuntersuchung (EBI) .....	123
4.1.3	Feldtestuntersuchung (DBI) .....	124
4.1.3.1	Feldtest inhouse5000 .....	124
4.1.3.2	Feldtest <i>lion</i> <sup>®</sup> -Powerblock (OTAG) .....	127
4.1.3.3	Feldtest eVita HRe 28 (Remeha) .....	131
4.1.3.4	Prüfstandstest und Monitoring WhisperGen EU1 .....	136
4.1.3.5	Prüfstandstest EPS 4 (WÄTAS) .....	139
4.2	Aktueller Dauertest Bluegen SOFC-Brennstoffzelle am GWI .....	140
4.3	Messprogramme Laboruntersuchungen .....	143

---

4.3.1	Normnutzungsgradmessungen nach DIN 4709 .....	143
4.3.2	Wirkungsgradmessungen.....	146
4.3.3	Primärenergieeinsparung .....	147
4.3.4	Primärenergiefaktor.....	149
4.4	Prüfstände .....	150
4.4.1	Prüfstandsbeschreibung GWI .....	150
4.4.2	Prüfstandsbeschreibung EBI.....	154
4.4.3	Prüfstandsbeschreibung DBI.....	156
4.5	Messergebnisse GWI .....	157
4.5.1	Vaillant EcoPower 1.0 .....	165
4.5.2	Vaillant EcoPower 3.0 .....	173
4.5.3	DeDietrich/Remeha eVita 25s .....	178
4.5.4	Viessmann Vitowin 300-W .....	182
4.6	Messergebnisse EBI .....	187
4.6.1	Hexis Galileo 1000N.....	188
4.6.2	Vaillant ecoPOWER 3.0 .....	194
4.6.3	Senertec Dachs Stirling SE .....	199
4.6.4	Baxi Innotech Gamma 1.0.....	202
4.7	Messergebnisse DBI .....	207
4.7.1	Berechnungsmodell gemäß DIN 4709 .....	207
4.7.2	CFCL-BlueGen.....	217
4.7.3	WhisperGen EU1 .....	222
4.7.4	Kirsch microBHKW L 4.12.....	227
4.7.5	Remeha eVita 25s.....	229
4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	231
4.9	Democenter.....	232
4.9.1	Democenter GWI.....	232
4.9.2	Democenter EBI .....	238
4.9.3	Democenter DBI.....	241
<b>5</b>	<b>Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>247</b>
<b>6</b>	<b>Forschungsbedarf .....</b>	<b>248</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>249</b>

<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>251</b>
<b>A</b>	<b>Anlagen .....</b>	<b>259</b>

**Autoren:**

Dr. Rolf Albus, Markus Fischer, Michael Buller, Frank Burmeister, Frederic Frankenhoff,  
Tim Rademacher

Gas- und Wärme-Institut e.V. Essen

Anke Kaltenmaier, Dr. Holger Dörr

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie

Dr. Hartmut Krause, Frank Erler

DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

Essen, 30. Mai 2012

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Darstellung der Funktionsweise eines Stirlingmotors [E.ON]..	15
<b>Abbildung 2:</b>	Darstellung der Funktionsweise des Otto-Motors [E.ON].....	16
<b>Abbildung 3:</b>	Darstellung der Funktionsweise des Dampf-Motors - geänderte Darstellung, in Anlehnung an [E.ON] .....	17
<b>Abbildung 4:</b>	Funktionsaufbau einer PEM-Brennstoffzelle, Quelle: BP .....	19
<b>Abbildung 5:</b>	vereinfachte Darstellung von verschiedenen Brennstoffzellen Technologien .....	20
<b>Abbildung 6:</b>	benötigte Wärmesenken in Abhängigkeit der Technologie, normierte Darstellung.....	21
<b>Abbildung 7:</b>	$\gamma$ -Stirling-, $\gamma$ -Vuilleumier- und Hybrid-Prozess nach [TUD10]..	23
<b>Abbildung 8:</b>	Betriebsart: primäre Strombereitstellung [TUD10] .....	26
<b>Abbildung 9:</b>	Betriebsart: geringer Strombedarf[TUD10] .....	26
<b>Abbildung 10:</b>	Betriebsart: hoher Strombedarf [TUD10] .....	27
<b>Abbildung 11:</b>	Funktionsweise: Rotationskolben-(Wankel)-Motor.....	28
<b>Abbildung 12:</b>	Funktionsweise: Organic-Rankine-Cycle, [GMK11] .....	29
<b>Abbildung 13:</b>	Funktionsweise: Schraubenexpander, [UoQ11].....	30
<b>Abbildung 14:</b>	relative Verteilung der Contracting-Varianten 2007, [VfW11]..	32
<b>Abbildung 15:</b>	Schematische Darstellung zum Simulationsmodell .....	36
<b>Abbildung 16:</b>	Prinzipielle Darstellung der Einbindung eines Kombispeichers in die Simulation .....	41
<b>Abbildung 17:</b>	Schematische Darstellung der Regelcharakteristik innerhalb der Simulation .....	43
<b>Abbildung 18:</b>	Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“ .....	47
<b>Abbildung 19:</b>	Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen des Zusatzheizgerätes im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“ .....	48

<b>Abbildung 20:</b>	Elektrischer- und Gesamtnutzungsgrad der Systeme in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“ .....	49
<b>Abbildung 21:</b>	Elektrischer Jahresdeckungsgrad und jährlich erzeugter elektrischer Strom der Systeme in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“ .....	50
<b>Abbildung 22:</b>	Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Neu“ .....	51
<b>Abbildung 23:</b>	Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Alt“ .....	52
<b>Abbildung 24:</b>	Kombination von KWK und EWP/GWP .....	55
<b>Abbildung 25:</b>	Beispielhafte schematische Darstellung zur Substitution von Stromanwendungen durch Abwärmenutzung .....	57
<b>Abbildung 26:</b>	Auswirkungen der Wohnungsbelegung auf den Warmwasserbedarf .....	60
<b>Abbildung 27:</b>	Bilanzielle Darstellung des allgemeinen Referenzobjekts .....	69
<b>Abbildung 28:</b>	Wärmeverlustverteilung über dämmbare Bauteile im Wohngebäudebestand .....	71
<b>Abbildung 29:</b>	Energieflussbild der thermischen Bedarfs- / Verlustverteilung	72
<b>Abbildung 30:</b>	Darstellung einer möglichen Jahresdauerlinie für ein Wohngebäude .....	73
<b>Abbildung 31:</b>	Energieflussbild bei anteiliger Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung .....	74
<b>Abbildung 32:</b>	Ganzheitliches Energieflussbild für eine kombinierte Umsetzung .....	75
<b>Abbildung 33:</b>	Normierte Brutto-Richtpreisfunktion für KWK-Aggregate bis 8 kW <sub>el</sub> .....	79
<b>Abbildung 34:</b>	Exemplarische Darstellung eines Ergebnisdiagramms .....	84
<b>Abbildung 35:</b>	Theoretische Verläufe von Kombinationen - jährliche Mehrkosten .....	85

<b>Abbildung 36:</b>	Theoretische Verläufe von Kombinationen - Primärenergie-Einsparung.....	89
<b>Abbildung 37:</b>	Theoretische Verläufe von Kombinationen - CO <sub>2</sub> -Einsparung	90
<b>Abbildung 38:</b>	Theoretische Verläufe von Kombinationen - CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	93
<b>Abbildung 39:</b>	Draufsicht des theoretischen Verlaufs - CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	96
<b>Abbildung 40:</b>	Qualitative wirtschaftlich-ökologische Effizienz.....	98
<b>Abbildung 41:</b>	Wert des KWK-Stroms in Abhängigkeit des Eigennutzungsanteils .....	100
<b>Abbildung 42:</b>	Wirtschaftlich-ökologischer Einfluss des Stromeigennutzungsanteils .....	101
<b>Abbildung 43:</b>	Draufsicht auf den Einfluss des Stromeigennutzungsanteils	102
<b>Abbildung 44:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss - Personenzahl.....	103
<b>Abbildung 45:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss der Wohnfläche.....	104
<b>Abbildung 46:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss des Strombedarfs.....	105
<b>Abbildung 47:</b>	Zeitliche Entwicklung der Strompreise .....	106
<b>Abbildung 48:</b>	Zeitliche Entwicklung der Gaspreise .....	107
<b>Abbildung 49:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss der Energiepreisentwicklung .....	108
<b>Abbildung 50:</b>	Wirtschaftlich-ökologischer Einfluss - Energiepreisentwicklung.. .....	110
<b>Abbildung 51:</b>	Draufsicht auf den Einfluss von Energiepreisänderungen ....	111
<b>Abbildung 52:</b>	Entwicklung der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Strommix.....	112
<b>Abbildung 53:</b>	Ökologischer Einfluss - CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	112
<b>Abbildung 54:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss - Kostenreduktion bei 50 % Stromeigennutzung .....	114
<b>Abbildung 55:</b>	Wirtschaftlicher Einfluss - Kostenreduktion bei 100 % Stromeigennutzung .....	115
<b>Abbildung 56:</b>	Schema des Anschlusses im Gebäude .....	121

<b>Abbildung 57:</b>	Energieverteilung und Verluste bei konventioneller Gasheizung und Mikro-KWK WhisperGen.....	122
<b>Abbildung 58:</b>	Projektstruktur des Feldtestprojektes.....	125
<b>Abbildung 59:</b>	Erzeugte Energiemengen am Beispiel der Feldtestanlage 1	126
<b>Abbildung 60:</b>	Messstellenplan eines Standortes .....	127
<b>Abbildung 61:</b>	Mittlere Nutzungsgrade im Berichtszeitraum und im Monat März 2008.....	128
<b>Abbildung 62:</b>	Kenngößen des <i>lion</i> <sup>®</sup> -Powerblock bei unterschiedlichen Rücklauf- temperaturen.....	130
<b>Abbildung 63:</b>	Messstellenplan für die äußere Bilanzierung des HRe 28s- Gerätes .....	132
<b>Abbildung 64:</b>	Mittlere monatliche Nutzungsgrade (HRe 28s) .....	133
<b>Abbildung 65:</b>	Mittlere monatliche Nutzungsgrade (HRe 28c) .....	133
<b>Abbildung 66:</b>	Gerätstandort am DBI Freiberg.....	136
<b>Abbildung 67:</b>	Nutzungsgrade während einer stationären Betriebsphase ...	137
<b>Abbildung 68:</b>	Kenngößen der EPS 4 bei 2 unterschiedlichen Rücklauf- temperaturen .....	139
<b>Abbildung 69:</b>	Brennstoffzelleninstallation im GWI-Versuchshaus .....	140
<b>Abbildung 70:</b>	Brennstoffzellenbetrieb im GWI-Versuchshaus .....	141
<b>Abbildung 71:</b>	Prüfprofil nach DIN 4709.....	145
<b>Abbildung 72:</b>	Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Prüf- standes .....	151
<b>Abbildung 73:</b>	GWI-Prüfstand .....	152
<b>Abbildung 74:</b>	Vereinfachtes Schema des Geräteprüfstands am EBI.....	154
<b>Abbildung 75:</b>	Schematische Darstellung des Wirkungsgradprüfstandes....	156
<b>Abbildung 76:</b>	Während der Prüfung gemessener Volumenstrom im Vergleich zum vorgegebenen Prüfprofil nach DIN 4709 (Beispielmessung) .....	159
<b>Abbildung 77:</b>	Während der Prüfung gemessenen Vor- und Rücklauf- temperaturen (Beispielmessung) .....	160

<b>Abbildung 78:</b>	Während der Prüfung ermittelte Gesamtleistung des Systems (Beispielmessung) .....	161
<b>Abbildung 79:</b>	Während der Prüfung ermittelte kumulierte Wärmemenge im Vergleich zum vorgegebenen Prüfprofil nach DIN 4709 .....	162
<b>Abbildung 80:</b>	Nachweis der gleichen Energiemengen im Speicher zu Beginn und zum Ende der Messung (Beispielmessung).....	163
<b>Abbildung 81:</b>	Während der Prüfung gemessene elektrische Leistung (Beispielmessung) .....	164
<b>Abbildung 82:</b>	Während der Prüfung gemessene Wärmebelastung des Gesamtsystems (Beispielmessung).....	165
<b>Abbildung 83:</b>	Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „ecoPower 1.0“.	168
<b>Abbildung 84:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 300 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW .....	170
<b>Abbildung 85:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 300 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW .....	170
<b>Abbildung 86:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW .....	172
<b>Abbildung 87:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 16,5 kW .....	173
<b>Abbildung 88:</b>	Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „ecoPower 3.0“.	174
<b>Abbildung 89:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 3.0 mit 750 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8 kW; Beendigung der Messung nach 24 h.....	177
<b>Abbildung 90:</b>	Gemessene Wärmebelastung EcoPower 3.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8 kW; Beendigung der Messung bei gleichen Speicherinhalt.....	177
<b>Abbildung 91:</b>	Kennfeldermittlung DeDietrich/Remeha 25s .....	179
<b>Abbildung 92:</b>	Gemessene Wärmebelastung eVita 25s mit 230 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 18,3 kW .....	181
<b>Abbildung 93:</b>	Gemessene Wärmebelastung eVita 25s mit 230 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 25,5 kW .....	182
<b>Abbildung 94:</b>	Kennfeldermittlung Viessmann Vitotwin 300-W .....	184

<b>Abbildung 95:</b>	Gemessene Wärmebelastung Vitotwin 300-W mit 400 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 19 kW .....	186
<b>Abbildung 96:</b>	Gemessene Wärmebelastung Vitotwin 300-W mit 700 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 19 kW .....	186
<b>Abbildung 97:</b>	KWK-Anteil der Nennwärmebelastung .....	188
<b>Abbildung 98:</b>	Skizze des Geräteanschlusses am Beispiel von Galileo 1000N von Hexis .....	189
<b>Abbildung 99:</b>	Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „Galileo 1000N“	191
<b>Abbildung 100:</b>	Belastungsmessung des BZH Galileo 1000N während des 24-Stundenprofils der Normnutzungsgradmessung nach 4709 .	193
<b>Abbildung 101:</b>	Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465 .....	197
<b>Abbildung 102:</b>	Verlauf der Belastung beim ecoPOWER 3.0 während des Lastprofils in Anlehnung an DIN 4709.....	198
<b>Abbildung 103:</b>	Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465 .....	200
<b>Abbildung 104:</b>	Verlauf der Belastung während des Lastprofils nach der DIN 4709 .....	201
<b>Abbildung 105:</b>	Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465.....	205
<b>Abbildung 106:</b>	Verlauf der thermischen Leistung während des Lastprofils in Anlehnung nach DIN 4709.....	206
<b>Abbildung 107:</b>	Verlauf der Belastung während des Lastprofils in Anlehnung an DIN 4709.....	206
<b>Abbildung 108:</b>	Überblick der einzufügenden Daten in das Berechnungsmodell. ....	208
<b>Abbildung 109:</b>	Eindimensionales Finite-Volumen-Methode nach Upwind-Schema.....	209
<b>Abbildung 110:</b>	Schnittansicht Kombispeicher.....	211
<b>Abbildung 111:</b>	Vergleich Simulation (durchgezogene Linien) und Messung des WhisperGen (gestrichelte Linien).....	215
<b>Abbildung 112:</b>	Temperaturprofil bei Beladung des Speichers nach unterschiedlichen Zeitschritten .....	215
<b>Abbildung 113:</b>	Aufladen des Pufferspeichers mit einer Initialisierungstemperatur von 55°C.....	217

<b>Abbildung 114:</b>	Versuchsprogramm der Labormessungen am BlueGen.....	218
<b>Abbildung 115:</b>	Wirkungsgrade BlueGen.....	219
<b>Abbildung 116:</b>	Ergebnisse der Kennfeldermittlung (leistungsbezogen).....	220
<b>Abbildung 117:</b>	Verlauf der Kenngrößen im bisherigen Betriebszeitraum.....	221
<b>Abbildung 118:</b>	Wirkungsgrade WhisperGen EU1 in Abhängigkeit von der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems.....	224
<b>Abbildung 119:</b>	Verlauf der Wärmebelastung beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709) .....	226
<b>Abbildung 120:</b>	Heizwasservolumenstrom beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709).....	226
<b>Abbildung 121:</b>	Verlauf der aus dem Wärmespeicher entnommenen thermischen Leistung beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709) .....	227
<b>Abbildung 122:</b>	Wirkungsgrade KIRSCH microBHKW L 4.12 (Feldtestgerät) in Abhängigkeit der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems .....	229
<b>Abbildung 123:</b>	Wirkungsgrade Remeha eVita 25s in Abhängigkeit der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems.....	230
<b>Abbildung 124:</b>	Mobiler, autarker Versuchsstand für statische und dynamische Messungen (Hydraulik, Regelung und Datenvisualisierung).	232
<b>Abbildung 125:</b>	Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.....	233
<b>Abbildung 126:</b>	Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler.....	234
<b>Abbildung 127:</b>	Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren.....	235
<b>Abbildung 128:</b>	Solarthermiemodule für die Brennwert plus Solar- und Gaswärmepumpenanlage.....	235
<b>Abbildung 129:</b>	Aufstellungssituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe.....	236

<b>Abbildung 130:</b>	KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts) .....	237
<b>Abbildung 131:</b>	Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen .....	238
<b>Abbildung 132:</b>	Grundriss und Aufstellungsplan des Democenters.....	239
<b>Abbildung 133:</b>	Räumlicher Überblick des Demonstrationszentrums .....	241
<b>Abbildung 134:</b>	R&I-Fließschema des hydraulischen Systems.....	242
<b>Abbildung 135:</b>	Installationswand mit Sichtöffnung und Schaltkasten .....	244
<b>Abbildung 136:</b>	Datalogger mit gerätespezifischem Benutzerbildschirm .....	244
<b>Abbildung 137:</b>	Dauertest von Mikro-KWK-Geräten im Demonstrationszentrum am DBI .....	245
<b>Abbildung 138:</b>	Ansicht des Demonstrationszentrums mit dem Schulungsraum . .....	246

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Zusammenfassung der wesentlichen Merkmale der Technologien .....	22
<b>Tabelle 2:</b>	Typtagkategorien gemäß [VDI4655] .....	38
<b>Tabelle 3:</b>	Anzahl der Typtage je Typtagkategorie für Klimazone 13 [VDI4655] .....	39
<b>Tabelle 4:</b>	In der Simulation analysierte KWK-Einheiten.....	39
<b>Tabelle 5:</b>	In der Simulation verwendete Regelungsparameter .....	44
<b>Tabelle 6:</b>	Gebäudedaten .....	46
<b>Tabelle 7:</b>	Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger.....	63
<b>Tabelle 8:</b>	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen für verschiedene Energieträger ....	64
<b>Tabelle 9:</b>	Temperaturkorrekturfaktoren für verschiedene Bauteile .....	70
<b>Tabelle 10:</b>	Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen . .....	70
<b>Tabelle 11:</b>	Aufgegliederte Brutto-Investitionskosten für verschiedene Bauteile .....	77
<b>Tabelle 12:</b>	Angenommene Mehrkosten für spezifische KWK-System- komponenten .....	79
<b>Tabelle 13:</b>	Baseload-Quartalspreise für das Bezugsjahr 2010 .....	82
<b>Tabelle 14:</b>	Bisherige Ergebnisse des Feldtests.....	126
<b>Tabelle 15:</b>	Ausgewählte Kenngrößen in langen stationären Betriebszuständen .....	129
<b>Tabelle 16:</b>	Erreichte Kennziffern im Berichtszeitraum (eVita HRe 28s).....	134
<b>Tabelle 17:</b>	Erreichte Kennziffern im Berichtszeitraum (eVita HRe 28c).....	134
<b>Tabelle 18:</b>	Energie- und Betriebskennziffern in ausgewählten Betriebs- zuständen .....	138
<b>Tabelle 19:</b>	Messprogramm Wirkungsgradmessungen.....	147
<b>Tabelle 20:</b>	Messunsicherheiten der Messwerte am EBI .....	155
<b>Tabelle 21:</b>	Abzufahrendes Prüfprofil nach DIN 4709 (Beispielmessung) ...	158
<b>Tabelle 22:</b>	Kennfeldermittlung EcoPower 1.0.....	167

<b>Tabelle 23:</b>	Normnutzungsgradermittlung System EcoPower 1.0 mit 300 l Kombispeicher .....	168
<b>Tabelle 24:</b>	Normnutzungsgradermittlung System EcoPower 1.0 mit 500 l Kombispeicher .....	171
<b>Tabelle 25:</b>	Kennfeldermittlung ecoPower 3.0 .....	174
<b>Tabelle 26:</b>	Normnutzungsgradermittlung System ecoPower 3.0 mit 750 l Kombispeicher .....	176
<b>Tabelle 27:</b>	Kennfeldermittlung eVita 25s .....	179
<b>Tabelle 28:</b>	Normnutzungsgradermittlung System eVita 25s mit 230 l Kombispeicher .....	180
<b>Tabelle 29:</b>	Kennfeldermittlung Viessmann Vitotwin 300-W .....	183
<b>Tabelle 30:</b>	Normnutzungsgradermittlung System Vitotwin 300-W mit 700 l Kombispeicher und 400 l Pufferspeicher.....	185
<b>Tabelle 31:</b>	Kennfeldermittlung Galileo 1000N .....	191
<b>Tabelle 32:</b>	Normnutzungsgradermittlung System Galileo 1000N mit 500 l Pufferspeicher .....	192
<b>Tabelle 33:</b>	Kennfeldermittlung Vaillant ecoPOWER 3.0 nach dem Pufferspeicher .....	195
<b>Tabelle 34:</b>	Normnutzungsgradermittlung des Vaillant ecoPOWER 3.0 mit 500 l Pufferspeicher .....	196
<b>Tabelle 35:</b>	Kennfeldermittlung Senertec Dachs Stirling SE nach dem Pufferspeicher .....	199
<b>Tabelle 36:</b>	Normnutzungsgradermittlung des Senertec Dachs Stirling SE .	201
<b>Tabelle 37:</b>	Kennfeldermittlung Baxi Innotech Gamma 1.0 nach dem Pufferspeicher .....	203
<b>Tabelle 38:</b>	Normnutzungsgradermittlung der Baxi Innotech Gamma 1.0 mit 700 l Kombi-speicher .....	204
<b>Tabelle 39:</b>	Koeffizienten der Differentialgleichung.....	212
<b>Tabelle 40:</b>	Konvektions- und Diffusionskoeffizienten.....	213
<b>Tabelle 41:</b>	Lastpunkte nach DIN 4709 für Mikro-KWK-Gerät .....	213
<b>Tabelle 42:</b>	Messwerte und Kennziffern bei verschiedenen Lastpunkten ....	219

<b>Tabelle 43:</b>	Aufgezeichnete Energiemengen im Betriebszeitraum (09.03. – 30.11.2011) .....	221
<b>Tabelle 44:</b>	Wirkungsgradermittlung WhisperGen EU1 .....	223
<b>Tabelle 45:</b>	Normnutzungsgradermittlung WhisperGen mit 800 l Kombispeicher .....	225
<b>Tabelle 46:</b>	Wirkungsgradermittlung KIRSCH microBHKW L 4.12 (Feldtestgerät) .....	228
<b>Tabelle 47:</b>	Wirkungsgradermittlung Remeha eVita 25s .....	230

# 1 Motivation und Zielstellung

Die zunehmende Klimaerwärmung und deren dramatische Auswirkungen auf die Umwelt, die steigenden Rohstoffpreise sowie die Folgen der nuklearen Katastrophen von Tschernobyl in der Ukraine im Jahr 1986 und von Fukushima in Japan im Jahr 2011, dienen als Wegbereiter der nachhaltigen und ressourcenschonenden Entwicklung der Energieversorgung und der Effizienzsteigerung von energetischen Prozessen. Diese Problem- und Fragestellungen nehmen einen immer größer werdenden Stellenwert in der nationalen sowie in der internationalen Politik ein. Die nachhaltige Entwicklung wurde bereits 1987 im Brundtland-Bericht [IIED87] der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung definiert.

Im Laufe der Zeit wurden internationale und nationale Zielsetzungen festgelegt. Das Kyoto-Protokoll als Erweiterung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen [UN97] stellt die verbindliche Grundlage zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen dar, die als hauptsächliche Ursache der Klimaerwärmung angesehen werden. Die verbindlich festgelegte Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2012 um 21 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 1990 ist bereits im Jahr 2007 erreicht worden.

Das „Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm“ [IEKP07] wurde im August 2007 verabschiedet. Die grundlegenden Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020 werden in den zugehörigen Beschlüssen zur konkreten Umsetzung der Ziele beschlossen. Als Beitrag zur globalen Emissionsminderung ist eine Verminderung der deutschen Treibhausgasemission um 40 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 1990 zentraler Bestandteil der Beschlüsse. Des Weiteren soll der Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix wiederum bis zum Jahr 2020 auf 30 Prozent gesteigert und ein Anteil erneuerbarer Energie an der Wärmeerzeugung von 14 Prozent erreicht werden.

Einen Teilbeitrag zur Umsetzung dieser ambitionierten Ziele kann durch den Einsatz von dezentralen Mikro-KWK-Systemen realisiert werden. Im ersten Teil dieser Studie werden daher die etablierten aber auch die neuen Technologien im Sektor der Mikro-KWK-Systeme dargestellt und deren Funktionsweisen beschrieben. Des Weiteren werden unterschiedliche Contracting-Varianten als mögliche Finanzierungs- und Betriebs-Varianten vorgestellt, die vor allem für die Umsetzung aus Sicht der Endnutzung und von möglichen Contractoren von Interesse sind. Im Rahmen einer ersten vereinfachten Simulation wird das Betriebsverhalten von unterschiedlichen Systemen vor dem Hintergrund einer sinnvollen Einbindung und Dimensionierung eines thermischen Pufferspeichers

analysiert und bewertet. Anschließend werden unterschiedliche Nutzungskonzepte vor dem Hintergrund der Optimierung des Betriebsverhaltens, sowohl von einzelnen Mikro-KWK-Systemen als auch von möglichen Gesamtsystemen inklusive möglicher Zusatzheizgeräte, vorgestellt und in Bezug auf eine der Zielstellungen, der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, durch eine überschlägige bilanzielle Simulation kritisch geprüft.

Bei der energetischen Modernisierung von Gebäuden fällt immer wieder die Frage, ob entweder eine Sanierung der Gebäudehülle sowohl durch den Einsatz von Dämmmaßnahmen als auch durch den Austausch von Fenstern oder die Einbindung einer modernen, hocheffizienten KWK-Technologie sinnvoller in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Ökologie wäre. Daher werden weiterhin die, auf theoretischen Simulationen beruhenden, ganzheitlichen Potenziale der Einzelmaßnahmen und deren korrelierenden Kombinationen möglichst allgemeingültig aufgezeigt. Hierbei werden sowohl die wirtschaftlichen als auch die ökologischen und primärenergetischen Auswirkungen untersucht und bewertet. Des Weiteren werden in der Sensitivitätsanalyse Simulationen für mögliche Zukunftsszenarien durch die Variation von Einflussparametern durchgeführt.

Neben den theoretisch hergeleiteten Ergebnissen und Erkenntnissen dieser Studie werden Erfahrungen vorhandener Feldtestuntersuchungen aufgeführt. Eine umfangreiche experimentelle Untersuchung verschiedener KWK-Anlagen hinsichtlich Wirkungsgrad, Normnutzungsgrad und Emissionen zeigt im weiteren Verlauf die generelle Tauglichkeit von Mikro-KWK-Anlagen und dient der Bestätigung von Herstellerangaben.

Das zentrale Ziel dieser Studie ist eine möglichst ganzheitliche Darstellung von verfügbaren und in der Entwicklung befindlichen Mikro-KWK-Systemen, sowohl vor dem Hintergrund der technischen Funktionsweise und des Anlagenbetriebsverhaltens, sowie in Bezug auf mögliche ökologische, als auch wirtschaftliche Einsatz- und Anwendungspotenziale in der deutschen Gebäudestruktur.

## 2 Eignungsvergleich und Nutzungskonzepte

Vor dem Hintergrund der stetig zunehmenden Vielfalt von Mikro-KWK-Anlagen am Markt, stellt sich insbesondere für Privatpersonen, Handwerksbetriebe, Energieberater und Energieversorger die Frage nach der geeigneten KWK-Anlage bzw. nach dem geeigneten KWK-System. Dabei ist es wichtig, die möglichen Systeme sowie die Einflussgrößen auf einen möglichst effizienten und wirtschaftlichen Betrieb zu kennen und diese bewerten zu können. Ziel des nachfolgenden Eignungsvergleichs für KWK-Anlagen und -Systeme ist es daher die Einflussgrößen wie bspw. das Pufferspeichervolumen oder den Jahresheizwärmebedarf bei unterschiedlichen KWK-Systemen darzustellen. Zur realitätsnahen Ermittlung aller benötigten Kenndaten wurde am GWI eine Jahressimulation mit Lastgängen für Strom, Wärme und Trinkwarmwasser für insgesamt 10 Typtage, basierend auf [VDI4655] erstellt. Neben der generellen Simulationsmethodik und den Simulationsergebnissen, werden zunächst die derzeit wichtigsten KWK-Technologien mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt. Die abschließenden zusammengefassten Erkenntnisse sollen einen Anhaltspunkt bei der Planung von Mikro-KWK-Anlagen für das EFH liefern, ersetzen jedoch keine detaillierte Fachplanung, in welcher die jeweiligen gebäude- und nutzerspezifischen Einflüsse mit berücksichtigt werden.

### 2.1 Technologiebeschreibung

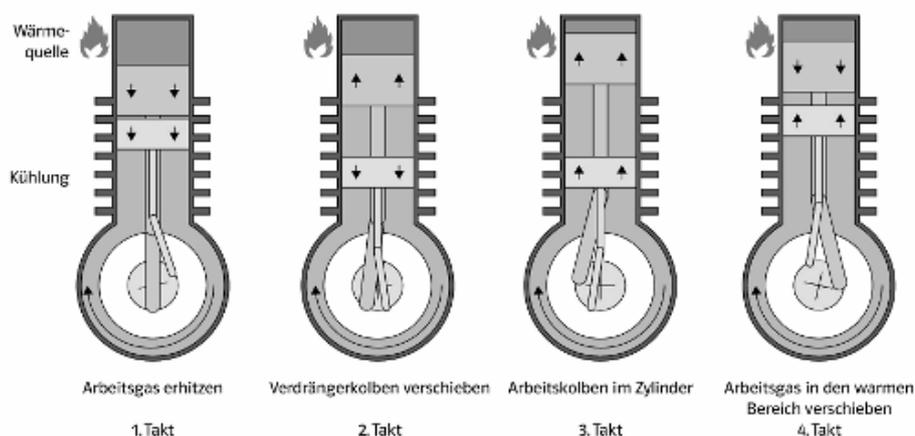
Die bereits erwähnte Vielfalt an derzeit am Markt erhältlichen Mikro-KWK-Anlagen lässt sich auf einige wenige grundsätzliche KWK-Technologien herunterbrechen. Neben den folgenden beschriebenen KWK-Technologien befinden sich noch eine Reihe weiterer KWK-Technologien in der Entwicklung. Einige dieser sind in Kapitel 2.2 dargestellt.

#### 2.1.1 Stirlingmotor

Im kleineren Leistungsbereich der Mikro-KWK-Anlagen ist der Stirlingmotor eine am Markt eingeführte und von vielen Herstellern angebotene Systemtechnologie.

Die Funktionsweise des Stirlingmotors lässt sich durch vier Takte beschreiben. Die Bewegung des Kolbens vom Stillstand in eine Richtung bis zum erneuten Stillstand wird als Takt bezeichnet. Der Motor besteht im Wesentlichen aus einem Arbeitskolben, der das innere Medium gegen die Umgebung abdichtet und einem,

um eine viertel Periode vorauseilenden Verdrängerkolben, der eine Durchlässigkeit für das eingeschlossene Medium besitzt und als ein Regenerator fungiert. Beim ersten Takt, der Expansionsphase, wird dem eingeschlossenen Medium, durch eine externe Wärmequelle Energie zugeführt, was eine Druckerhöhung und somit eine Bewegung des Arbeitskolbens zur Folge hat. Im anschließenden Takt strömt das Arbeitsmedium durch die Heraufbewegung des Verdrängerkolbens durch diesen und gibt dabei thermische Energie an ihn ab. Im dritten Takt bewegt sich der Arbeitskolben nach oben und komprimiert das Arbeitsmedium. Die bei der Kompression entstehende Wärme wird dem System über die äußere Kühlung der Prozesshülle entzogen. Beim letzten Takt bewegt sich der Verdrängerkolben wieder nach unten und verschiebt das Arbeitsmedium vom kalten in den warmen Bereich des Systems. In Folge der Durchleitung durch den Verdrängerkolben gibt dieser einen Teil seiner zuvor zugeführten Wärme an das Arbeitsgas ab.



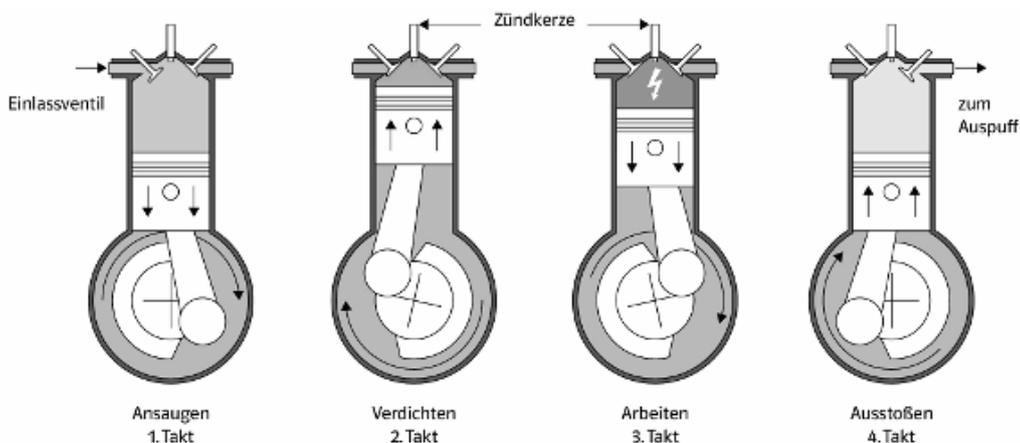
**Abbildung 1:** Darstellung der Funktionsweise eines Stirlingmotors [E.ON]

Die Vorteile dieser Systemtechnologie sind sowohl der nahezu verschleißfreie Betrieb und die damit korrelierenden niedrigen Wartungskosten sowie die niedrigen Emissionen des Systems, da die eigentliche Prozessenergie über eine externe Verbrennung zugeführt wird. Stirling-Systeme zeichnen sich weiterhin durch die gute Modulationsfähigkeit aus. Trotz eines vergleichsweise hohen Energieausnutzungsgrades von über 90 %, bei Brennwertnutzung z. T. sogar über 100% bezogen auf den Heizwert des Gases, liegt der größte Nachteil im relativ geringen elektrischen Wirkungsgrad im von rund 10 % bis 16 %.

## 2.1.2 Ottomotor

Der Ottomotor ist vor allen bei größeren thermischen Leistungen weit am Markt verbreitet und kann auf einen hohen Erfahrungsschatz aufbauen, da diese Systemtechnologie bereits seit über 100 Jahren vor allem in PKWs ihren Einsatz findet.

Die Funktionsweise des Ottomotors kann wiederum durch einen Vier-Takt-Prozess beschrieben werden. Im ersten der vier Takte des Motors wird ein Brennstoff-Luftgemisch durch das Einlassventil resultierend aus der herab Bewegung des Kolben in den Zylinder gesaugt. Im zweiten Takt wird das eingeleitete Gemisch durch die Kolbenbewegung verdichtet und im darauf folgenden Takt durch die Zündkerze gezündet. Durch die Freisetzung der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs, erhöht sich der Druck im Zylinder, was zu einer aktiven herab- Bewegung des Kolbens führt. Im letzten Takt stößt der wieder nach oben schnellende Kolben das Abgas durch das nun geöffnete Auslassventil aus und der Kreisprozess beginnt von vorne. Dieser Prozess wird als Otto-Kreisprozess oder auch Gleichraumprozess bezeichnet.



**Abbildung 2:** Darstellung der Funktionsweise des Otto-Motors [E.ON]

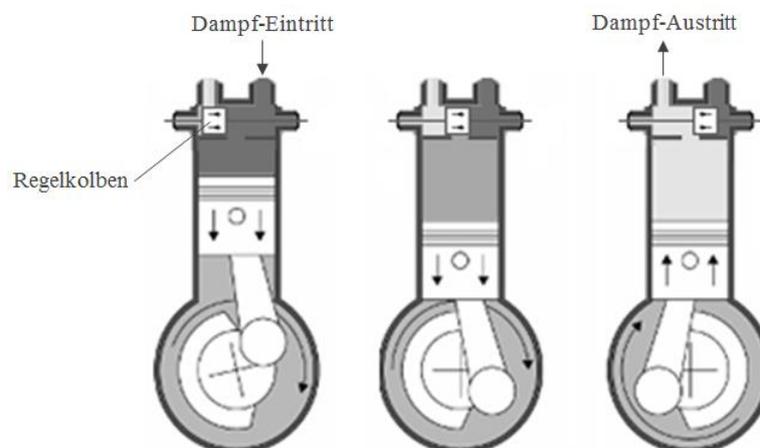
Die Entwicklung von Otto-Motoren in kleineren Leistungsbereichen ist in vollem Gange und es gibt bereits erste Maschinen, die in den Markt eingeführt werden. Im Vergleich zu anderen, am Markt verfügbaren Technologien, hebt sich der Otto-Motor durch den relativ hohen elektrischen Wirkungsgrad im Bereich von 15 % bis 27 % bei Mikro-KWK-Anlagen ab. Die Stromkennzahlen sind bezogen auf die anderen Technologien recht hoch und bewegen sich in den Bereichen von 0,2 bis 0,5. Die wesentlichen Nachteile sind die hohen Wartungskosten, resultierend aus

regemäßig notwendigen Ölwechseln und die vergleichsweise hohen Emissionen durch die interne Verbrennung des Brennstoffs im Motor.

### 2.1.3 Dampfexpansion

KWK-Systeme mit einem Dampf-Motor sind am Markt verfügbar, nehmen dort jedoch nur einen geringen Marktanteil ein. Die Forschung und Weiterentwicklung dieser Technologie wird nur vereinzelt betrieben.

Der Dampf-Prozess ist, in Analogie zum Stirling-Prozess, ein geschlossener Kreisprozess, dessen Arbeitsmedium durch Zuführung von Wärme einer externen Quelle verdampft und überhitzt wird. Durch diese Zustandsänderung erhöht sich der Druck des Arbeitsmediums, welches, durch die Öffnung des Einlasses durch den Regelkolben, in den Zylinder einströmt. Innerhalb des Zylinders entspannt sich der Dampf und wandelt dessen innere Energie in Bewegungsenergie des Kolbens um. Sobald der Kolben die Endposition erreicht, wird der verbleibende Dampfdruck über eine, sich durch den Regelkolben öffnende, Auslassöffnung abgeleitet. Bei der Verflüssigung des abgeleiteten Nassdampfs im Kondensator kann dem System die latent freigesetzte Wärme entzogen werden.



**Abbildung 3:** Darstellung der Funktionsweise des Dampf-Motors - geänderte Darstellung, in Anlehnung an [E.ON]

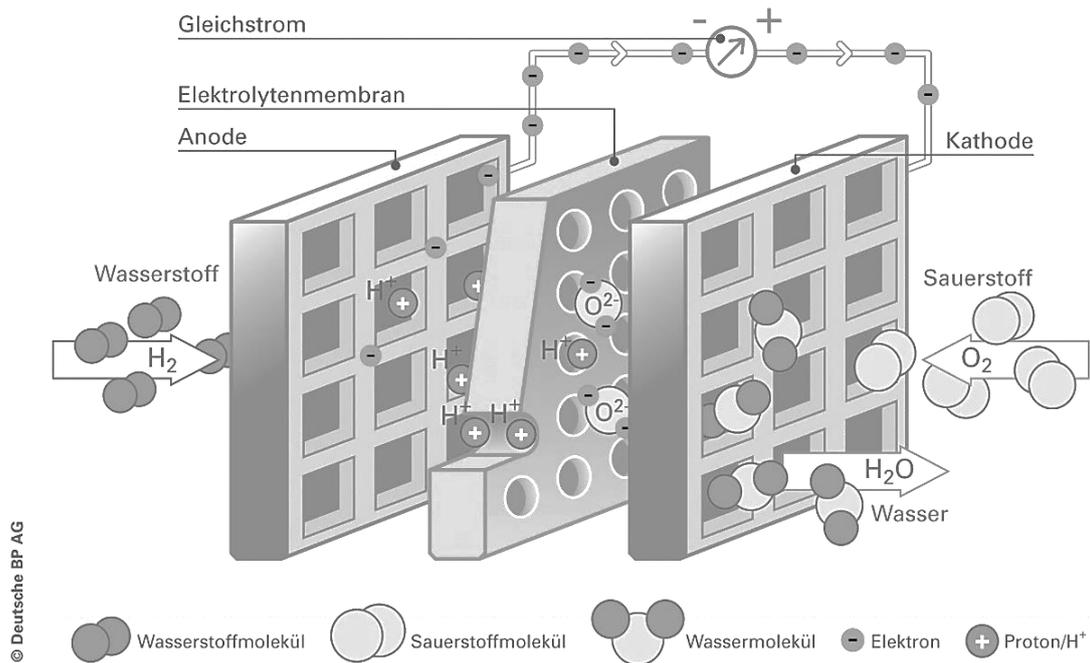
Die am Markt verfügbare Variante des Dampf-Motors basiert auf einer doppelten, invertierten Anordnung des obigen Systems und der Nutzung der resultierenden, longitudinalen Bewegung über einen Lineargenerator. Die Vorteile des Dampf-Motors sind vielfältig und liegen vor allem in der guten Modulationsfähigkeit des Systems. Es handelt sich weiterhin, ähnlich wie beim Stirlingmotor, um eine externe Zuführung der Prozessenergie, daher zeichnet sich dieser Anlagentyp

durch niedrige Emissionswerte aus. Da es beim Lineargenerator nur wenige Bauteile gibt, die sowohl stark beansprucht werden als auch beweglich sind, ist der Wartungsaufwand als vergleichsweise niedrig anzusehen. Der größte Nachteil befindet sich – analog zum Stirlingmotor – in der relativ niedrigen Stromkennzahl der Systemtechnologie. Ein zu erreichender Jahresnutzungsgrad von über 90 % korreliert mit einem elektrischen Wirkungsgrad von lediglich rund 10 %.

#### **2.1.4 Brennstoffzellen**

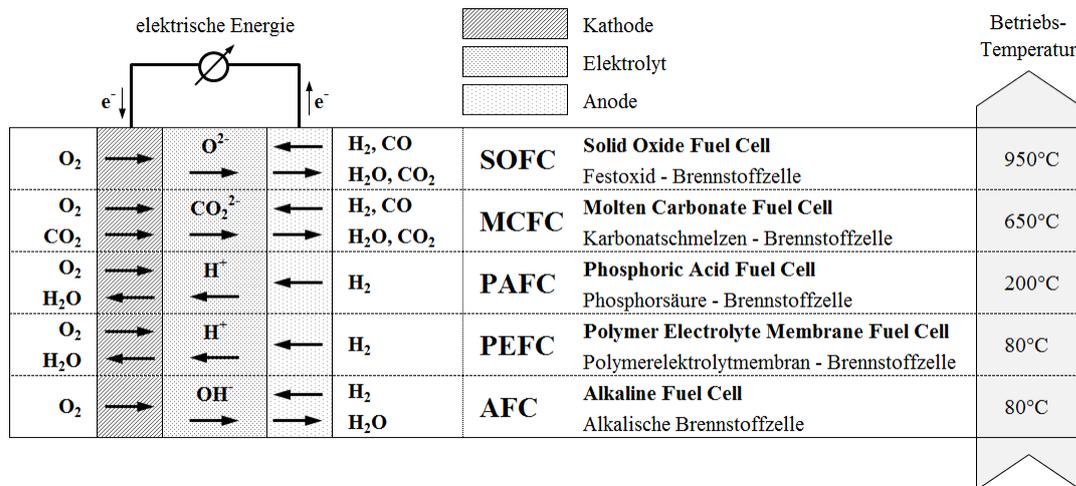
Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Technologien ist die Brennstoffzelle noch nicht am Markt verfügbar. Die Brennstoffzellentechnologie für den häuslichen Gebrauch im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung befindet sich noch im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Beim Funktionsprinzip der Brennstoffzelle handelt es sich im Gegensatz zu den bereits erläuterten Prozessen um eine elektro-chemische Reaktion. Eine Membran, die für eine, in Abhängigkeit der Brennstoffzellentechnologie bestimmte Art von Atomen oder Molekülen durchlässig ist, trennt die zu reagierenden Prozessgase voneinander. Durch die somit entstehende Potenzialdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran kann ein elektrischer Fluss über die Verbindung der Anode mit der Kathode ermöglicht werden. Zur besseren Veranschaulichung zeigt die folgende Abbildung den Funktionsaufbau einer Polymermembran Brennstoffzelle. Die Elektrolytmembran ist bei dieser Brennstoffzellentechnologie für positivgeladene Wasserstoffmolekül  $H^+$  durchlässig. Durch die Verbindung der Anode mit der Kathode können die, bei der Trennung von  $H_2$  entstandenen, Elektronen in Richtung der Kathode fließen um dort mit den getrennten Wasserstoffmolekülen  $O^{2-}$  zu Wasser  $H_2O$  zu reagieren.



**Abbildung 4:** Funktionsaufbau einer PEM-Brennstoffzelle, Quelle: BP

Es gibt verschiedene Arten von Brennstoffzellen, die sich im Wesentlichen durch die eingesetzte Elektrolytmembran, die damit korrelierende elektro-chemische Reaktion sowie die benötigte Betriebstemperatur unterscheiden. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die momentan relevantesten Brennstoffzellenarten, die Reaktionsverläufe und die zugehörigen Betriebstemperaturen.



**Abbildung 5:** vereinfachte Darstellung von verschiedenen Brennstoffzellen Technologien<sup>1</sup>

Beim Einsatz von Brennstoffzellen zur Kraft-Wärme-Kopplung spricht man im Wesentlichen von zwei verschiedenen Typen, zum einem die Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle (PEFC) und zum anderen die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC).

Die Stromkennzahl einer PEFC im Mikro-KWK-Bereich liegt bei rund 0,6 und ist im Vergleich zu den bereits dargestellten Technologien relativ hoch. Die thermische Belastung der verwendeten Materialien ist durch die Betriebstemperatur von 80 °C relativ gering und ermöglicht ein häufiges an- und abfahren der Brennstoffzelle. Beim Einsatz von Erdgas wird bei der PEMFC jedoch ein Reformer benötigt, der das Erdgas in ein Gemisch aus Wasserstoff  $H_2$  und Kohlendioxid  $CO_2$  spaltet. Die Menge an Kohlenmonoxid  $CO$  die zur Brennstoffzelle gelangt darf nur sehr gering sein, da Kohlenmonoxid das verwendete Platin, welches als Katalysator fungiert, angreift.

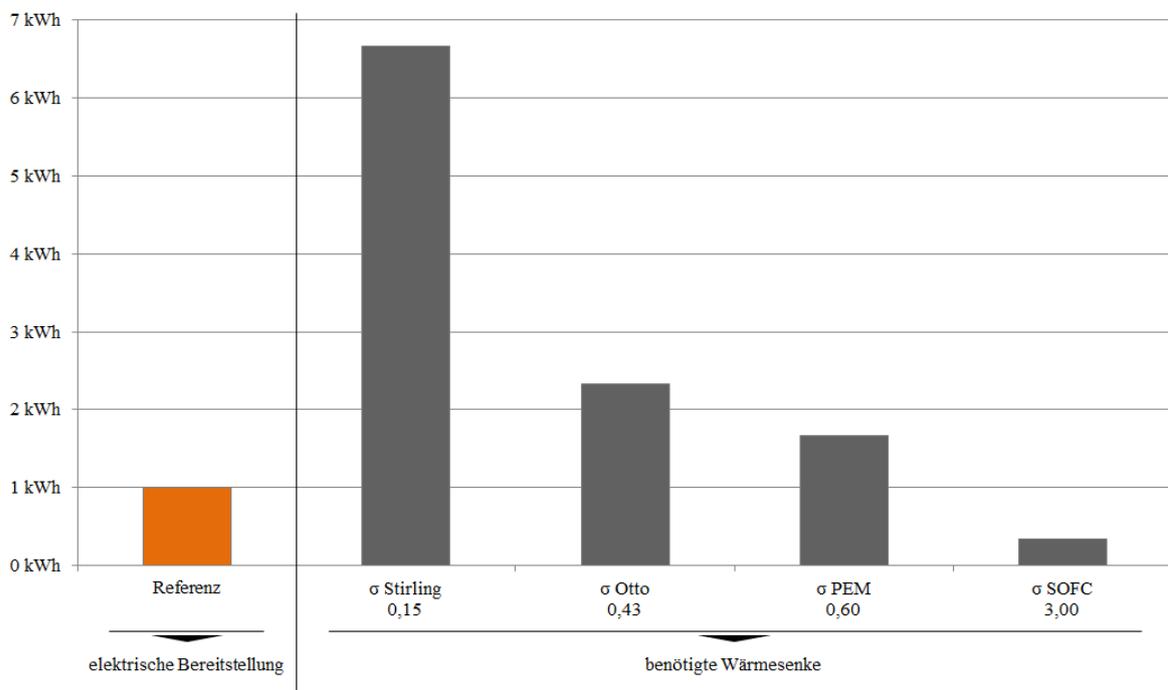
Durch die hohe Betriebstemperatur der SOFC wird kein vorgeschalteter Reformer benötigt, da das Erdgas direkt an der Anode gespalten und durch den Einsatz eines  $CO$ -unempfindlicheren Katalysators, Nickel, auch sofort verwendet werden kann. Des Weiteren liegt die Stromkennzahl dieses Brennstoffzellentyps bei Mikro-KWK-Anlagen derzeit bei rund 3,0 und ist sowohl im Vergleich zu den oben aufgeführten Kreisprozessen als auch zur PEM-Brennstoffzelle bedeutend höher. Die akuten Nachteile der Festoxid-Brennstoffzelle liegen in der erheblichen thermischen Belastung der verwendeten Materialien und der damit korrelierenden

<sup>1</sup> in Anlehnung an eine Darstellung des Instituts für Thermodynamik der Universität Hannover

mangelnden Flexibilität des Systems, da das An- und Abfahren nur bedingt und unter Risiko der Beschädigung der Brennstoffzelle möglich ist.

### 2.1.5 Zusammenfassende Darstellung der Technologien

Die Stromkennzahl eines gekoppelten Systems beschreibt das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Leistung. Abbildung 6 zeigt die benötigten Wärmesenken zur Bereitstellung eines elektrischen Energieäquivalents für unterschiedliche Technologien auf.



**Abbildung 6:** benötigte Wärmesenken in Abhängigkeit der Technologie, normierte Darstellung

Für eine Referenz von 1 kWh elektrischer Energie wird bei einem Stirlingmotor, aufgrund der Stromkennzahl von 0,15, eine relativ große Wärmesenke von rund 6,7 kWh benötigt. Sowohl der Otto-Motor als auch die PEM-Brennstoffzelle benötigen eine deutlich geringe Wärmesenke. Die kleinste Wärmeabnahme wird bei einer Festoxid-Brennstoffzelle benötigt. Die Wärmesenke entspricht rund 0,3 kWh, einem Drittel der elektrischen Bereitstellung. Diese Verhältnisse lassen sich auf beliebige Bedarfe extrapolieren und spiegeln die Stromkennzahlen wider.

Die folgende Tabelle stellt eine möglichst übersichtliche Zusammenfassung der spezifischen Technologieeigenschaften der bereits aufgezeigten und erläuterten Systemtechnologien dar.

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der wesentlichen Merkmale der Technologien

	<b>Merkmale</b>
<b>Ottomotor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausgereifte, vielfach bewährte Technologie</li> <li>- Vielzahl an Geräten auf dem Markt</li> <li>- vergleichsweise hohe Geräuscentwicklung, Geräuschdämmung möglich</li> <li>- normale Emissionen durch innenliegende Verbrennung</li> <li>- relativ wartungsintensiv (Öl-, Zündkerzenwechsel, etc.)</li> <li>- elektrische Wirkungsgrade: 20 % - 30 %</li> <li>- thermische Wirkungsgrade: 60 % - 70 %</li> </ul>
<b>Stirlingmotor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Emissionen durch externe Wärmezufuhr</li> <li>- kompakte Bauweise und Wandaufhängung</li> <li>- geringer Wartungsaufwand</li> <li>- elektrische Wirkungsgrade: 10 % - 16 %</li> <li>- thermische Wirkungsgrade: 80 % - 90 %</li> </ul>
<b>Dampf-expansion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Emissionen durch externe Wärmezufuhr</li> <li>- hohe Modulationsfähigkeit</li> <li>- elektrische Wirkungsgrade: 10 % - 15 %</li> <li>- thermische Wirkungsgrade: 80 % - 90 %</li> </ul>
<b>Brennstoffzelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr leiser Betrieb</li> <li>- relativ wartungsarm</li> <li>- sehr geringe Emissionen</li> <li>- hohe Modulierbarkeit</li> <li>- Anlagen derzeit im Stadium der Labor- bzw. Feldtestphase</li> <li>- je nach Anlagentyp ist das Ausschalten der Anlage nur sehr langsam und mit der Gefahr eines Stackfehlers möglich</li> <li>- sehr hohe elektrische Wirkungsgrade: 30 % - 60 %</li> <li>- thermische Wirkungsgrade: 25 % - 70 %</li> </ul>

Auf eine eindimensionale Wertung der unterschiedlichen Eigenschaften wurde im Hinblick auf die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten der Systemtechnologien bewusst verzichtet.

## 2.2 Neue Technologien

Neben den bereits dargestellten, absehbar verfügbaren KWK-Technologien befinden sich für den gekoppelten Einsatz derzeit noch einige Technologien im Stadium der Forschung und Entwicklung. Im Folgenden werden drei ausgewählte unterschiedliche Technologien kurz vorgestellt.

### 2.2.1 Stirling-Vuilleumier

Die technische Universität Dortmund begann im Januar 2009 mit der Entwicklung einer Versuchsanlage welche die dezentrale Energieversorgung durch variable Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung effizienter umsetzen soll. Nachdem die Entwicklung und Fertigung eines ersten Prototyps im Januar 2010 beendet war konnte die Anlage bis April aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Seit April 2010 wird nun das Betriebsverhalten sowie mögliche Betriebsszenarien untersucht und die Anlage einem Dauertest unterzogen. Die folgende Abbildung stellt die grundlegenden Prozessbestandteile die dieser Entwicklung zugrunde liegen dar und zeigt die vereinfachte schematische Darstellung der Funktionsprinzipien der unterschiedlichen Teilprozesse auf.

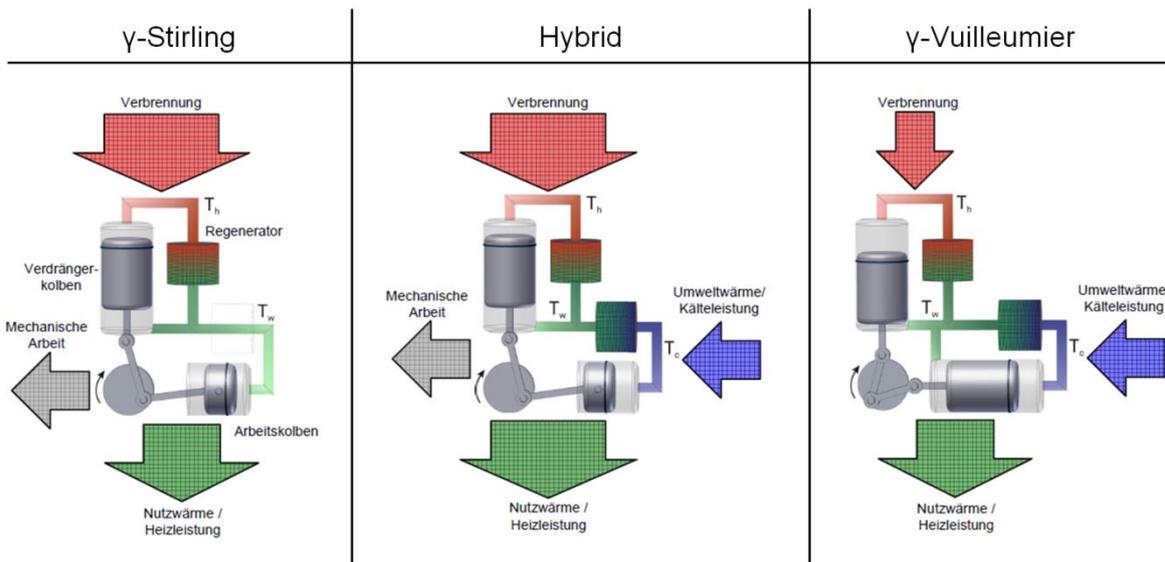


Abbildung 7:  $\gamma$ -Stirling-,  $\gamma$ -Vuilleumier- und Hybrid-Prozess nach [TUD10]

### **2.2.1.1 Stirling ( $\gamma$ -Bauweise)**

Der Stirlingmotor in Gamma-Bauweise basiert – genau wie die Beta-Bauweise (siehe Kapitel 2.1.1) – auf einem thermisch angetriebenen regenerativen Gas-kreisprozess. Bei der Gamma-Anordnung beinhaltet das System einem Verdrängerkolben (die Bewegung beeinflusst das Systemvolumen nicht) und einem Arbeitskolben (die Bewegung beeinflusst das Systemvolumen) sowie einen Regenerator. Die Funktionsweise ist analog zu jenen Grundlagen des Beta-Stirlingmotors und zeichnet sich lediglich durch eine getrennte Anordnung der unterschiedlichen Kolben sowie eine örtliche Trennung des Regenerators vom Verdrängerkolben aus.

Nach [TUD10] sind wesentliche Vorteile des Gamma-Stirlingmotors die hohe Lebensdauer, ein ruhiger Betrieb sowie ein geringer Wartungsbedarf. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Art der Feuerung frei zu wählen, da es sich um eine externe Wärmezufuhr handelt, was wiederum mit geringeren Schadstoffemissionen im Vergleich zum Ottomotor korreliert.

Die Energieaufnahme erfolgt durch die Einbringung von thermischer Energie beispielsweise aus einer Verbrennung in das System. Die Energieabgabe des Systems erfolgt in Form von mechanischer Arbeit die wiederum in elektrische Arbeit umgewandelt werden kann sowie in Form von thermischer Energie auf einem potenziell nutzbaren Temperaturniveau.

### **2.2.1.2 Vuilleumier-Wärmepumpe**

Im Gegensatz zum Gamma-Stirlingmotor besteht die Vuilleumier-Wärmepumpe aus zwei Verdrängerkolben und zwei Regeneratoren. Durch die Verknüpfung eines links- und rechtsdrehenden Kreisprozesses zeichnet sich diese Art von Wärmepumpe durch drei unterschiedliche Temperaturniveaus aus.

Ähnlich wie beim Stirlingmotor liegt laut [TUD10] ein großer Vorteil des Prozesses in den externen Wärmequellen. Die sekundäre externe Wärmequelle bezieht ihren Wärmebedarf beispielsweise aus Umweltwärme und kann thermische Energie auf einem sehr niedrigen Temperaturniveau nutzen. Diese Technologie der Wärmepumpe kann somit auch als Kältemaschine betrieben werden. Die Kombination aus beiden externen Energiezuflüssen kann dem System als Nutzwärme entzogen werden. Ein weiterer großer Vorteil gegenüber anderen, mechanisch angetriebenen Wärmepumpen ist, dass die Bewegungsenergie für die beiden Verdrängerkolben aus den Temperaturdifferenzen im System resultiert, sodass quasi kein Strombedarf für die aktive Bewegung der Kolben benötigt wird.

Lediglich die Verluste durch die Dissipation des Prozesses müssen durch die Zuführung von externer mechanischer Energie ausgeglichen werden.

Bei der Vuilleumier-Wärmepumpe erfolgt der Energieeintrag in das System zum einem aus einer Wärmequelle auf einem hohen Temperaturniveau sowie aus einer Wärmequelle mit einem sehr niedrigen Temperaturniveau. Resultierend aus dem Vuilleumier-Prozess ergibt sich eine Nutzwärmebereitstellung als bilanzieller Energieaustrag.

### **2.2.1.3 Hybrid**

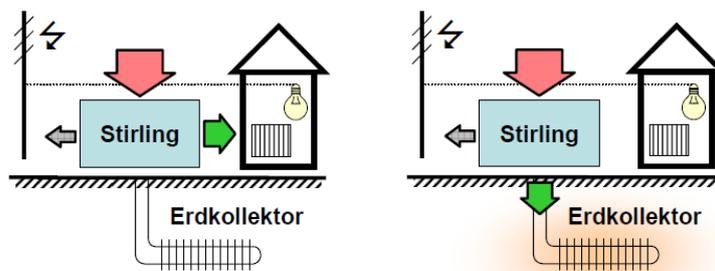
Durch die Kombination sowohl des  $\gamma$ -Stirlingmotors als auch der Vuilleumier-Wärmepumpe können beide Vorteile der Teilkomponenten vereint werden. Diese Kombination liegt derzeit lediglich als Prototyp vor und befindet sich primär im Bereich der Forschung und Entwicklung. Die thermische Prozessenergie wird durch zwei externe Wärmequellen, eine auf einem hohen und eine auf einem niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zur reinen Vuilleumier-Wärmepumpe wird neben der Nutzwärme auch mechanische Arbeit freigesetzt, die wiederum in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Laut [TUD10] ist somit eine anteilige Stromerzeugung korrelierend mit der Wärmepumpenwirkung möglich. Hierbei würde der komplette Energieeintrag auf dem hohen Temperaturniveau – beispielsweise durch eine Verbrennung – als Nutzwärme im gleichen Maße abgegeben werden. Die zusätzlich abführbare mechanische Arbeit entspricht der aufgenommenen Energie des niedrigen Temperaturniveaus, welche wiederum zur Kältebereitstellung verwendet werden kann. Durch die Verwendung des variablen Systems können situationsabhängig sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile optimiert werden. Im Folgenden werden mögliche Betriebsszenarien für den Stirling-Vuilleumier in Kombination mit einem Erdkollektor nach [TUD10] aufgezeigt.

### **2.2.1.4 Betriebsarten**

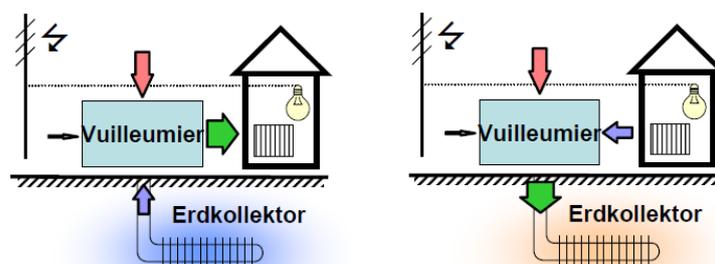
Die Variabilität und die Möglichkeit in kurzer Zeit große Lastwechsel durchzuführen machen die dezentrale Energieversorgung durch variable Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen besonders für Eigenheimbesitzer und kleine Unternehmen attraktiv. Da zwischen den drei Prozessen ( $\gamma$ -Stirlingmotor, Vuilleumier-Wärmepumpe und Hybrid) schnell und problemlos gewechselt werden kann ergeben sich zahlreiche Arten der Nutzung.

In den folgenden Abbildungen stellen die roten Pfeile die prozessrelevanten Energieflüsse des hohen, die grünen Pfeile des mittleren und die blauen Pfeile des niedrigen Temperaturniveaus dar. Der graue Pfeil symbolisiert den Fluss der Bereitstellung oder den Bezug von elektrischer Energie.



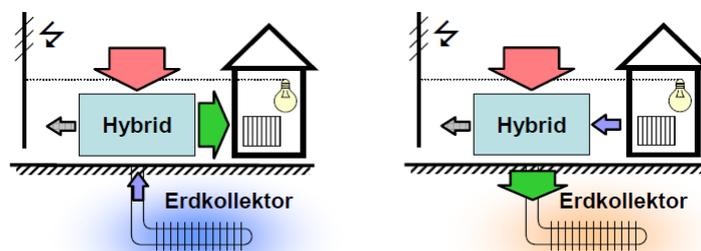
**Abbildung 8:** Betriebsart: primäre Strombereitstellung [TUD10]

Zur Abdeckung von hohen Strombedarfen oder von Spitzenlastströmen, kann das variable System wie in Abbildung 8 als Stirlingmotor betrieben werden. Für den Fall das Heizwärme im Objekt benötigt wird, kann die anfallende, ausgekoppelte Wärme im Gebäude selbst genutzt werden. Wenn kein Wärmebedarf vorhanden ist, kann die bereitgestellte Wärme durch den Erdkollektor abgeführt werden. Dies könnte vor allem zur Abdeckung von Stromlastspitzen sinnvoll sein.



**Abbildung 9:** Betriebsart: geringer Strombedarf[TUD10]

Die Nutzungsmöglichkeiten des Systems als Wärmepumpe ist in Abbildung 9 exemplarisch dargestellt. Sofern kein Strombedarf vorhanden ist kann die Vuilleumier-Wärmepumpe sowohl zur Wärme- als auch zur Kältebereitstellung genutzt werden. Der Erdkollektor fungiert bei Wärmebedarf als Wärmequelle des niedrigen Temperaturniveaus. Zur Abdeckung eines Kältebedarfs, beispielsweise für die Klimatisierung eines Gebäudes, wird dem System die bereitgestellte Wärme des mittleren Energieniveaus durch den Erdkollektor entzogen.



**Abbildung 10:** Betriebsart: hoher Strombedarf [TUD10]

Die kombinierte Nutzung als Hybrid vereint die Vorteile des  $\gamma$ -Stirlings sowie der Vuilleumier-Wärmepumpe. Sowohl ein mittlerer elektrischer Bedarf als auch ein hoher Wärmebedarf können zeitgleich unter Hinzunahme der Umgebungswärme des Erdkollektors durch den Hybridbetrieb bereitgestellt werden. Die Bereitstellung einer Kühlleistung erfolgt wiederum gekoppelt und korreliert somit mit einer gleichzeitigen Strombereitstellung. Die thermische Energie des mittleren Temperaturniveaus kann in diesem Fall wiederum über den Erdkollektor an die Umgebung abgegeben werden.

Beim Hybrid aus  $\gamma$ -Stirling und Vuilleumier-Wärmepumpe handelt es sich noch um einen Prototypen, sodass eine Markteinführung zeitnah nicht erwartet werden kann. Die Frage, ob die resultierenden Investitionskosten für eine solche Anlage in einem sinnvollen Verhältnis zu einer potenziellen Energieeinsparung stehen, kann nicht fundiert beantwortet werden.

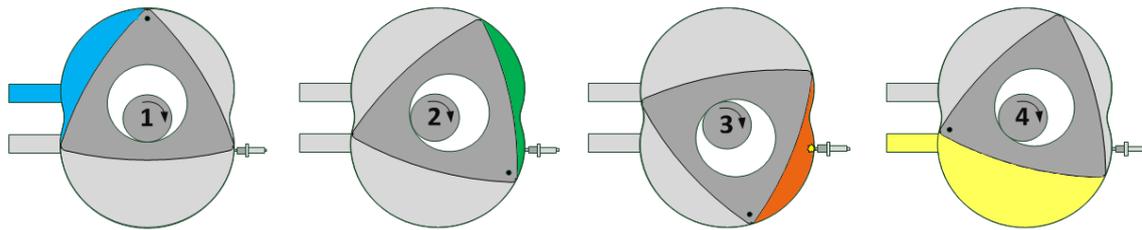
Eine weiterführende Bewertung der Einsatzmöglichkeiten kann erst auf Grundlage eines weiter vorgeschrittenen und vor der Markteinführung stehenden Prototypens erfolgen und sollte im Rahmen von möglichen zukünftigen Projekten ins Auge gefasst werden.

## 2.2.2 Wankelmotor

Beim Wankelmotor handelt es sich im Gegensatz zum Ottomotor<sup>2</sup> (beide Motoren sind interne Verbrennungsmotoren) nicht um einen Hubkolbenmotor sondern um einen Rotationskolbenmotor mit einem einzelnen, in einer Kreisbewegung laufenden, Kolben.

---

<sup>2</sup> Die Bezeichnung Ottomotor ist im allgemeinen Sprachgebrauch üblich. Es handelt sich sowohl beim Hubkolben-(Otto)Motor als auch dem Rotationskolben-(Wankel)-Motor um Ottomotoren, da die Bezeichnung Otto lediglich den thermodynamischen Vergleichsprozess kennzeichnet.



**Abbildung 11:** Funktionsweise: Rotationskolben-(Wankel)-Motor

Wie bereits der Stirling- und der Ottomotor lässt sich die Funktionsweise des Wankelmotors durch einen Kreisprozess mit vier Takten vereinfacht beschreiben. Im ersten Takt wird durch die Drehbewegung des Läufers Verbrennungsluft in den Motorraum gesaugt. Durch die weitere Zuführung von Kraftstoff wird ein brennbares Medium generiert. Es besteht auch die Möglichkeit das Brennstoff-Luft-Gemisch direkt durch den Einlass in dem Motorraum einzuführen. Im zweiten Takt wird das Gemisch durch die Reduzierung des Arbeitsraums verdichtet und anschließend im dritten Takt gezündet. Durch die Freisetzung der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs erfolgt eine Druck- und Temperaturerhöhung des Arbeitsgasvolumens, die durch die aktive Bewegung des Läufers in mechanische Energie umgewandelt wird. Im letzten Takt werden die Verbrennungsgase über den Auslass abgeführt. Die abgeführte thermische Energie des Abgases kann für die Wärmeauskopplung genutzt werden.

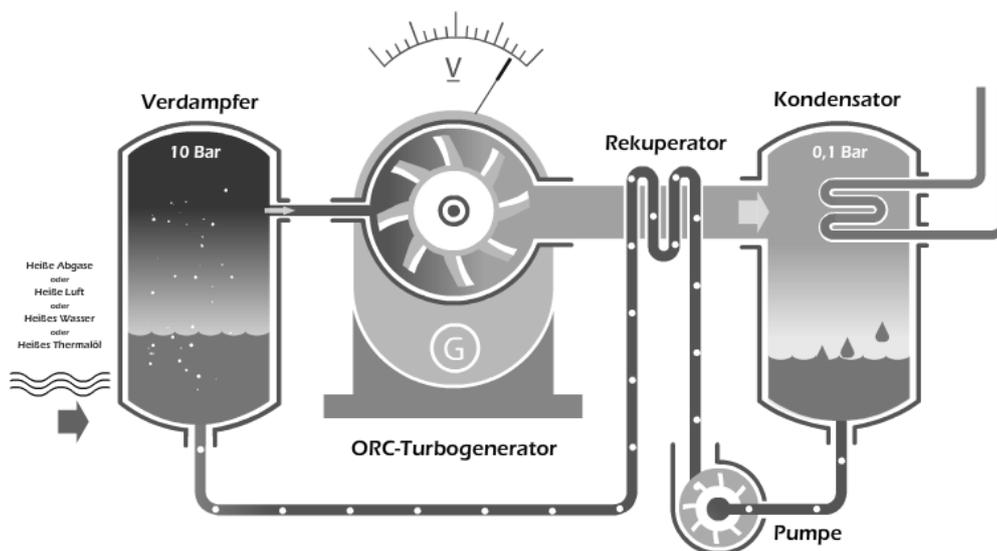
Der Wankelmotor zeichnet sich besonders durch seine kompakte Bauweise, resultierend aus dem hohen Verhältnis von Leistung zum Gewicht, aus. Aufgrund der konstanten Kreisbewegung ist ein besonders schwingungsarmer, somit leiser und wartungsunempfindlicher Betrieb möglich. Aufgrund der räumlichen Trennung des Ein- und Auslasses ist ein Betrieb mit Wasserstoff  $H_2$  theoretisch möglich. Ein Nachteil ist, dass sich die Brennkammer räumlich gesehen an einer konstanten Stelle befindet, sodass eine aktive, gezielte Kühlung zur Minimierung von Hotspots des Gehäuses vor allem in diesem Bereich erforderlich ist um eine Selbstzündung des Gemisches auszuschließen und um die thermische Belastung der Bauteile zu reduzieren.

Aufgrund des bauartbedingten guten Leistungs-Gewichtsverhältnis sind die geometrischen Abmessungen im Vergleich zum Ottomotor geringer. Der daraus resultierende geringere Einsatz von Materialien könnte sich positiv auf die Produktionskosten bemerkbar machen, sodass ein ökonomisch sinnvoller Einsatz im Mikro-KWK-Bereich möglicherweise realisierbar wäre.

Im Rahmen eines Projektes der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) [UIS11] wird die Entwicklung eines Wankelmotorisch betriebenen „Klein-BHKWs“ in der elektrischen Leistungsklasse von fünf bis zehn Kilowatt vorangetrieben.

### 2.2.3 Organischer Rankine Kreisprozess

Bei diesem Kreisprozess handelt es sich um einen Dampfturbinenprozess (die Eigenschaften der Phasenübergänge werden genutzt), der sich besonders durch das eingesetzte Arbeitsmedium auszeichnet. Im Gegensatz zu Anlagen mit Wasser als Arbeitsmedium, liegt der essentielle Vorteil des eingesetzten organischen Arbeitsmediums in der niedrigeren Siedetemperatur. Hierdurch kann bereits durch „kleine“ Wärmequellen mit niedrigen Temperaturen eine Verdampfung des Arbeitsmediums herbeigeführt werden. Die verminderten Arbeitsmedium-Temperaturen korrelieren mit relativ niedrigen Drücken innerhalb des Systems und führen folglich zu einer geringen Beanspruchung der eingesetzten Bauteile, sodass auf kostspielige und wartungsintensive Hochdrucktechnik verzichtet werden kann.



**Abbildung 12:** Funktionsweise: Organischer Rankine Kreisprozess, [GMK11]

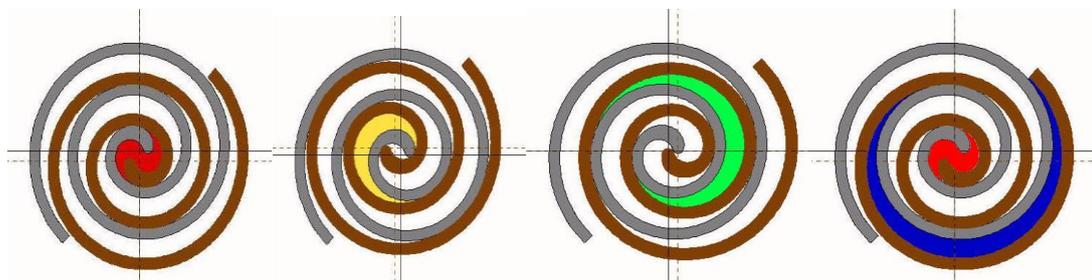
Die Funktionsweise beruht auf der Wärmezufuhr von einer externen Wärmequelle. Durch den thermischen Energieeintrag ins System (heiße Abgase, heiße Luft, heißes Wasser, heißes Thermalöl) wird das organische Arbeitsmedium verdampft und überhitzt, sodass ein vergleichsweise hoher Druck innerhalb des Systems generiert wird. Über eine Turbine oder einen Schraubenexpander wird die innere Energie des Arbeitsmediums in mechanische Rotationsenergie der Generator-

welle umgewandelt und somit dem System entzogen. Das verdampfte Arbeitsmedium wird über einen Rekuperator – zur Rückkopplung der thermischen Energie im System – zum Kondensator geleitet, der wiederum die restliche Wärme aus dem System auskoppelt. Durch die Speisepumpe des Systems wird das verflüssigte, organische Arbeitsmedium durch den Rekuperator geleitet um es vorzuwärmen und es danach erneut dem Verdampfer zuzuführen. Der wesentliche Unterschied im Gegensatz zu konventionellen Turbinenprozessen mit Wasserdampf liegt in den wesentlich geringeren Temperaturen und niedrigeren Drücken innerhalb des Systems. Da es sich analog zu den Stirling- und Dampfmaschinen um einen Prozess mit einer externen Wärmequelle handelt, zeichnet sich die ORC-Anlage durch niedrige Emissionen aus und bietet ebenso den Vorteil, dass die Anlagenleistung gut moduliert werden kann. Laut [ZUM06] führt der Einsatz von organischen Fluiden als Arbeitsmedium weiterhin zu höheren Wirkungsgraden und korreliert mit geringeren Wartungs- und Bedienungsaufwendungen.

Die Firma Genlec aus England hat das Prinzip des Organischen Rankine Kreisprozesses aufgegriffen und eine Mikro-KWK-Anlage für den Hausgebrauch entwickelt. Dieses kompakte Gerät (Produktbezeichnung: Kingston) soll sich einfach an der Wand anbringen lassen und könne je nach Bedarf Wärme und Strom produzieren. Laut Hersteller ist das Gerät in der Lage eine Wärmeleistung von 18 Kilowatt sowie eine elektrische Leistung von einem Kilowatt zur Verfügung zu stellen. Das System nutzt einen Schraubenexpander und erreicht laut Hersteller [GEN11] einen Gesamtwirkungsgrad von rund 90 %.

### Schraubenexpander

Die Energiewandlung im Genlec Kingston wird über einen Schraubenexpander realisiert, dessen Funktionsweise im Folgenden kurz erläutert wird.



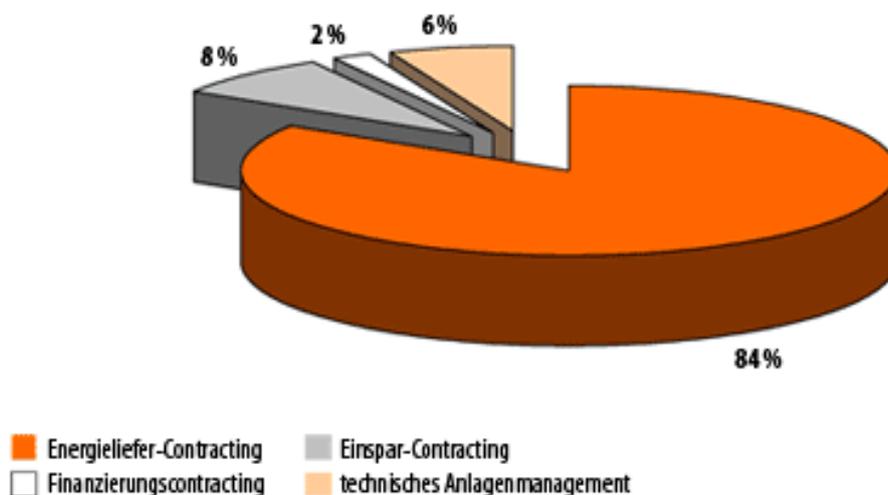
**Abbildung 13:** Funktionsweise: Schraubenexpander, [UoQ11]

Der Schraubenexpander besteht aus zwei Spiralen, von denen eine fest am Gehäuse angebracht und die andere frei beweglich ist. Im Mittelpunkt der Spiralen

befindet sich eine Öffnung durch die das dampfförmige Arbeitsmedium eingeleitet wird. Das energiereiche komprimierte Arbeitsmedium entspannt sich durch die Spirale und wandelt dabei die innere Energie in mechanische Rotationsenergie um, die wiederum für die Bereitstellung von Strom über einen Generator genutzt werden kann.

## 2.3 Contracting-Varianten

Unter dem Begriff des Contractings versteht man eine zeitlich festgesetzte Übertragung von Aufgaben, mit dazugehörigen Risiken auf ein hierauf spezialisiertes Unternehmen. Es gibt, definiert durch die [DIN 8930-5], verschiedene Arten von Contracting. Jede dieser Varianten hat ihre Vorteile für die jeweilige Situation und kann gegebenenfalls mit anderen Contracting-Varianten kombiniert werden, was in der Praxis jedoch eher selten der Fall ist. Die nun folgenden Beschreibungen treffen für verschiedene Contracting-Varianten im Bereich der Energietechnik zu, da es Möglichkeiten des Contractings in verschiedensten Bereichen gibt. Abbildung 14 zeigt die relative Verteilung der unterschiedlichen Contracting-Varianten für das Bezugsjahr 2007 auf und kann als Grundlage zur Beurteilung der Stellenwerte der vier dargestellten Varianten in der Praxis herangezogen werden.



**Abbildung 14:** relative Verteilung der Contracting-Varianten 2007, [VfW11]

### 2.3.1 Energieliefer-Contracting

Beim Energieliefer-Contracting handelt es sich um die am Markt verbreitetste Variante des Contractings. Ziel dieses Modelles ist die Erneuerung bzw. Erstinstallation von energietechnischen Anlagen, bei denen der Contractor – je nach Leistungsumfang – die Planung, Finanzierung, Errichtung und den Betrieb, inklusive der Instandhaltung und der Wartung sowie häufig auch den Energieeinkauf und den Nutzenergieverkauf auf eigenes Risiko übernimmt. Der Kunde

zahlt einen Preis für die gelieferte Nutzenergie, der die Energiebezugs- und Investitionskosten sowie die Wartungs- und Servicekosten deckt. Dieser Betrag wird während der Vertragslaufzeit, die sich durchschnittlich auf zehn bis 15 Jahre beläuft, durch eine Preisgleitformel den wirtschaftlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen angepasst.

Der große Vorteil für den Kunden ist das Outsourcing des Anlagenbetriebs auf den Contractor, sodass er sich nicht mehr mit der Energieversorgung befassen muss. Der Contractor trägt weiterhin die Risiken der Investition und möglicher Folgekosten. Des Weiteren bietet diese Methode den Vorteil, dass, auch bei nicht vorhandenem Eigenkapital oder mangelnden energietechnischen Kenntnissen, eine neue energetisch optimierte Anlage installiert werden kann. Die Optimierung steht hierbei auch für den Contractor im Vordergrund, da er beim optimierten Betrieb den meisten Gewinn verbuchen kann.

Der Vorteil für die Umwelt ist daher sehr groß, da die energietechnische Anlage optimal für die gegebenen Rahmenbedingungen ausgelegt wird und somit die Schadstoffemissionen minimiert werden.

### **2.3.2 Einspar-Contracting**

Beim sogenannten Einspar-Contracting geht es, wie der Name schon sagt, um eine bestimmte Einsparung, die der Contractor garantiert. Hierzu findet eine Optimierung der vorhandenen Gebäudetechnik und des Gebäudebetriebs durch den Contractor in Zusammenarbeit mit dem Contractingnehmer statt. Die Finanzierung wird vom Contractor übernommen und durch die Entgelte refinanziert.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Investition, auf die Energieeinsparpotenziale des Gebäudes sowie auf die Verbesserung des Substanzwertes, gibt der Contractor eine zugesicherte Einsparung bzw. Verbesserung an.

Eine Energieeinsparung wird garantiert und an den Kunden weitergegeben, sodass dieser mit einem Teil der Ersparnis die monatlichen Entgelte des Contractors bezahlen kann. Das Risiko liegt hier beim Contractor, der bei einer geringeren Einsparung die, für ihn negativen Folgen zu tragen hat.

Das Ziel des Contractors ist, eine möglichst optimale Energieeffizienzsteigerung des Gebäudes zu realisieren. Die Effizienzsteigerung korreliert mit einem gesenkten Primärenergiebedarf, der sich sehr positiv auf die Umwelt auswirkt und im Vergleich zu den anderen Modellen mit am Größten ist.

### **2.3.3 Finanzierungs-Contracting**

Anwendungsschwerpunkt des Finanzierungs- oder auch Third-Party-Financing ist die optimierte Auslegung einer energietechnischen Anlage und deren Finanzierung im Hinblick auf die Investitionskosten.

Der Unterschied zum Energieliefer-Contracting ist, dass der Anlagenbetrieb in Händen des Contractingnehmers verbleibt. Die Risiken liegen nun nicht mehr beim Contractor, sondern beim Kunden, der, zusätzlich zu den Energiebezugs- und Wartungskosten, monatliche Entgelte an den Contractor in Abhängigkeit der Investitionskosten und Vertragslaufzeit zahlt.

### **2.3.4 Technisches Anlagenmanagement**

Eine weitere Variante ist das Technische Anlagen Management, welches auch oft als Betriebsführungs-Contracting bezeichnet wird. Hierbei wird nur der Anlagenbetrieb ausgelagert, sodass der Contractor die energetisch, technisch optimierte Betriebsführung, unter Einbezug einer Verminderung der Betriebskosten, einer neuen oder bestehenden energietechnischen Anlage übernimmt. Weiterhin ist der Contractor für den störungsfreien Betrieb der Anlage verantwortlich. Leitgedanke ist, dass durch das Fachwissen des Contractors eine hohe technische Qualität der Nutzenergie gewährleistet wird, sodass eine Grundlage für einen wirtschaftlichen Betrieb gegeben ist. Die Vergütung für die Arbeit des Contractors ist hierbei sehr variabel und kann daher nicht im Allgemeinen beschrieben werden.

Bei der optimierten Fahrweise der energietechnischen Anlage durch den Contractor wird primär auf die ökonomischen, jedoch nicht auf die ökologischen Einsparpotenziale geachtet. Daher ist eine Reduzierung der Umweltbelastungen nur eine Folge des für den Betrieb optimierten Energieeinsatzes und daher nur gering im Vergleich zum Energieliefer-Contracting.

### **2.3.5 Kombination**

Natürlich ist auch die Möglichkeit gegeben, die genannten verschiedenen Varianten des Contractings miteinander zu kombinieren, um einen für die gegebene Situation optimalen Contracting-Typen zu generieren. Hierbei können die Vorteile der verschiedenen Formen zusammengefasst und bestmöglich an die Gegebenheiten angepasst werden. Die Kombination der verschiedenen energiebezogenen Contracting-Varianten ist im Alltag bis dato jedoch nicht weit verbreitet.

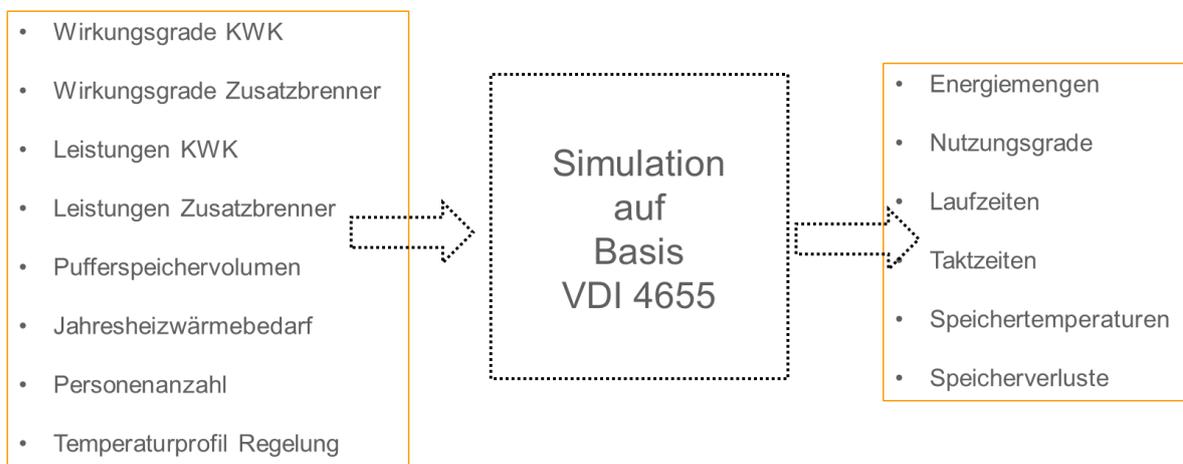
## 2.4 Simulationsgestützte Eignungsvergleiche

Die Vielzahl von KWK-Technologien in Verbindung mit Zusatzheizgeräten zu bivalenten Heizungssystemen zieht insbesondere beim Einsatz im EFH den Hausbesitzer, Energieversorger oder Anlagenbetreiber die Frage nach dem geeignetsten System nach sich. Aufgrund der in Relation zu großen KWK-Anlagen im dreistelligen Leistungsbereich kleinen Anlagen mit geringen absoluten Investitionen ist eine gezielte Planung und Dimensionierung aus Kosten- und Zeitgründen häufig nicht zielführend und nicht durchführbar. Trotz allem ist es von großer Bedeutung, mögliche Einflussparameter zu kennen und bewerten zu können. Neben den oben genannten generellen Vor- und Nachteilen der KWK-Technologien gilt es, bei realen Versorgungsaufgaben das Gesamtsystem zu betrachten. Hierbei sind zunächst die Prioritäten für den Einsatz eines solchen Systems festzulegen. Je nach Betreiber können die Anforderungen an ein KWK-System stark voneinander abweichen. Energieversorgern die ähnliche Ansätze zum Schwarmstromkonzept des Hamburger Energieversorgers Lichtblick verfolgen, benötigen dezentrale Anlagen die von extern gesteuert werden und bei Bedarf kurzfristig verhältnismäßig hohe Stromlieferungen aufweisen. In diesem Fall werden überdimensionierte Anlagen mit großen Pufferspeichern zur Entkopplung von der direkten Wärmeanforderung des Gebäudes eingesetzt. Im Gegensatz dazu, hat beim privaten Hausbesitzer die Optimierung der Energiekosten bei einer Heizungsmodernisierung die höchste Priorität. Neben den eigentlichen Investitionskosten ist bei der derzeitigen Vergütungssituation für den KWK-erzeugten, in das öffentliche Stromnetz eingespeisten elektrischen Strom, der im Haus selbst genutzte Strom ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage. In beiden Fällen muss zu einer Optimierung das Gesamtsystem, bestehend aus KWK-Einheit, Zusatzheizgerät und Kombi- bzw. Pufferspeicher, betrachtet werden. Insbesondere der Größe des Pufferspeichers wird ein immenser Einfluss auf einen optimalen Betrieb der KWK-Einheit beigemessen. Um einige dieser elementaren Einflussgrößen transparent darstellen zu können, wurde am GWI eine Jahressimulation entwickelt, die darauf abzielt, mit Hilfe einiger systemspezifischen Variablen, einen Gesamtüberblick über den Einsatz verschiedener KWK-Technologien im EFH zu verschaffen.

Zur detaillierten Dimensionierung und Planung von Mikro-KWK-Anlagen ist mit der [VDI 4656] eine Richtlinie inkl. Planungssoftware erhältlich. Mit dieser können Jahressimulationen an konkreten Objekten mit einer Vielzahl von erhältlichen Mikro-KWK-Systemen durchgeführt werden. welchem

## 2.4.1 Methodik

Die am GWI erstellte Jahressimulation von KWK-Systemen im EFH basiert im Wesentlichen auf den in [VDI4655] aufgeführten Lastprofilen für Strom, Heizwärme und Trinkwarmwasser. Weitere Eingangsdaten für die Simulation sind Effizienzdaten und Leistungsdaten der KWK-Einheit und des Zusatzheizgerätes. Ferner werden die betrachteten Systeme mit einem Kombispeicher ausgerüstet. In Abbildung 15 ist schematisch die Methodik der Simulation dargestellt und nachfolgend im Detail erläutert.



**Abbildung 15:** Schematische Darstellung zum Simulationsmodell

### 2.4.1.1 Lastgänge und Jahresmodellierung

Die in der VDI 4655 definierten Referenzlastprofile wurden auf Basis von insgesamt fünf vermessenen Einfamilienhäusern sowie drei vermessenen Mehrfamilienhäusern ermittelt. Dabei wurden die Gebäudebedarfe an elektrischen Strom, Trinkwarmwasser sowie Heizwärme getrennt voneinander in hoher Auflösung gemessen (1 min Auflösung im EFH, 15 min Auflösung im MFH). Die gemessenen Werte wurden zur Vergleichbarkeit normiert und kumuliert. Durch die Normierung der Daten, getrennt nach den drei Bedarfen, auf den jeweiligen Tagesbedarf als Bezugsgröße, werden Lastgangdaten verschiedener Gebäude und damit auch verschiedener Energiebedarfe qualitativ vergleichbar. Weiterhin werden die normierten Messdaten über einen Tag kumuliert.

Um einfach zu handhabende Referenzlastprofile zu erstellen, wurden die gemessenen Daten auf insgesamt 10 Typtagkategorien verteilt.

Als erstes Kriterium zur Einteilung wurde die Jahreszeit herangezogen. Es wird unterschieden zwischen Wintertagen, Sommertagen und Übertagtagen, die sowohl den Frühling als auch den Herbst einschließen. Die Unterscheidung nach Jahreszeit wurde auf Basis eines gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur über einen Zeitraum von sieben Tagen vorgenommen. Es wird von einem Wintertag ausgegangen, wenn das arithmetische Mittel der Außentemperatur über sieben Tage einen Wert von 5 °C unterschreitet. Ein Sommertag wird mit einer mittleren Temperatur von über 15 °C definiert. Zwischen den Werten der Außentemperatur von 5 °C und 15 °C wird von Übertagtagen im Herbst und Frühling ausgegangen. Diese Einteilung unterscheidet sich zwangsläufig von sonst üblichen Einteilungen der Jahreszeit, insbesondere der kalendarischen Definition.

Das zweite Kriterium bei der Einteilung der Lastgangdaten in zehn Typtagkategorien ist die Einteilung nach Wochentagen. Während sich eine Arbeitswoche von Montags bis Freitags hinsichtlich der Tageslastgänge kaum unterscheidet, sind an Sonntagen große Unterschiede, insbesondere bei den Lastgängen von Strom und Trinkwarmwasser zu beobachten. Die Samstage wurden zugunsten einer einfachen Handhabung der VDI 4655 den Werktagen zugeschrieben.

Eine weitere Unterscheidung wurde hinsichtlich der Bewölkung vorgenommen. Hinzugezogen wurden dazu Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes die das Tagesmittel des Bedeckungsgrades an der dem Gebäudestandort des vermessenen Gebäudes am nächsten gelegenen Messstation wiedergeben. Der Bedeckungsgrad hat insofern Einfluss auf den Tageslastgang, dass durch die solaren Gewinne sowohl der Heizwärmebedarf des Gebäudes sowie der Strombedarf, in Folge geringerer notwendiger künstlicher Lichtquellen, sinken.

Der Bedeckungsgrad wird vom DWD in achteilen gemessen, wobei ein vollständig bedeckter Himmel einem Bedeckungsgrad von 8/8 und ein Bedeckungsgrad von 0/8 einen wolkenlosen Himmel aufweist. Als Grenzwert zwischen einem bewölkten und einem heiteren Tag wird ein Bedeckungsgrad von 5/8 definiert.

Mit den hier genannten Merkmalen lassen sich die in Tabelle 2 genannten Typtagkategorien herleiten. Der erste Buchstabe der Abkürzung gibt dabei immer die Jahreszeit an (**Ü**bergang, **W**inter, **S**ommer), während der zweite Buchstabe den jeweiligen Wochentag (**W**erktag, **S**onntag) definiert und der letzte Buchstabe die Art der Bewölkung (**H**eiter, **B**ewölkt) angibt.

**Tabelle 2:** Typtagkategorien gemäß [VDI4655]

<b>Typtagkategorien</b>	
<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
ÜWH	Übergangswerktag, heiter
ÜWB	Übergangswerktag, bewölkt
ÜSH	Übergangssonntag, heiter
ÜSB	Übergangssonntag, bewölkt
SWX	Sommerwerktag
SSX	Sommersonntag
WWH	Winterwerktag, heiter
WWB	Winterwerktag, bewölkt
WSH	Wintersonntag, heiter
WSB	Wintersonntag, bewölkt

Aus den gemessenen Daten der fünf Einfamilienhäuser sowie drei Mehrfamilienhäuser wurden für die jeweiligen Typtagkategorien typische Lastgänge als Referenzlastprofile hergeleitet. Für jede Typtagkategorie wird jeweils ein Referenzlastprofil für elektrischen Strom, Trinkwarmwasser und Heizwärme angegeben.

Zur Erstellung eines Gesamtjahres zu Simulationszwecken, bestehend aus Typtagen der in Tabelle 2 hinterlegten Typtagkategorien muss zunächst der Standort des Gebäudes definiert werden. Der DWD teilt die Bundesrepublik Deutschland in insgesamt 15 Klimazonen ein. Diese können sich z.T. insbesondere hinsichtlich der Außentemperatur unterscheiden. Diese stellt ein entscheidendes Kriterium bei der Anzahl der Typtage je Typtagkategorie dar. Befindet sich das betrachtete Gebäude in einer Klimazone mit überdurchschnittlich geringen mittleren Tagestemperaturen, steigt die Anzahl der Winter- bzw. Übergangstage gegenüber den Sommertagen, wohingegen bei Klimazonen mit überdurchschnittlich hohen Tagesmitteltemperaturen, die Anzahl an Sommertagen und Übergangstagen im Vergleich zu den Wintertagen steigt.

Für die in diesem Projekt durchgeführten Simulationen wurden die betrachteten Gebäudeklassen in Klimazone 13 angesiedelt. Diese stellt ein gutes Deutsches Mittel dar, ohne starke Abweichungen aufzuweisen. Die Anzahl der Typtage je Typtagkategorie wird in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3:** Anzahl der Typtage je Typtagkategorie für Klimazone 13 [VDI4655]

Typtage je Typtagkategorie für Klimazone 13										
Abkürzung	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB
Anzahl	37	72	15	10	73	13	29	91	6	19

### 2.4.1.2 Eingesetzte KWK-Technologien

Aus der Vielzahl an erhältlichen KWK-Technologien wurden für den Eignungsvergleich die in Tabelle 4 hinterlegten Technologien verwendet. Dabei war es wichtig, möglichst realitätsnahe Leistungs- und Wirkungsgradwerte zu verwenden. Die angegebenen Daten beruhen daher auf existierenden Technologien ohne die jeweiligen Eigenschaften im Detail zu betrachten. Obwohl es prinzipiell möglich ist, modulierende KWK-Einheiten in einem System in der Simulation einzubinden wurde dies in den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt. In der Regel korreliert die Nennleistung einer KWK-Einheit mit dem höchsten Wirkungsgrad, so dass die betrachteten Anlagen ausschließlich in diesem Punkt betrieben werden.

**Tabelle 4:** In der Simulation analysierte KWK-Einheiten

Nr.	Bezeichnung	$Q_{th,N}$	$P_{el,N}$	$\eta_{th,N}$	$\eta_{el,N}$	$\eta_{ges}$
1	Ottomotor 1	2,5	1,0	64	26,8	90,8
2	Ottomotor 2	14,8	5,5	72	26,6	98,8
3	Stirling 1	5,5	1,0	87	15,3	102,3
4	Stirling 2	7,0	1,0	83	11,6	94,6
5	PEMFC-Brennstoffzelle	1,7	1,0	53	31,2	84,2
6	SOFC-Brennstoffzelle	0,5	1,5	20	60	80

Die thermischen Leistungen der eingesetzten KWK-Einheiten reichen in den wenigsten Fällen aus, um den Wärmebedarf im Gebäude insbesondere an kalten Wintertagen monovalent decken zu können. Aus diesem Grund werden die KWK-Einheiten in der Simulation in jedem Fall mit einem Zusatzheizgerät ausgestattet. Die benötigte Leistung des Zusatzheizgerätes wird dabei über eine einfache überschlägige Berechnung der Heizlast eines Gebäudes ermittelt. Die Differenz aus Heizlast und Leistung der KWK-Einheit entspricht der benötigten Leistung des Zusatzheizgerätes.

### **2.4.1.3 Speichermodellierung**

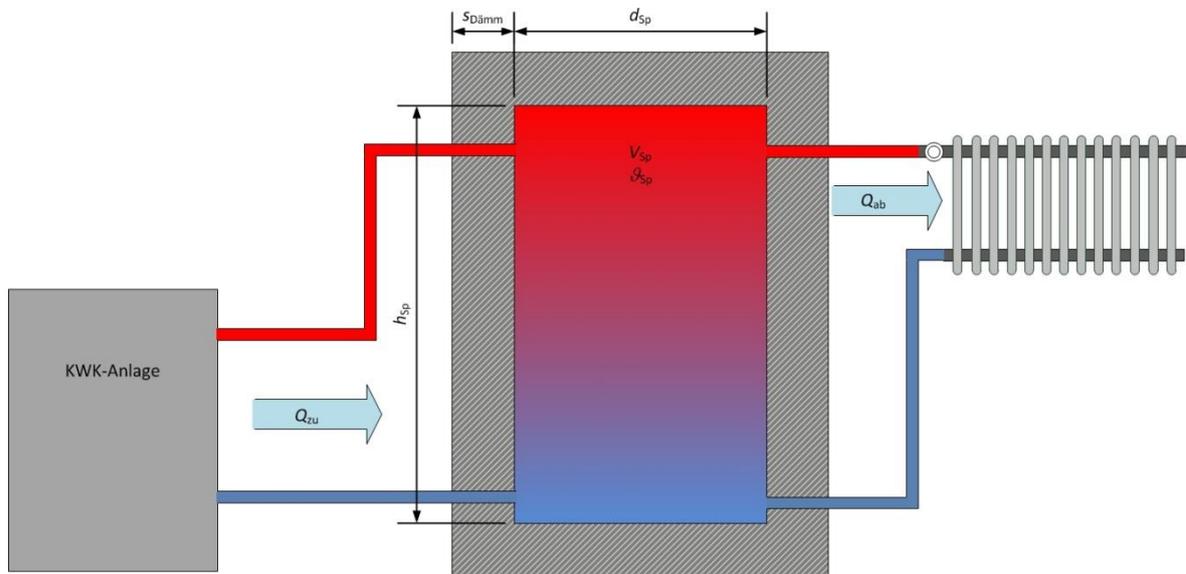
Das Kernstück eines Mikro-KWK-Systems für den Einsatz im Ein- und Mehrfamilienhaus ist in den meisten Fällen ein Puffer- bzw. Kombispeicher<sup>3</sup> der zur Entkopplung vom Wärmebedarf des Gebäudes und der Lieferung von Wärme aus dem Mikro-KWK-System eingesetzt wird. Mit Hilfe eines Speichers können die Taktungen der KWK-Einheit und auch die Taktungen eines Zusatzheizgerätes im Mikro-KWK-System vermindert werden. Weiterhin ist die Entkopplung der Wärmelieferung vom Wärmebedarf unerlässlich, wenn das System auf eine Deckung des Strombedarfs im Haushalt bzw. zur extern geregelten Netzunterstützung optimiert wird. Auch eine mögliche Nutzung regenerativer Energien wie bspw. durch eine Einbindung solarthermischer Anlagen ist über eine Speicherlösung einfach zu bewerkstelligen.

In der hier genutzten Simulation wird davon ausgegangen, dass ein Mikro-KWK-System in jedem Fall mit einem Kombispeicher zur Vorhaltung von Wärme zu Heizzwecken und von Trinkwarmwasser eingesetzt wird. Das Volumen des Speichers kann dabei beliebig variiert werden, so dass es prinzipiell möglich wäre, das Volumen in dem Maße anzugeben, dass es dem Volumen eines typischen Heizkreises entspricht. In diesem Fall könnte das System für eine Anwendung ohne Speicher simuliert werden. Allerdings muss beachtet werden, dass in diesem Fall die Trinkwarmwasserbereitung über Durchlauferhitzer bereitgestellt werden muss, bzw. ein reiner Speicher zur Trinkwarmwasserbereitung einzusetzen ist. Aufgrund der Vielzahl an Variationsmöglichkeiten wurden solche Szenarien in dieser Arbeit nicht betrachtet. Über geringfügige Anpassungen des Simulationstools wären solche Rechnungen nachgeschaltet möglich.

---

<sup>3</sup> Mit Kombispeicher werden Warmwasserspeicher bezeichnet die sowohl als Heizungspuffer fungieren als auch zur Vorhaltung von Trinkwarmwasser dienen.

Das Prinzip der Speichereinbindung in die Simulation ist in Abbildung 16 dargestellt. Das wichtigste Kriterium bei der Speicherauswahl ist zunächst das Volumen eines solchen. Dieses wird als Eingabeparameter genutzt und ist frei variierbar.



**Abbildung 16:** Prinzipielle Darstellung der Einbindung eines Kombispeichers in die Simulation

Über die Angabe des gewünschten Volumens und der einfachen Annahme, dass der Durchmesser des Speichers ein Drittel der Höhe beträgt, lässt sich diese über die nachfolgende Gleichung ermitteln.

$$h_{sp} = \sqrt[3]{\frac{36 V_{sp}}{\pi}} \quad (1)$$

Zur Verringerung der Speicherverluste ist eine Dämmung des Speichers vorzusehen. Die Daten der Wärmedämmung sind variabel und können beliebig geändert werden. Als Basisdaten für den Eignungsvergleich wurden alle betrachteten Speichergrößen mit einer vollständig umschließenden Wärmedämmung der Dicke  $s_{Dämm}$  von 100 mm ausgestattet. Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung wird mit einem Wert von  $\lambda_{Dämm} = 0,03 \text{ W}/(\text{m K})$  angenommen. Über die Gesamtoberfläche des Speichers sowie der Dämmschichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung lässt sich die temperaturspezifische Verlustleistung des Speichers berechnen (2).

$$q_V = \frac{\lambda_{\text{Dämm}}}{s_{\text{Dämm}}} A_{\text{Sp}} \quad (2)$$

Die tatsächliche Verlustleistung wird durch die folgende Gleichung beschrieben.

$$\dot{Q}_{V,\text{Sp}} = q_V (\vartheta_{\text{Sp}} - \vartheta_U) \quad (3)$$

Die in (3) enthaltene Umgebungstemperatur wird vereinfacht mit einem Wert von  $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$  für das gesamte Jahr angenommen. Die Speichertemperatur wird minutengenau über die folgende Energiebilanzierung ermittelt.

Die in Abbildung 16 dem Speicher zugeführte, schematisch dargestellte Energie  $Q_{\text{zu}}$  ist die Summe aus der bereitgestellten Wärme aus der KWK-Einheit und der bereitgestellten Wärme aus dem Zusatzheizgerät.

$$Q_{\text{zu}} = Q_{\text{KWK}} + Q_{\text{Zusatz}} \quad (4)$$

Dem Speicher wird die Wärme  $Q_{\text{ab}}$ , bestehend aus dem Bedarf an Heizwärme  $Q_{\text{Heiz}}$  und dem Bedarf an Wärme zur Bereitung von Trinkwarmwasser  $Q_{\text{TWW}}$  entnommen. Weiterhin sind die auftretenden Speicherverluste  $Q_{V,\text{Sp}}$  die ebenfalls durch die bereitgestellte Wärme ausgeglichen werden müssen enthalten.

$$Q_{\text{ab}} = Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{TWW}} + Q_{V,\text{Sp}} \quad (5)$$

Je nachdem wie sich die Differenz aus dem Speicher bereitgestellter Wärme zu dem Speicher entnommener Wärme darstellt, verringert bzw. erhöht sich der Energieinhalt im Speicher um den Wert,

$$\Delta Q_{\text{Sp}} = Q_{\text{zu}} - Q_{\text{ab}} \quad (6)$$

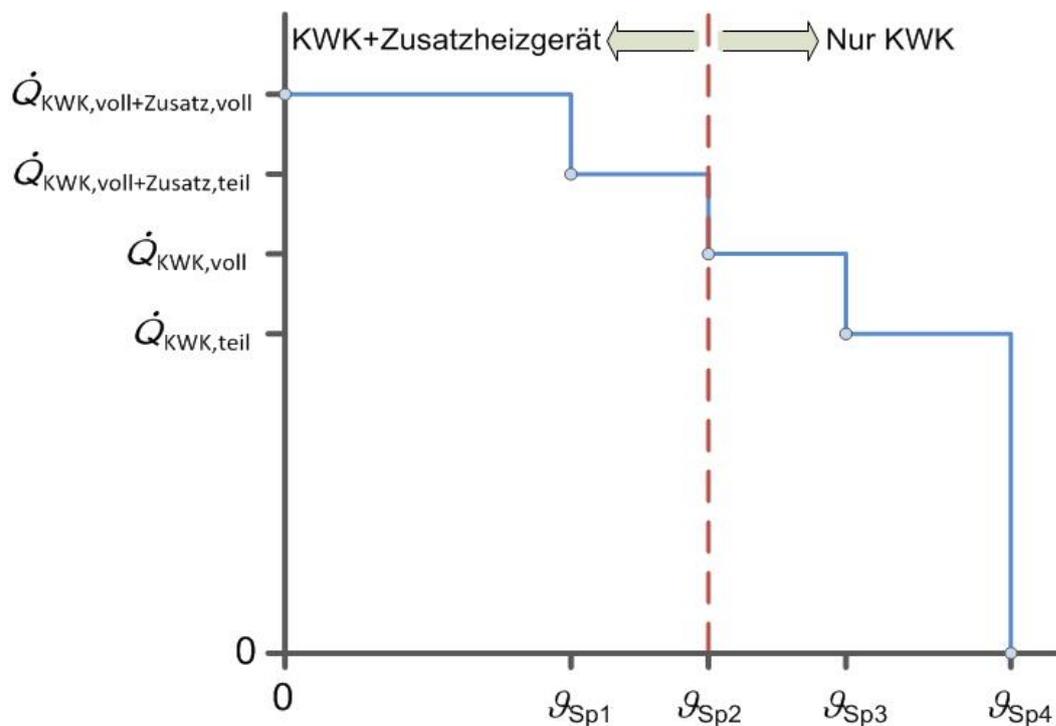
und damit auch die Temperatur des im Speicher vorhandenen Wassers. Die Temperaturänderung des Wassers im Speicher wird mit

$$\Delta \vartheta_{\text{Sp}} = \frac{\Delta Q_{\text{Sp}}}{c_{p,W} m_{W,\text{Sp}}} \quad (7)$$

beschrieben. In der Simulation wird die absolute Speichertemperatur zum Zeitpunkt  $t$  als Summe der Speichertemperatur zum Zeitpunkt  $t-1$  min und der Temperaturänderung im Speicher zwischen den beiden Zeitpunkten ermittelt.

### 2.4.1.4 Regelungsparameter

Neben dem Puffer- bzw. Kombispeicher ist die Regelung eines Mikro-KWK-Systems ein weiterer unerlässlicher Bestandteil, um einen effizienten Betrieb des Systems zu gewährleisten. Je nach System, KWK-Technologie und Hersteller können sich die Regelalgorithmen und Regelstrategien stark voneinander unterscheiden. Die nachfolgend beschriebene und in der hier vorgestellten Simulation genutzte Regelstrategie ist aus diesem Grund möglichst einfach und variabel gehalten. Je nach eingesetztem System kann die Regelungscharakteristik der Hersteller stark von der hier genutzten Charakteristik abweichen. In Abbildung 17 ist die in der Simulation hinterlegte Regelcharakteristik des Systems dargestellt.



**Abbildung 17:** Schematische Darstellung der Regelcharakteristik innerhalb der Simulation

Es ist zu erkennen, dass bei einer Speichertemperatur unter der Temperatur  $\vartheta_{Sp1}$  das Gesamtsystem mit voller Leistung, d.h. sowohl KWK-Einheit als auch Zusatzheizgerät werden in Volllastbetrieb betrieben, den Speicher mit Wärme versorgt. Hat die Speichertemperatur einen Wert von  $\vartheta_{Sp1}$  erreicht, schaltet das Zusatzheizgerät auf den Teillastbetrieb während die KWK-Einheit weiterhin den Volllastbetrieb aufrechterhält. Sobald die Speichertemperatur  $\vartheta_{Sp2}$  erreicht wird,

übernimmt die KWK-Einheit die alleinige Wärmelieferung an den Speicher. Das Zusatzheizgerät wird an diesem Punkt ausgeschaltet. Wird eine KWK-Einheit mit der Möglichkeit der Leistungsmodulation eingesetzt schaltet diese ab der Speichertemperatur von  $\vartheta_{Sp3}$  in den Teillastbetrieb. Bei KWK-Einheiten ohne Leistungsmodulation wird die Anlage im Volllastbetrieb bis zum Erreichen der Temperatur  $\vartheta_{Sp4}$  gefahren.  $\vartheta_{Sp4}$  bezeichnet die maximal mögliche Speichertemperatur. Beim Erreichen dieser Temperatur ist der Speicher vollständig geladen und das Gesamtsystem wird abgeschaltet. Bei unterschreiten der Temperatur  $\vartheta_{Sp4}$  im Speicher würde nach dieser Charakteristik die KWK-Einheit unmittelbar zur Wärmebereitstellung angefordert werden. Dies würde dazu führen, dass die KWK-Einheit für wenige Minuten Wärme liefert um danach für lediglich einen kurzen Moment abgeschaltet wird. Die Konsequenz daraus wären hohe Taktraten und eine damit verbundene geringere Haltbarkeit der KWK-Einheit. Aus diesem Grund wurde eine Einschaltverzögerungszeit vorgesehen, die frei wählbar ist. Je nach Technologie kann diese einige Minuten bis zu mehreren Stunden Sinn machen. Aus der Einschaltverzögerungszeit kann direkt die maximale Taktrate für eine KWK-Einheit pro Jahr errechnet werden. Mit

$$\vartheta_{KWK, \text{ein}} = \vartheta_{Sp4} - \frac{t_{KWK, \text{ein}} \dot{Q}_{KWK, \text{teil}}}{c_{p, W} m_{W, Sp}} \quad (8)$$

wird die Einschalttemperatur in Abhängigkeit der vorher definierten Einschaltverzögerungszeit berechnet. Für den Eignungsvergleich der KWK-Systeme wurden unabhängig von Technologie oder Gebäude die in Tabelle 5 hinterlegten Regelungsparameter eingesetzt.

**Tabelle 5:** In der Simulation verwendete Regelungsparameter

Regelungsparameter			
Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Zahlenwert
Maximale Speichertemperatur	$\vartheta_{Sp4}$	°C	75
Einschaltemperatur KWK	$\vartheta_{KWK, \text{ein}}$	°C	Gleichung (8)
Einschaltemperatur KWK Teillast	$\vartheta_{Sp3}$	°C	Gleichung (8)
Einschaltemperatur Zusatzheizgerät Teillast	$\vartheta_{Sp2}$	°C	55
Einschaltemperatur Zusatzheizgerät Volllast	$\vartheta_{Sp1}$	°C	<55

Die derzeit installierten Mikro-KWK-Anlagen werden in der Regel als wärmegeführte Anlagen betrieben. Einige der Anlagen besitzen zwar Regelalgorithmen zur Optimierung der Stromproduktion, die grundsätzliche Wärmeführung bleibt allerdings weiterhin erhalten. Die nachfolgenden Simulationsergebnisse sind aus diesem Grund für den rein wärmegeführten Betrieb ermittelt worden und stellen den Status quo dar.

## 2.4.2 Simulations-Varianten

Die nachfolgend erläuterten Simulationsergebnisse sollen insbesondere die folgenden allgemeinen Fragen beantworten:

- Wie stellt sich die Abhängigkeit der Laufzeit der KWK-Einheit und des Zusatzheizgerätes zur Größe des Speichers dar?
- Wie stellt sich die Abhängigkeit der Gerätetaktung (Ein- / Ausschaltungen) zur Größe des Speichers dar?
- Wie stellt sich die Effizienz des Gesamtsystems in Abhängigkeit des Speichers dar?
- Wie ändern sich die zuvor genannten Parameter bei steigendem Warmwasserbedarf in Abhängigkeit des Pufferspeichers?
- Gibt es Technologien die für eine Hausgröße (Wärmebedarf) besonders zu bevorzugen sind?
- Wie hoch sind die elektrischen Deckungsgrade in Abhängigkeit von Speicher und KWK-Technologie?
- Welche Potentiale bietet eine Stromoptimierte Betriebsweise?

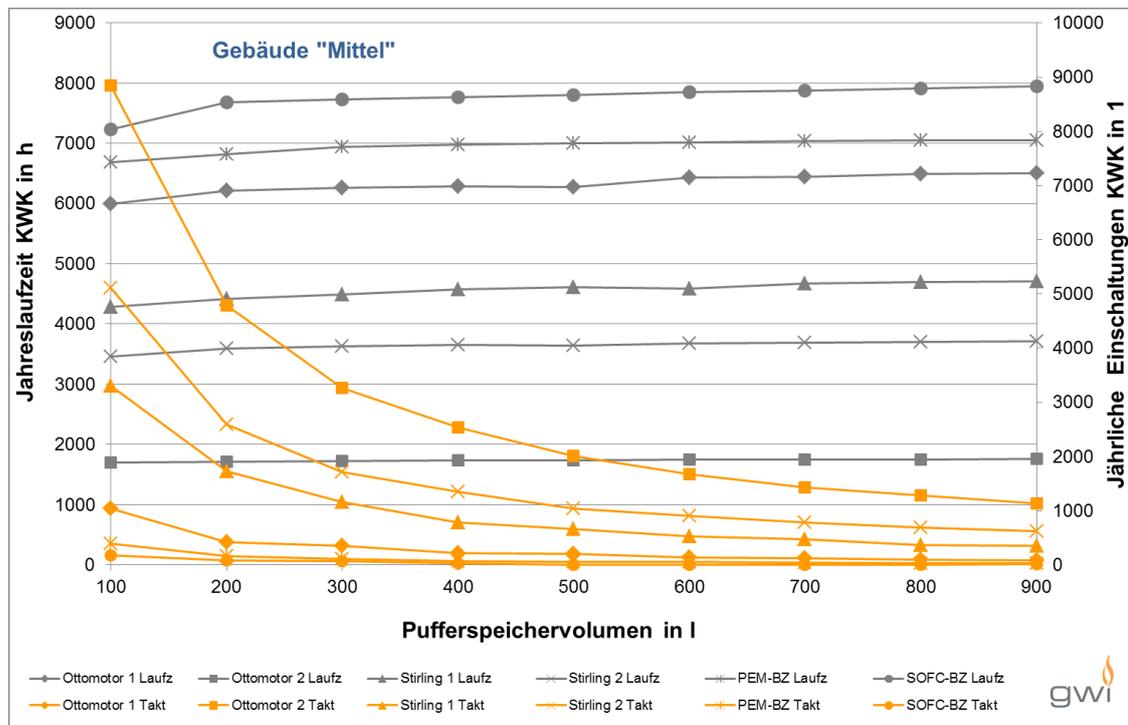
Zur Beantwortung der Fragen wurden Simulationen mit den in Kapitel 2.4.1.2 beschriebenen KWK-Einheiten inklusive Zusatzheizgerät und Kombispeicher für insgesamt drei Gebäudetypen durchgeführt. Die Objekte unterscheiden sich in diesem Fall durch den Jahreswärmebedarf bzw. durch die flächenspezifischen Jahreswärmebedarfe. Die Gebäudedaten sind Tabelle 6 zu entnehmen.

**Tabelle 6:** Gebäudedaten

Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Gebäude		
			Alt	Mittel	Neu
Spez. Heizwärmebedarf	$q_{\text{Heiz,a}}$	kWh/m <sup>2</sup> a	300	200	100
Wohnfläche	$A_{\text{Wohn}}$	m <sup>2</sup>	115	115	115
Personenzahl	$n_{\text{Person}}$	1	3	3	3
Trinkwarmwasserbedarf	$Q_{\text{TWW,a}}$	kWh	2190	2190	2190
Jahresheizwärmebedarf	$Q_{\text{Heiz,a}}$	kWh	34500	23000	11500
Jahreswärmebedarf	$Q_{\text{a}}$	kWh	36690	25190	13690
Jahresstrombedarf	$W_{\text{el,a}}$	kWh	5250	5250	5250
Heizlast	$Q_{\text{Heiz}}$	kW	19,7	13,1	6,6

### 2.4.3 Ergebnisse der Simulation

Die folgende Darstellung beinhaltet die jährlichen Laufzeiten und die jährlichen Taktungen der KWK-Module in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens.

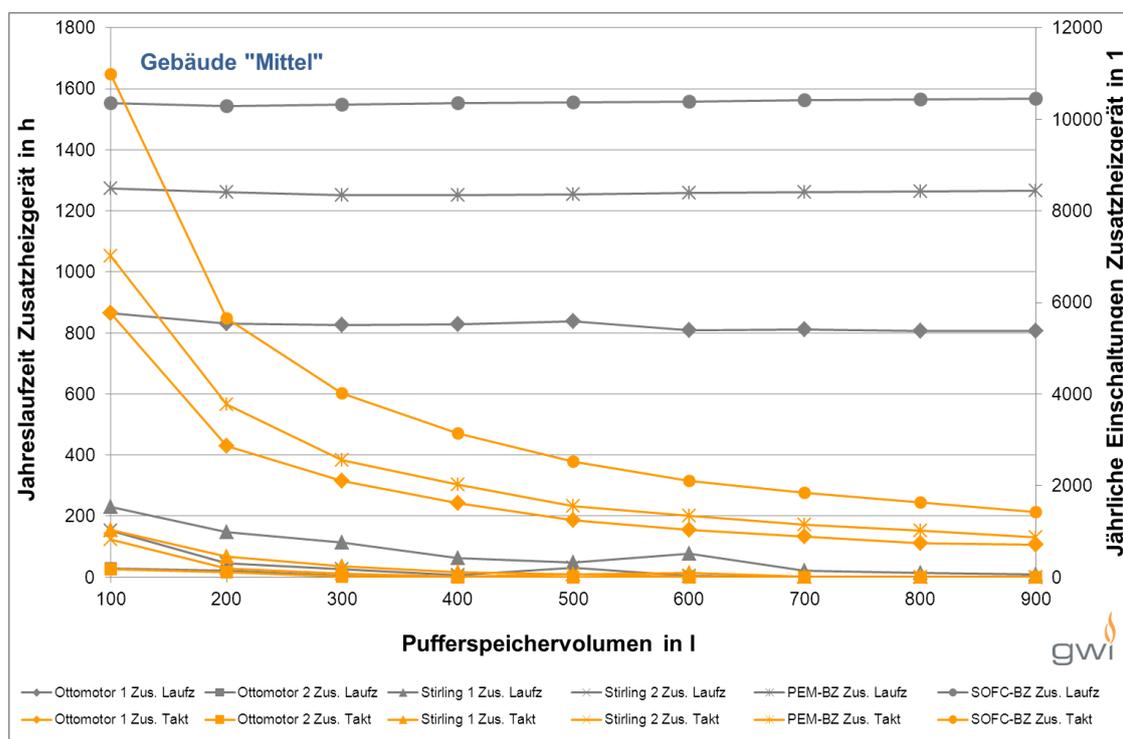


**Abbildung 18:** Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“

Die jährliche Laufzeit des KWK-Moduls ist nahezu konstant und wird nur geringfügig von der Größe des Pufferspeichervolumens beeinflusst. Die geringfügige Erhöhung der Vollbenutzungsstunden lässt sich auf die, mit steigender Speichergröße steigenden Wärmedurchgangsverlusten des Speichers zurückführen. Diese These wird auch dadurch gestützt, dass die aufgezeigte Laufzeitsteigerung nahezu proportional zur thermischen Leistung des KWK-Moduls ist. Dies resultiert daraus, dass der Ausgleichsbedarf zur Deckung der Speicher- verluste unabhängig vom KWK-System ist und somit die additive Laufzeit direkt von der thermischen Leistung des KWK-Moduls abhängig ist.

Die Einflüsse von dynamischen An- und Abfahrvorgänge werden im Rahmen dieser Simulation nicht berücksichtigt. Diese würden die jährlichen Laufzeiten der Anlagen maßgeblich beeinflussen, da ein häufiges Takten immer mit suboptimalen An- und Abfahrvorgängen verbunden ist.

Die Reduzierung der Taktungen der Mikro-KWK-Module mit zunehmender Speichergröße können näherungsweise durch einen Verlauf einer Abklingfunktion beschrieben werden. Bei steigender Pufferspeichergöße nähern sich die Anlagentaktungen einem Minimalwert an. Für einen theoretisch unendlich großen Speicher folgt die geringste Taktfrequenz. Die steigenden Verluste bei größeren Speichern und der damit korrelierende steigende Gesamtwärmebedarf beeinflussen diese theoretische Annahme insofern, dass der relative Einfluss der Speicherverluste bei großen Volumina zunimmt.



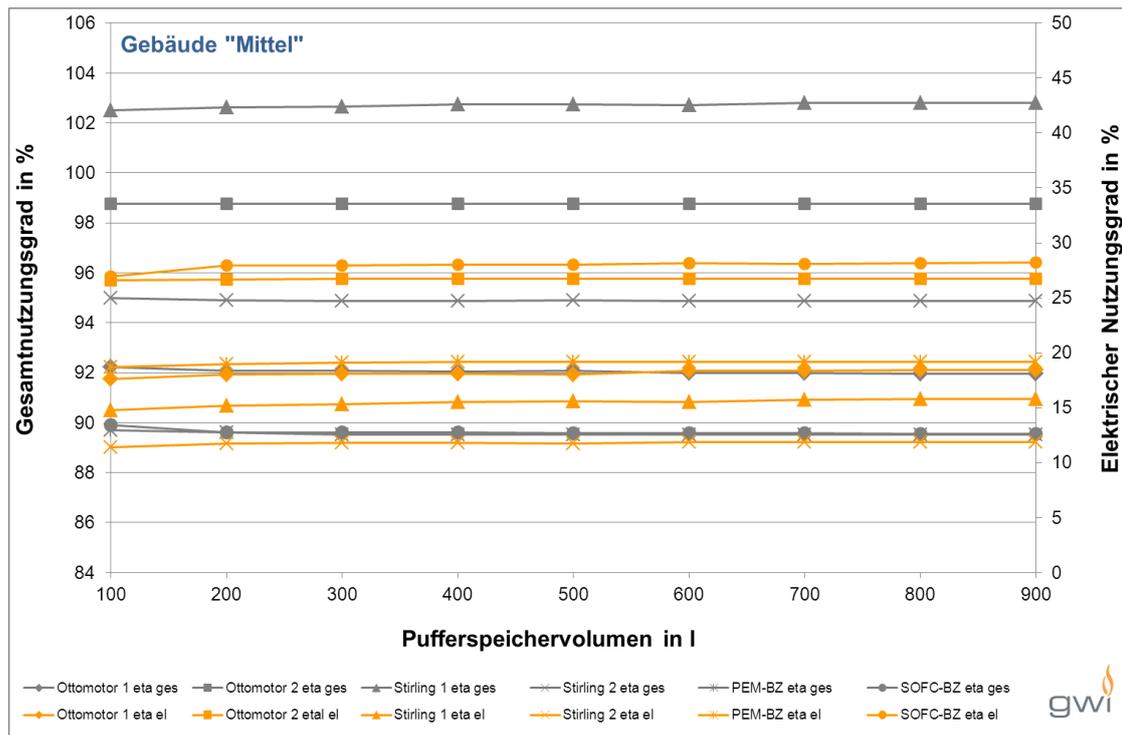
**Abbildung 19:** Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen des Zusatzheizgerätes im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“

Nahezu analog zu den jährlichen Laufzeiten des KWK-Moduls verhalten sich die jährlichen Laufzeitänderungen des Zusatzheizgerätes. Die Beeinflussung des Laufzeitverlaufes ist aufgrund der Simulationsvorgaben primär von den Speicherverlusten abhängig. Die Variation der Taktungen zeigt wiederum den Verlauf einer Abklingfunktion.

Die geringfügigen Schwingungen der Jahreslaufzeiten sowohl der KWK-Module als auch der Zusatzheizgerätes sind durch die Einflüsse der Gleichzeitigkeit der Anforderungen begründet. Eine Optimierung wäre durch den Einsatz eines

intelligenten Bedarfssteuerungssysteme möglich und stellt somit weiteren Forschungsbedarf dar.

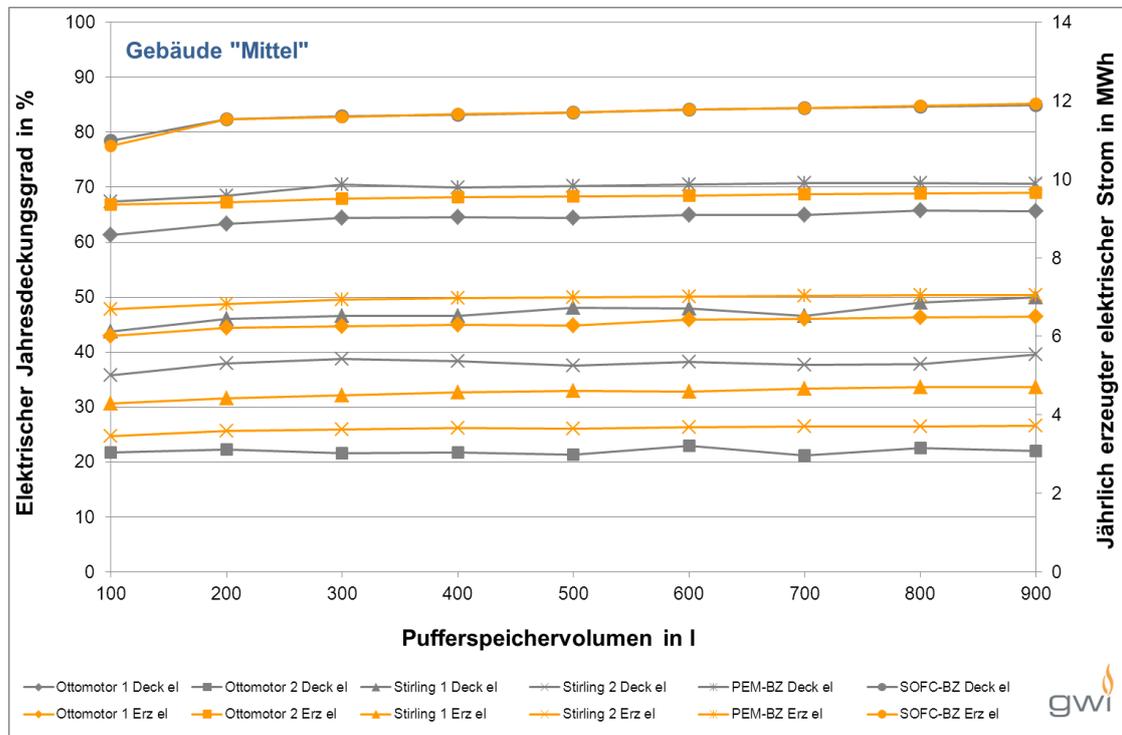
In der folgenden Darstellung sind die Gesamtnutzungsgrade sowie die elektrischen Nutzungsgrade der Anlagen in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens aufgetragen.



**Abbildung 20:** Elektrischer- und Gesamtnutzungsgrad der Systeme in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“

Es ist deutlich zu sehen, dass sich weder der Gesamtnutzungsgrad noch der elektrische Nutzungsgrad durch die Variation des Pufferspeichervolumens verändert. Dies ist wieder in den angenommenen Rahmenbedingungen der Simulation begründet. Da keine dynamischen Lastpunkte angenommen wurden, liefert das KWK-Modul sowie der Spitzenlastkessel stetig dieselben Nutzungsgrade, die sich durch eine genauere Betrachtung von An- und Abfahrvorgängen deutlich ändern würden. Die kleinen Änderungen in der Abbildung 20 resultieren aus dem thermischen Leistungsverhältnis des KWK-Modul zum Zusatzheizgerät. Da der Nutzungsgrad über die Bilanzhülle des Systems (KWK-Modul und Zusatzheizgerät) gebildet wird und sich die einzelnen Bauteillaufzeiten nur marginal ändern, ergibt sich nur eine unwesentliche Änderung der Nutzungsgrade in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens.

Die Deckungsgrade und die jährlich bereitgestellte elektrische Arbeit der unterschiedlichen KWK-Systeme sind in Abbildung 21 gegenüber dem Pufferspeichervolumen dargestellt.

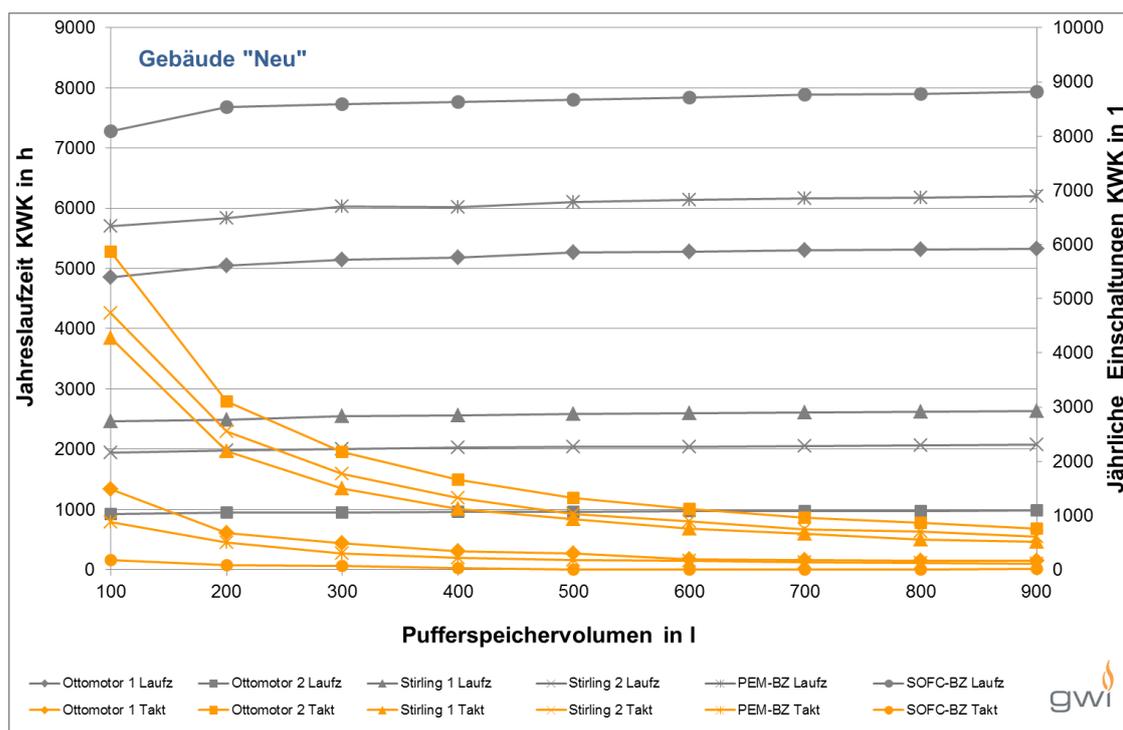


**Abbildung 21:** Elektrischer Jahresdeckungsgrad und jährlich erzeugter elektrischer Strom der Systeme in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Mittel“

Die jährlich vom KWK-System abgegebene elektrische Arbeit ist proportional zur Laufzeit des KWK-Moduls, da keine dynamischen An- und Abfahrvorgänge betrachtet werden. Der elektrische Deckungsgrad kann in dieser Simulation als nahezu unabhängig vom Speichervolumen angesehen werden, da es sich um eine Simulation für wärmegeführte und nicht für stromgeführte oder intelligente Systeme handelt. Der Deckungsgrad beschreibt somit die Gleichzeitigkeit der Strombereitstellung, also jene Zeiträume in denen die Anlage Strom bereitstellt und dieser zeitgleich benötigt wird. Eben diese zufällige Gleichzeitigkeit könnte durch eine intelligente Steuerung des Systems in Richtung erhöhter elektrischer Deckungsgrade optimiert werden. Beim Ottomotor 2 fällt auf, dass die bereitgestellte elektrische Arbeit verhältnismäßig hoch ist, dies jedoch mit sehr geringen elektrischen Deckungsgraden korreliert. Dieses Verhalten kann durch das Verhältnis von thermischer Leistung des KWK-Moduls zum thermischen Bedarf des Objekts erklärt werden. Ein System mit hoher thermischer Leistung

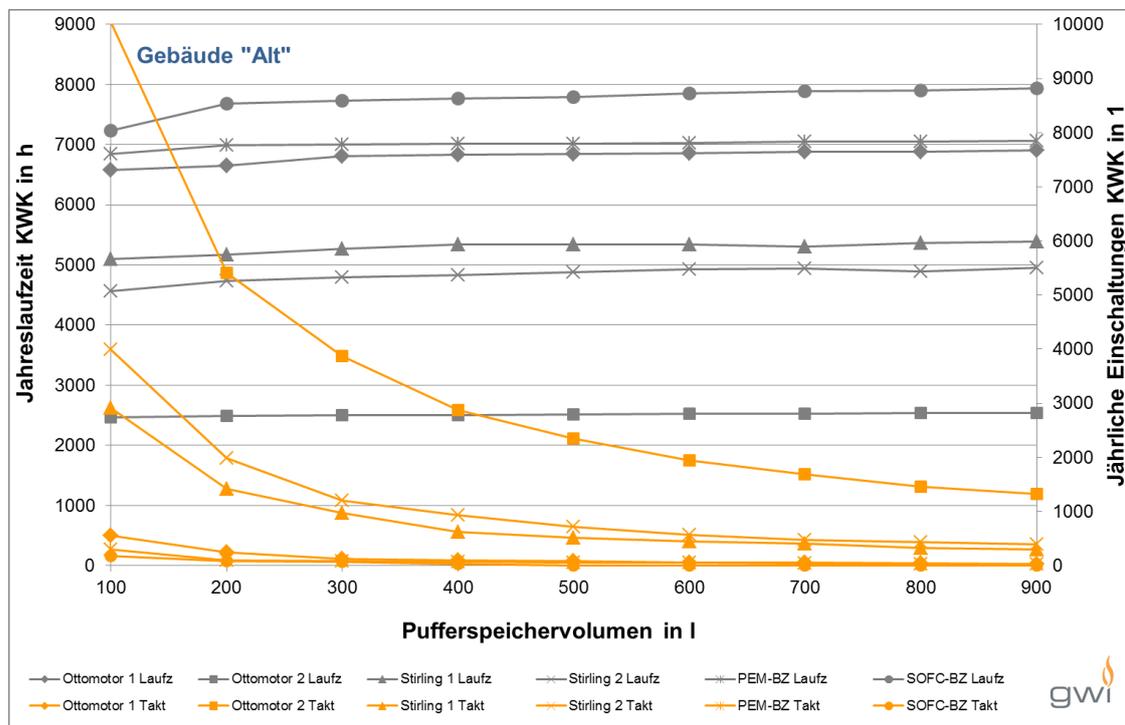
produziert bei thermischer Anforderung in sehr kurzer Zeit verhältnismäßig viel Wärme und Strom. Da im Durchschnitt jedoch eine relativ geringe elektrische Leistung angefordert wird, kann nur ein sehr geringer Teil der bereitgestellten elektrischen Energie genutzt werden. Daraus folgt, dass eine optimale Dimensionierung zur vereinfachten Optimierung des Stromeigennutzungsanteils herangezogen werden kann. Die Schwankungen innerhalb der Verläufe resultieren aus den Änderungen der Laufzeitintervalle durch die Reduzierung der Taktungen. Eine positive oder negative Beeinflussung ist jedoch im Wesentlichen den Auswirkungen der Gleichzeitigkeit geschuldet.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Gebäude können die Einflüsse des Wärmebedarfs in erster Näherung ermittelt werden. Das folgende Diagramm zeigt die Jahreslaufzeiten und die jährlichen Taktungen der Systeme in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für ein Referenzgebäude mit einem relativ geringen Wärmebedarf.



**Abbildung 22:** Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Neu“

In Abbildung 23 sind die jährlichen Laufzeiten und die jährlichen Taktungen der Systeme über die Pufferspeichergröße für ein energetisch relativ altes Gebäude aufgetragen.



**Abbildung 23:** Jährliche Laufzeit und jährliche Einschaltungen der KWK-Einheit im System in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens für das Gebäude „Alt“

Die Variation des Wärmebedarfs zeigt, dass sich die KWK-Modul-Laufzeiten je nach Anlage unterschiedlich verändern. Der Bedarf in allen simulierten Gebäuden reicht aus, um die Festoxid-Brennstoffzelle nahezu durchgehend zu betreiben. Besonders deutlich wird der Einfluss auf den Betrieb des Stirling 2. Zwischen dem neuen Objekt mit einer simulierten Laufzeit von rund 2.000 Stunden pro Jahr und dem alten Objekt mit rund 4.500 Stunden pro Jahr folgt eine Laufzeitdifferenz von knapp 2.500 Stunden pro Jahr. Ein im Vergleich zur thermischen Leistung eines KWK-Moduls hoher Bedarf korreliert im Allgemeinen mit einer langen bis hin zu einem durchgehenden Betrieb des KWK-Systems.

Die jährliche Anzahl der Taktungen eines KWK-Systems reduziert sich bei steigendem Wärmebedarf deutlich. Dies lässt sich durch die erhöhte Laufzeit der Systeme erklären, da die gepufferten Anforderungen immer kontinuierlicher für die KWK-Anlage bestehen.

#### **2.4.4 Wesentliche Erkenntnisse**

Die Simulation zeigt, trotz der vereinfachten Annahmen vor allem in Bezug auf die An- und Abfahrvorgänge, dass eine Optimierung der Dimensionierung von KWK-Systemen notwendig ist. Es konnten erste Erkenntnisse über die deutlichen Einflüsse des Pufferspeichers auf die Taktungen von KWK-Systemen geschaffen werden, die im Rahmen von tiefergehenden Forschungsvorhaben genauer untersucht werden sollten. Diese Ergebnisse können auf sämtliche häusliche Heizsysteme übertragen werden, da lediglich die thermischen Eigenschaften betrachtet werden. Die Relevanz des Verhältnisses von thermischer Leistung des KWK-Systems zum Pufferspeichervolumen und die Bedeutung des relativen Anteils der thermischen Leistung des KWK-Systems an der Heizlast eines Gebäudes konnten durch die graphischen Darstellungen der Simulationsergebnisse verdeutlicht werden.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte auf Grundlage der Darstellungen eines energetisch gesehen mittleren Gebäudes. Die Diagramme sowohl des neuen, als auch des alten Gebäudeäquivalent befinden sich im Anhang.

Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes scheint es daher sinnvoll, den Einfluss der An- und Abfahrvorgänge detaillierter zu analysieren. Die Analyse, der Auswirkungen dieser dynamischen Komponente auf die Simulation vor dem Hintergrund der Optimierung des Verhältnisses von thermischer Leistung des KWK-Systems zum Pufferspeicher und zusätzlich in Kombination mit einer intelligenteren Anlagenregelung, könnte weitere wesentliche Erkenntnisse über potenzielle Einsatzmöglichkeiten für den Einsatz von thermischen Energiesystemen hervorbringen. (siehe Forschungsbedarf Kapitel 6)

## 2.5 Kombination von KWK und GWP/EWP im Neubau

Die Kombination von gekoppelten, dezentralen Systemen mit Wärmepumpen kann zu einer Steigerung der energetischen Effizienz gegenüber den Einzelmaßnahmen führen. Im Fokus liegt die überschlägige Bestimmung der zu erreichenden primärenergetischen Effizienz von kombinierten Systemen in Abhängigkeit unterschiedlicher Wärmepumpentechnologien.

Die Potenzialdarstellung von KWK-Systemen im Neubau, in Kombination mit unterschiedlichen nicht gekoppelten Bereitstellungen, beruht auf einer jahresbilanziellen Betrachtung. In Bezug auf [DVGW11] wird das Referenzobjekt durch eine Wohnungsbelegung von drei Personen, eine Wohnfläche von 115 m<sup>2</sup> sowie einem daraus resultierenden Strombedarf von 5.250 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und Wärmebedarf von 7.365 kWh/(m<sup>2</sup>·a) definiert. Aufgrund der bilanziellen Betrachtung ist die Unterteilung in Heiz- und Warmwasserbedarfe nicht notwendig, da eine über das Jahr konstant benötigte Wärmeleistung zu Grunde gelegt wird. Im Rahmen dieser Betrachtung werden die Primärenergiefaktoren für Strom mit  $f_{PE,S} = 2,6$  und für Erdgas mit  $f_{PE,EG} = 1,1$  in Anlehnung an [DIN V 4701-10] angenommen.

Bei den betrachteten Systemen zur reinen Wärmebereitstellung wird ein konstanter Energieausnutzungsgrad unterstellt. Der thermische Wirkungsgrad des Brennwertsystems liegt bei 98 %, der COP<sup>4</sup> der Elektrowärmepumpe liegt bei 4,0 und die Jahresheizzahl der Gaswärmepumpe liegt bei 150 %.

Es werden weiterhin drei unterschiedliche KWK-System-Technologien betrachtet. Da es sich um eine Bilanzierung eines Neubaus handelt, werden Systeme mit relativ niedrigen thermischen Leistungen betrachtet. Zum einen wird ein Ottomotor mit einer thermischen Leistung von 2,5 kW, einem thermischen Wirkungsgrad von 64 % und einer elektrischen Leistung von 1,0 kW zu Grunde gelegt. Neben der mittlerweile etablierten Technologie der motorischen Verbrennung von Erdgas repräsentieren die beiden anderen Systeme unterschiedliche Brennstoffzellen. Betrachtet wird eine Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle mit einer thermischen Leistung von 1,7 kW, einem thermischen Wirkungsgrad von 53 % und einer elektrischen Leistung von 1,0 kW sowie eine Hochtemperatur-Festoxid-Brennstoffzelle mit einer thermischen Leistung von 0,5 kW, einem thermischen

---

<sup>4</sup> COP (engl.) = coefficient of performance

Wirkungsgrad von 25 % und, aufgrund der Stromkennzahl von  $\sigma = 3,0$ , einer elektrischen Leistung von 1,5 kW.

Die graphische Auftragung der Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 24, zeigt die Gesamt-Jahresprimärenergiebedarfe des betrachteten Objektes in Abhängigkeit der Laufzeit der eingesetzten KWK-Systeme auf.

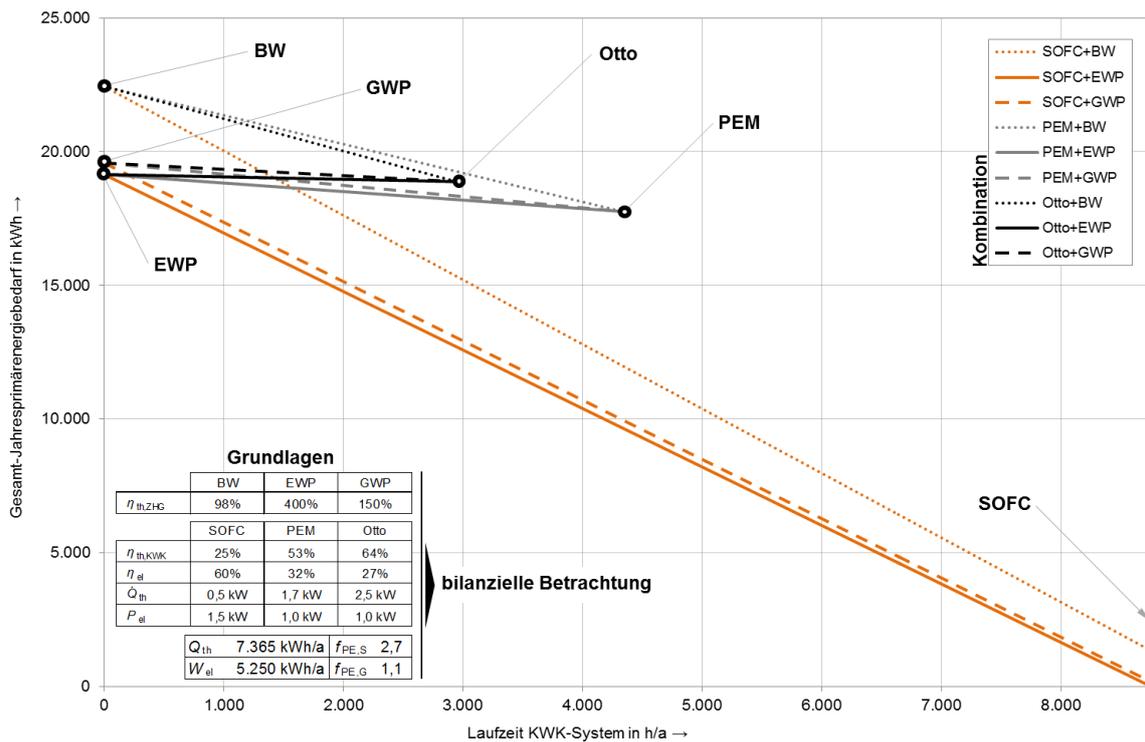


Abbildung 24: Kombination von KWK und EWP/GWP

### 2.5.1.1 Einsatz von BW, GWP und EWP

Der theoretische monovalente Einsatz der nicht gekoppelten Systeme (BW, EWP, GWP), wird durch eine angesetzte Laufzeit des KWK-Systems von 0 Stunden im Jahr repräsentiert. Der Primärenergiebedarf beim Vergleich der drei Systeme ist beim Einsatz eines Brennwertkessels am höchsten. Dieser Primärenergiebedarf wird als Referenzgröße für weitere Vergleiche herangezogen. Sowohl der Einsatz von Gas- als auch von Elektrowärmepumpen korrelieren mit niedrigeren Gesamt-Jahresprimärenergiebedarfen. Diese Aussagen treffen für bilanzielle über das Jahr und somit konstant angenommene Energieausnutzungsgrade der Einzelsysteme zu, die in der Praxis aufgrund von äußeren Einflüssen in der Regel nicht erreicht werden können.

### **2.5.1.2 Einsatz von KWK-Technologie**

Im Gegensatz zum Einsatz von BW, GWP und EWP lässt sich der theoretisch monovalente Betrieb der betrachteten KWK-Systeme nicht durch eine fixe Jahreslaufzeit darstellen, da diese abhängig von der thermischen Leistung des KWK-Systems sind. In dieser bilanziellen Bewertung stellen die betrachteten gekoppelten Technologien in theoretisch monovalenter Betriebsweise die sinnvollste Betriebsvariante dar, sofern dies bedarfsdeckend möglich ist.

Der Ottomotor mit der größten thermischen Leistung der drei betrachteten KWK-Systemtechnologien kann lediglich eine maximale Laufzeit in Höhe von rund 3.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr erreichen, wohingegen die PEM-Brennstoffzelle – aufgrund der relativ niedrigeren thermischen Leistung – eine maximale Laufzeit von knapp 4.400 Vollbenutzungsstunden pro Jahr erreichen könnte. Bedingt durch die wesentlich geringere thermische Leistung der Festoxid-Brennstoffzelle ist ein theoretisch-monovalenter Betrieb nicht darstellbar, da bei einer Laufzeit von 8.760 Stunden im Jahr der benötigte Wärmebedarf nicht durch die gekoppelte Technologie bereitgestellt werden kann. Hier ist ein bivalenter Betrieb nicht nur sinnvoll, sondern zwingend erforderlich.

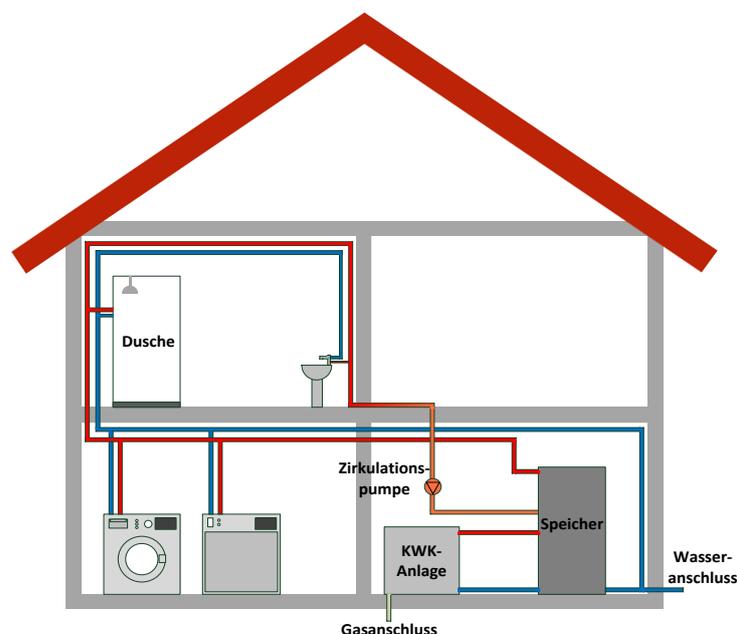
### **2.5.1.3 Kombination beider Technologie-Varianten**

Bei der anteiligen Kombination der nicht gekoppelten mit den gekoppelten Systemen wird eine Überschneidung der Ergebnisse der beiden theoretisch monovalenten Einsatzvarianten deutlich. Aus primärenergetischer Sicht ist ein maximaler Anteil der KWK-Technologien in Kombination mit einer Elektro- oder einer Gaswärmepumpe am sinnvollsten. In der Praxis ist ein monovalenter Betrieb von KWK-Systemen aufgrund der Einflüsse von beispielsweise nutzerabhängigen Bedarfskennlinien (z. B. Spitzenlasten) nicht sinnvoll, sodass ein bivalenter Einsatz empfohlen wird. Da es sich im Rahmen dieser Arbeit um eine bilanzielle und nicht um eine detailliert simulierte Betrachtung handelt, sollte angesichts des primärenergetischen Optimums der Kombination von gekoppelter Technologie und Elektrowärmepumpe und der anzustrebenden Maximierung des Stromeigen-nutzungsbedarfs (siehe Kapitel 3) eine tiefergehende Betrachtung dieser Systeme im Rahmen möglicher zukünftiger Forschungsvorhaben erfolgen.

## 2.6 Abwärmenutzungskonzepte im Neubau

Die stetig steigenden energetischen Anforderungen an Wohngebäude reduzieren potenzielle Wärmebedarfe, die wiederum für einen ganzheitlich sinnvollen Einsatz von hocheffizienten KWK-Systemen erforderlich sind. Eine mögliche Wärmesenke wird in der Substitution von elektrischen Anwendungen durch thermische Bereitstellung vermutet. Die Nutzung der Abwärme eines gekoppelten Systems im Neubau wird hinsichtlich einer möglichen Laufzeitverlängerung für eine Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) untersucht. Das betrachtete Objekt zeichnet sich durch eine optimale Dämmung in Kombination mit einer Wärmerückgewinnung aus, sodass nur noch ein marginaler (in erster Näherung vernachlässigbarer) Heizwärmebedarf vorliegt.

Das Ziel der Erschließung neuer Abwärmenutzungskonzepte ist die Erreichung eines im Optimum monovalenten und kontinuierlich durchlaufenden Betriebs einer Festoxid-Brennstoffzelle. Der nicht benötigte Anteil der thermischen Energie der Brennstoffzelle kann theoretisch über dessen Abgas abgeführt werden, wobei hier zu beachten ist, dass die Brennstoffzelle in diesem Betriebszustand nicht mehr als KWK-System gilt und die Förderung für diese Zeiträume entfallen würde. Die Minimierung eben jenes nicht genutzten thermischen Anteils soll durch Bereitstellung von neuen Wärmesenken, durch die Substitution von elektrisch bereitgestellten thermischen Prozessenergien, geschaffen werden.



**Abbildung 25:** Beispielhafte schematische Darstellung zur Substitution von Stromanwendungen durch Abwärmenutzung

## 2.6.1 Waschmaschine

Als Vergleichsobjekt wird eine Waschmaschine der Geräteklasse A+++ und einer maximalen Beladung von 7 kg eines großen Herstellers für Elektrogeräte verwendet. Die unterschiedlichen Waschprogramme werden auf drei aussagekräftige Referenzprogramme, die sich primär durch die Waschtemperatur unterscheiden (90 °C, 60 °C und 40 °C) zusammengefasst. Bei Waschprogrammen mit einer Waschtemperatur von 90 °C kann nur eine anteilige Energiemenge durch Warmwasser substituiert werden, da das Warmwasser nicht mit 90 °C in die Maschine eingeleitet wird. In diesen Fällen wird der Heizstab der Waschmaschine zur weiteren Erhöhung der Wassertemperatur genutzt.

In Bezug auf [Öko09] und [SÖFW05] wird eine mittlere Verteilung der Programmnutzung zu Grunde gelegt. Hierbei entfallen 8 % der Wäschen auf ein Waschprogramm mit einer Temperatur von 90 °C, 33 % der Wäschen auf eine Waschtemperatur von 60 °C und die restlichen 59 % der Wäschen auf einem Temperaturniveau von 40 °C. In Anlehnung an [Öko04] wird eine durchschnittliche Anzahl von Waschvorgängen in Höhe von 177 Waschvorgängen pro Jahr bei einem Haushalt von drei Personen angenommen.

Durch die Nutzung einer Waschmaschine mit Warmwassernutzung lässt sich ein elektrischer Bedarf von rund 107 kWh/a durch eine äquivalente Warmwasserenergiezufuhr substituieren. Durch den Einsatz dieser Technologie kann eine Laufzeitverlängerung der Festoxid-Brennstoffzelle von rund 214 Stunden pro Jahr erzielt werden.

## 2.6.2 Spülmaschine

Zusätzlich kann eine weitere Wärmesenke durch den Einsatz einer Spülmaschine mit Warmwassernutzung geschaffen werden. Analog zur Waschmaschine wird eine Spülmaschine mit einer Geräteklasse A+++ desselben Herstellers als Referenzobjekt zu Grunde gelegt. Eine Wertung der unterschiedlichen Spülprogramme ist nicht fundiert möglich, sodass wiederum für drei repräsentative Programme (65 °C, 50 °C und 45 °C) eine arithmetisch mittlere Verteilung angenommen wird. In Anlehnung an [TEST08], [Fab07] und [Öko06] werden für das Referenzszenario 232 Spülvorgänge pro Jahr zu Grunde gelegt.

Durch den Einsatz einer Geschirrspülmaschine mit Warmwassernutzung entsteht ein thermisches Abnahmepotenzial von rund 77 kWh/a durch die anteilige Substitution der elektrischen Energie zur Wassertemperierung. Die resultierende

Laufzeitverlängerung der Festoxid-Brennstoffzelle liegt bei rund 154 Stunden pro Jahr.

### 2.6.3 Einsatz im Neubau

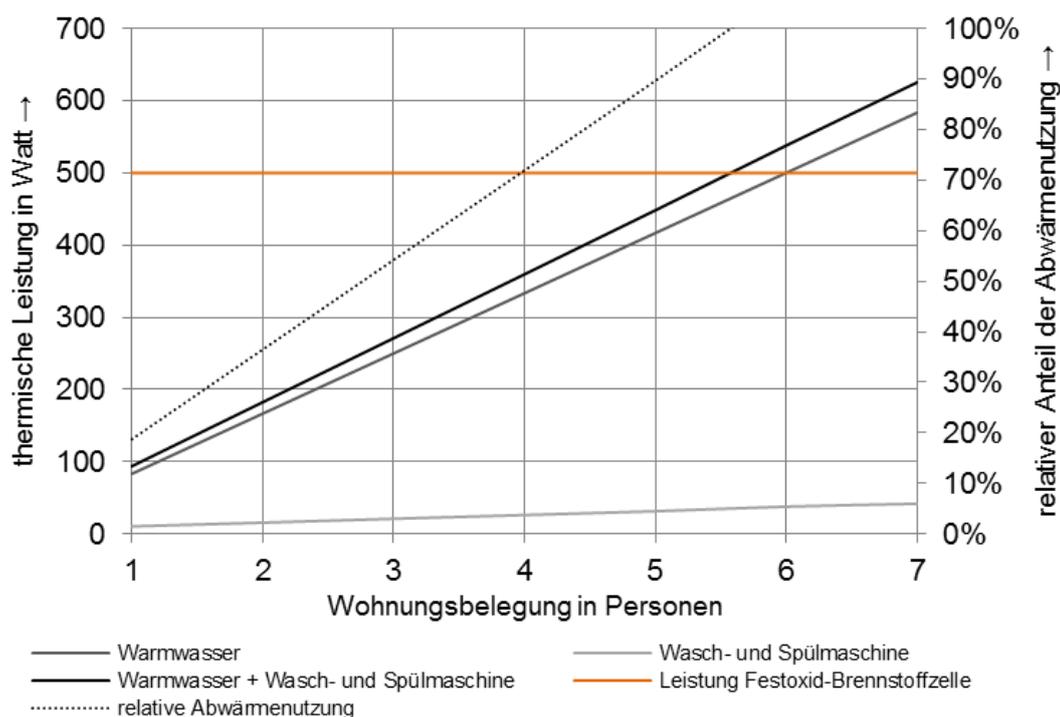
Die thermischen Bedarfe des Neubaus entfallen in dieser extremen Betrachtung nur auf die Bereitstellung von Warmwasser. In Anlehnung an [Ihl00] wird ein spezifischer Warmwasserbedarf von 2 kWh/(Pers·d) zu Grunde gelegt. Das betrachtete Referenzszenario basiert auf einer Wohnungsbelegung von drei Personen und zeigt somit einen thermischen Bedarf von 2.190 kWh/a auf. Durch den Einsatz eines Pufferspeichers wird der thermische Bedarf über den Tag als quasi konstant angesehen. Die benötigte mittlere thermische Leistung liegt folglich bei rund 250 W und entspricht der Hälfte der thermischen Leistung der angenommenen Brennstoffzelle im optimalen Betriebspunkt von 500 W.

Die potenziellen Wärmesenken durch Wasch- und Spülmaschinen mit Warmwassernutzung werden analog zu den Warmwasserbedarfen als konstant angesehen. Dies resultiert aus der Annahme, dass bei einer intelligenten Verschaltung der Einzelsysteme mit einem Pufferspeicher eine Bedarfssteuerung so realisiert werden kann, dass die Spül- und Waschvorgänge in jene Zeiträume fallen, in denen keine weiteren thermischen Bedarfe vorliegen. Das summierte jährliche Wärmeabnahmepotenzial von 184 kWh/a entspricht einer mittleren Leistung von rund 21 W. Die konstant benötigte Wärmeleistung des Objekts läge infolge dessen bei rund 271 W und entspricht rund 54 % der thermisch bereitgestellten Energie der Festoxid-Brennstoffzelle. Die resultierende Laufzeitverlängerung liegt bei knapp 368 Stunden und entspricht einer relativen Steigerung um rund 8 %.

Sowohl ökologisch als auch primärenergetisch kann bei einem angenommenen elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von 60 % eine deutliche Einsparung im Vergleich zu einer konventionellen Energiebereitstellung mit einem NT-Kessel ( $\eta_{th} = 90 \%$ ) realisiert werden. Bei einem Haushalt mit drei Personen könnten durch den Einsatz der Festoxid-Brennstoffzelle zur Warmwasserbereitstellung (ohne Wasch- und Spülmaschinenbedarfe) jährlich rund 10.300 kWh<sub>PE</sub> bzw. 2.500 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden. Durch die Substitution der elektrischen Wärmebereitstellungsbedarfe können weiterhin jährlich rund 900 kWh<sub>PE</sub> bzw. 200 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden. Diese zusätzliche Einsparung ist eine relativ geringe Erhöhung des ökologischen und primärenergetischen Einsparpotenzials.

## 2.6.4 Einfluss der Wohnungsbelegung

Eine vereinfachte und somit nur überschlägige Darstellung einer Sensitivität erfolgt in Abhängigkeit der Wohnungsbelegung. Es wird angenommen, dass sich die spezifische Verteilung der Wasch- bzw. Spülprogramme nicht ändert und dass sich die Bedarfe (Anzahl der Wasch- bzw. Spülvorgänge) linear zur Wohnungsbelegung verhalten.



**Abbildung 26:** Auswirkungen der Wohnungsbelegung auf den Warmwasserbedarf

Es ist ersichtlich, dass eine höhere Wohnungsbelegung mit einem höheren substituierbaren Warmwasserbedarf korreliert. Da die durchschnittliche deutsche Wohnungsbelegung historisch gesehen sinkt, könnte eine höhere Wohnungsbelegung durch einen hydraulischen Zusammenschluss von mehreren Wohnungen erzielt werden um somit eine höhere Anlagenausnutzung zu erreichen. Ein maßgeblicher und somit besonders deutlicher Einfluss der Substitution von thermischen Prozessbedarfen ist jedoch nicht zu erkennen.

### **2.6.5 Fazit zur Substitution von Warmwasserbedarfen**

Der Aufwand für die Installation von Warmwassergeräten als Wärmesenke zur Optimierung der Auslastung einer Brennstoffzelle kann als nur bedingt sinnvoll bezeichnet werden.

Für einen ökologisch sinnvollen Betrieb sollten die Warmwassergeräte an eine Zirkulationsleitung mit einer möglichst kurzen Stichleitung angeschlossen werden um unnötige Kaltwasservolumina der Zuleitungen zu minimieren. Da vor allem bei den Waschmaschinen nicht bei jedem Teilwaschgang eines Waschzyklus warmes Wasser benötigt wird, müssen jedoch sowohl ein Warm- als auch ein Kaltwasseranschluss vorhanden sein. Durch eine intelligente Verschaltung der Teilsysteme mit einem thermischen Speicher kann eine Laufzeitverlängerung der Festoxid-Brennstoffzelle in einem Neubau realisiert werden.

## **3 Korrelation von Dämmung und Mikro-KWK-Anlagen im Bestand**

Bei der energetischen Modernisierung von Gebäuden fällt immer wieder die Frage, ob entweder eine Sanierung der Gebäudehülle sowohl durch den Einsatz von Dämmmaßnahmen als auch durch den Austausch von Fenstern oder die Einbindung einer modernen, hocheffizienten KWK-Technologie sinnvoller in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Ökologie wäre. Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der Energiekosten und zur Reduzierung der wohngebäudebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen könnte durch die Kombination beider Maßnahmen unter der Prämisse der Nutzung von möglichen Synergien realisiert werden.

Das Ziel ist es daher, die Potenziale der Einzelmaßnahmen und deren korrelierenden Kombinationen möglichst allgemeingültig aufzuzeigen. Hierbei werden sowohl die wirtschaftlichen als auch die ökologischen und primär-energetischen Auswirkungen untersucht und bewertet. Im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung des Mikro-KWK-Potenzials im Wohngebäudebestand werden die Einsparpotenziale primär für die derzeitige Ausgangssituation dargestellt. Des Weiteren werden in der Sensitivitätsanalyse jedoch auch Simulationen für mögliche Zukunftsszenarien durch die Variation von Einflussparametern durchgeführt.

### **3.1 Methodischer Ansatz**

Die energetische Modernisierung der Gebäudehülle beruht auf der gleichwertigen Dämmung der obersten Geschossdecke, der Kellerdecke sowie der Außenwand und dem Austausch von Fensterelementen, da eine allgemeine fundierte Priorisierung der Einzelmaßnahmen nicht möglich ist. Für die Berechnung des Mikro-KWK-Potenzials unter der Maxime der bestmöglichen Allgemeingültigkeit werden KWK-Systeme durch spezifische Einflussparameter definiert und berechnet.

Für die Bewertung der unterschiedlichen Technologien wird im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung, durch den Vergleich der finanziellen Belastung der theoretischen, energetischen Modernisierung mit einer alternativen Verzinsung, eine allgemeingültige Basis zugrunde gelegt. Die abgeleiteten Erkenntnisse der Analysen der allgemeinen Darstellungen von verschiedenen KWK-Technologien

sowohl als Einzelbetrachtung als auch in Kombination mit Dämmmaßnahmen werden aufgeführt und erläutert.

### 3.1.1 Betrachtungsweisen

Ein wesentlicher Kernpunkt der Korrelation von Dämmung und Mikro-KWK-Anlagen im Wohngebäudebestand ist der Vergleich der unterschiedlichen Systemkombinationen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf verschiedene Betrachtungsweisen, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### 3.1.1.1 Primärenergetische Betrachtung

Energie wird in Abhängigkeit des Umwandlungsprozesses in verschiedene Arten von Energieformen unterteilt. Als Primärenergie wird jener Energieinhalt von Energieträgern bezeichnet, der als natürliche und technisch noch nicht umgewandelte Energieform – regenerative, fossile und nukleare Energieträger – vorhanden ist. Durch Umwandlungsprozesse kann diese Energieform in Sekundär-, End- und schließlich in Nutzenergie überführt werden.

Ein sogenannter Primärenergiefaktor  $f_{PE}$  beschreibt das Verhältnis von eingesetzter Primärenergie  $Q_{PE}$  zu erhaltenen Energieform. Begründet durch den stetigen Wandel des Energiemarktes können die Primärenergiefaktoren  $f_{PE,i}$  nicht als konstant angesehen werden, da beispielsweise der Einsatz erneuerbarer Energien enorme Auswirkungen auf den Primärenergiefaktor des deutschen Strommix  $f_{PE,S,dt.Mix}$  hat. Sämtliche Betrachtungen beziehen sich somit auf die derzeitige Ausgangssituation.

In Bezug auf die [DIN V 4701-10] werden Primärenergiefaktoren  $f_{PE,i}$  für einzelne Energieträger festgelegt, die im Folgenden als Grundlage für die Primärenergiebedarfsermittlung genutzt werden.

**Tabelle 7:** Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger

	Strom (fossil)	Strom (dt. Mix)	Erdgas
Primärenergiefaktor	3,0	2,6	1,1

Da die Einspeisung von Strom sowohl aus erneuerbaren Energien, als auch aus Kraft-Wärme-Kopplung laut [EEG] und [KWKG] Vorrang hat, wird der ins Netz eingespeiste KWK-Strom mit dem Primärenergiefaktor für fossilen Strom  $f_{PE,S,fossil} = 3,0$  bewertet, da die Stromeinspeisung idealerweise nur den fossilen Anteil im deutschen Strommix substituiert.

### 3.1.1.2 Ökologische Betrachtung

Neben den energetischen Betrachtungen ist die ökologische Betrachtung von enormem Interesse, da eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen  $\Delta E_{CO_2}$  in Kreisen der Öffentlichkeit und in politischen Diskussionen einen hohen Stellenwert einnimmt. Die ökologische Optimierung beruht auf der Betrachtung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen  $e_{CO_2,i}$  der Endenergien.

In Analogie zu der primärenergetischen Betrachtung wird bei der ökologischen Betrachtung wiederum zwischen Strombezug und -einspeisung auf Grundlage der aktuellen Rechtslage unterschieden. Da nur spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionswerte für Erdgas und Strom aus dem deutschen Strommix nach [UBA11] vorliegen, wird angenommen, dass sich der fossile, durch KWK-Strom substituierbare Anteil des Strommix äquivalent zu den Primärenergiefaktoren  $f_{PE,S,fossil}$  zu  $f_{PE,S,dt,Mix}$  verhält.

$$e_{CO_2,fossil} = e_{CO_2,dt,Mix} \frac{f_{PE,S,fossil}}{f_{PE,S,dt,Mix}} \quad (9)$$

In der folgenden Tabelle sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Energieträger, die als Grundlage für die weiteren Berechnungen herangezogen werden, aufgetragen.

**Tabelle 8:** Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen für verschiedene Energieträger<sup>5</sup>

	<b>Strom (fossil)</b>	<b>Strom (dt. Mix)</b>	<b>Erdgas</b>
<b>spez. CO<sub>2</sub>-Emission</b>	650 g CO <sub>2</sub> /kWh	563 g CO <sub>2</sub> /kWh	202 g CO <sub>2</sub> /kWh

Sowohl bei der primärenergetischen als auch der ökologischen Betrachtungsweise werden nur die Auswirkungen der Sanierungen betrachtet. Eine tiefer gehende Betrachtung der gesamten Emissionen und Primärenergiebedarfe über den Lebenszyklus der Systeme wird im Rahmen dieser Betrachtung nicht untersucht.

<sup>5</sup> erste Schätzungen für das Jahr 2010 aus [UBA11].

### 3.1.1.3 Wirtschaftliche Betrachtung

Die wirtschaftliche Betrachtung erfolgt lediglich in Anlehnung an den Entwurf der [VDI 2067], da diese für die Betrachtung von Mikro-KWK-Anlagen nur bedingt anwendbar ist. Die Investitions- und damit korrelierenden Folgekosten einer Investition werden in vier ökonomisch relevante Bereiche unterteilt, die wiederum im Rahmen dieser Ausarbeitung auf drei allgemeine Kostenbereiche reduziert werden.

Die kapitalgebundenen Kosten  $k_{KGK}$  sind jene Kosten, die durch die eigentliche Investition auftreten. Die jährlichen Kosten werden anteilig, über die Annuität  $a_i$  der Investition, in Abhängigkeit der technischen Nutzungsdauer  $t_{Nutz,i}$  und der zugrunde gelegten angesetzten Alternativverzinsung  $z$  berechnet. Der Kapitaldienst  $k_{KGK}$  – die jährlichen, kapitalgebundenen Kosten der Investition – wird somit aus dem Produkt aus der Annuität  $a_i$  und den Investitionskosten  $K_{IK,i}$  bestimmt.

In den betriebsgebundenen Kosten  $k_{BGK}$  finden sich die Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die Personalkosten für das Bedienen der Anlage wieder.

Die verbrauchsgebundenen Kosten  $k_{VGK}$  werden im neuen Entwurf der [VDI 2067] als betriebsgebundene Kosten bezeichnet und beinhalten die bedingten Energiekosten, die sich durch eine energetische Modernisierung verändern. Im Rahmen dieser wirtschaftlichen Betrachtung wird der gesamte Energiebedarf des Gebäudes mit Kosten verknüpft, sodass Einsparungen bzw. Mehrkosten gegenüber einem Referenzobjekt dargestellt werden können.

Unter den sonstigen Kosten  $k_{SK}$  werden Kosten für die Versicherung, allgemeine Abgaben sowie noch nicht erfasste Steuern geführt, die in der allgemeingültigen ökonomischen Betrachtung dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren werden Gewinne in den sonstigen Kosten ausgewiesen. Diese werden, da sie ausschließlich aus der Einspeisung von überschüssigem KWK-Strom ins Netz resultieren, unter die verbrauchsgebundenen Kosten gefasst und reduzieren somit die verbrauchsgebundenen Kosten  $k_{VGK}$  des Gesamtobjekts.

Durch die Summe der kapital-, betriebs- sowie verbrauchsgebundenen Kosten werden die jährlichen, energetisch relevanten Kosten dargestellt. Sämtliche aufgeführte Kosten sind Bruttopreise und beinhalten die übliche Mehrwertsteuer von  $z_{MWSt} = 19\%$ .

### 3.1.2 Konstruktive und bauphysikalische Grundlagen

Für die Berechnung und Bewertung von primärenergetischen, ökologischen und wirtschaftlichen Einsparpotenzialen sowohl von Dämmmaßnahmen als auch von KWK-Systemen, wird ein möglichst allgemeines Referenzgebäude als Vergleichsobjekt benötigt. Im Rahmen der ganzheitlichen, bundesweiten, Gebäudetypen übergreifenden Potenzialanalyse wird ein Referenzgebäude zugrunde gelegt, welches durch vereinfachte und allgemeingültige Berechnungen beschrieben wird. Die Variation dieses Gebäudes besteht in der Veränderung der Eingabeparameter. Das Referenzobjekt wird durch die Vorgabe einer Wohnfläche, die Belegung des Gebäudes mit Bewohnern und den witterungsbereinigten spezifischen Heizwärmebedarf des Objekts beschrieben. Die energetischen und wirtschaftlichen Einsparmöglichkeiten sind in hohem Maße von den Energieflüssen – elektrische und thermische Bedarfe (nach [VDI 4655]) – sowohl innerhalb des betrachteten Objekts als auch bilanziell um das betrachtete Objekt abhängig. Für die thermischen Bedarfe ist ferner die Annahme einer allgemeingültigen, repräsentativen thermischen Verteilung notwendig.

Für die Betrachtung der Energieflüsse innerhalb des Objekts wird der thermische Gesamtbedarf in fixe und variable Anteile unterteilt. Fixe Anteile sind jene Anteile, die unabhängig vom energetischen Zustand der Gebäudehülle sind. Hierzu zählen die Bedarfe für Warmwasser, Lüftung, Wärmebrücken und einen Mindest-Wärmedurchgang durch Fensterflächen. Im Gegensatz dazu stellen die variablen Anteile Einsparpotenziale für Dämmmaßnahmen dar. Es werden variable Anteile der Lüftung und Wärmebrücken betrachtet die indirekt von Dämmmaßnahmen partizipieren. Weiterhin wird angenommen, dass alle weiteren Transmissionswärmeverluste (oberste Geschossdecke, Außenwand, Kellerdecke) durch eine maximale Dämmung auf eine quasi adiabate Hüllfläche saniert werden können, sodass diese Anteile als komplett variabel aufgefasst werden. Bei der Fensterfläche ist eine Dämmung im eigentlichen Sinne nicht möglich, sodass hier der anteilige Austausch der Bauteile als Grundlage genommen wird.

In dieser Betrachtung werden sowohl interne als auch solare Warmegewinne nur indirekt berücksichtigt, da der spezifische Heizwärmebedarf  $q_H$  die zentrale Bezugsgröße zur Potenzialabschätzung darstellt und diese bereits sämtliche Warmegewinne beinhaltet. Es wird angenommen, dass sich der relative Anteil der Warmegewinne in Bezug zum Wärmebedarf des Gebäudes nicht ausschlaggebend durch die energetische Modernisierung der Dämmung oder den Einsatz eines KWK-Systems ändert.

Im Referenzobjekt entfallen in Anlehnung an [Ihl00] 2 kWh/(Pers·d) auf die Warmwasserbereitung im Wohngebäude die unabhängig von der Gebäudehülle ist und somit einen fixen Wärmeverlustanteil darstellt.

Die thermischen Lüftungsverluste über die Bilanzhülle des Referenzobjekts resultieren aus dem Luftwechsel des Gebäudes, der wiederum in hohem Maße vom Nutzerverhalten abhängig ist. Im Rahmen dieser Arbeit, die das Ziel hat, möglichst allgemeingültige Aussagekraft zu erlangen, wird das spezifische Nutzerverhalten nicht tiefergehend betrachtet. Für eine möglichst repräsentative Abbildung des Referenzgebäudes bietet sich eine Unterteilung der Luftwechselrate in einen fixen und einen variablen Anteil an. Der fixe Anteil entspricht einer notwendigen Luftwechselrate von  $n_f = 0,5 \text{ h}^{-1}$ , die nach [DIN EN 832] mindestens eingehalten werden muss, um den hygienischen Anspruch für das Wohngebäude einzuhalten und um weiterhin die komfortbedingten Grundbedürfnisse der Bewohner zu befriedigen. Die natürliche Luftwechselrate  $n_v$  wird zum einen durch das Nutzerverhalten beeinflusst, zum anderen spiegelt dieser variable Anteil die Bausubstanz des Referenzgebäudes durch z.B. Fugenverluste wieder. Die Herleitung des variablen Anteils beruht auf einer natürlichen Luftwechselrate für eine durchschnittliche Abschirmungsklasse und einer mittleren Gebäudedichtheit eines Einfamilienhauses, wiederum in Anlehnung an [DIN EN 832]. Der variable Anteil wird durch die Differenz zwischen Mindest- und durchschnittlicher Luftwechselrate bestimmt. Es wird angenommen, dass dieser variable Anteil der Luftwechselrate  $n_f = 0,1 \text{ h}^{-1}$  mit dem Verhältnis des tatsächlichen, spezifischen variablen Wärmebedarfs des betrachteten Objekts linear (in Abhängigkeit der Umsetzung der energetischen Sanierung der Gebäudehülle) zu einem bundesdurchschnittlichen Referenzwert korreliert. Die Möglichkeit einer kontrollierten, maschinellen Lüftung wird aufgrund der gegebenen Zielvorgabe – Korrelation von Dämmmaßnahmen und KWK-Systemen – im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefergehend berücksichtigt.

Der aus Wärmebrücken resultierende Wärmedurchgang wird – analog zu den Lüftungsverlusten – wiederum in fixe und variable Anteile untergliedert, da die Annahme getroffen wird, dass der Wärmedurchgang über Wärmebrücken bei einem guten Dämmstandard des Referenzgebäudes geringer ausfällt als bei einem unzureichend gedämmten Gebäude. Auf Grundlage der [EnEV] liegt der Höchstwert für den Wärmebrückenzuschlag eines zu errichtenden Wohngebäudes bei  $U_{WB,f} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Da es sich bei der Potenzialstudie um die Betrachtung des Wohngebäudebestands handelt, kann dieser Wert als minimaler, somit fixer Wärmebrückenzuschlag angesehen werden. Vereinfachend kann nach der [DIN V 4108-6] ohne Nachweis ein Wärmebrückenzuschlag  $U_{WB} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

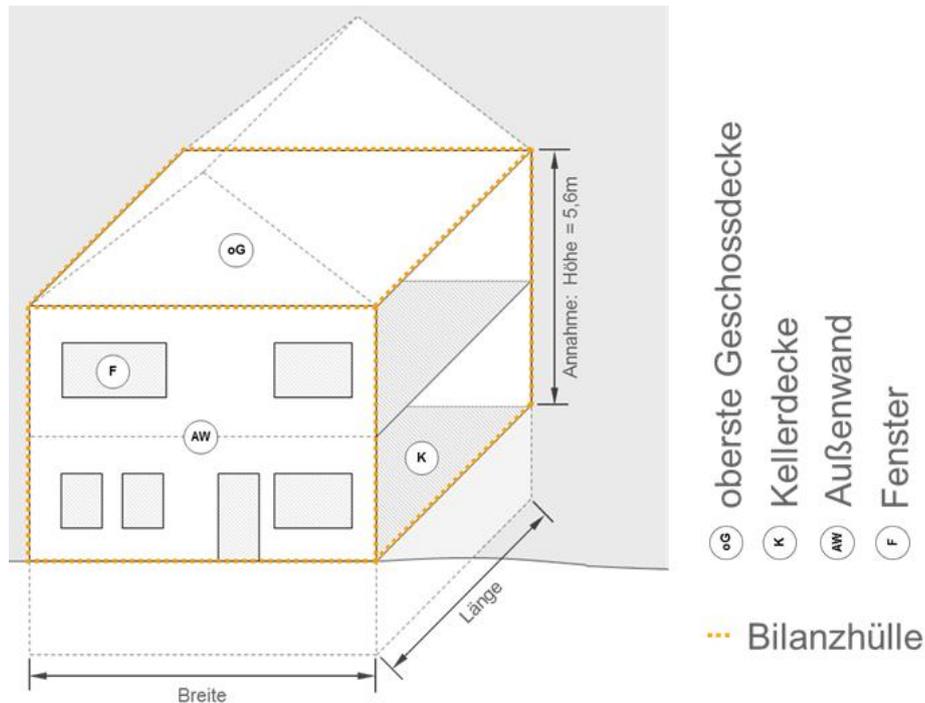
angesetzt werden. Unter der Annahme, dass es sich bei der Vorgabe der [EnEV] um einen fixen Anteil handelt, kann die Differenz aus den beiden genannten Wärmedurchgangskoeffizienten als variabler Anteil angesehen werden.

Im Bereich der außenliegenden Bauteile zeichnen sich die Fensterflächen durch eine besondere Eigenschaft aus. Im Gegensatz zu den anderen Elementen – Außenwand, oberste Geschossdecke und Kellerdecke – besteht die Fensterfläche aus einem fixen und einem variablen Wärmeverlustanteil. Diese Unterteilung resultiert aus den unterschiedlichen Maßnahmen zur energetischen Modernisierung der Bauteile. Durch das Aufbringen von Dämmmaterial kann der Wärmedurchgang eines Bauteils auf einen Wert gegen Null reduziert werden. Im Falle eines Austausches der Fenster wird der Wärmedurchgangskoeffizient zwar verbessert, jedoch besteht weiterhin ein Wärmedurchgang durch das Bauelement. Für die energetische und wirtschaftliche Beurteilung der Dämmmaßnahmen wird die Studie des Instituts für Wohnen und Umwelt zur Untersuchung der weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 [IWU09] zu Grunde gelegt, in der für eine 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit einem thermisch verbesserten Randverbund aus Kunststoff, bei einer angenommenen mittleren Fensterfläche von  $A_{F,Bt,m} = 1,8 \text{ m}^2$  pro Fenster ein fixer Wärmedurchgangskoeffizient von  $U_{F,f} = 1,01 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  angegeben wird. Dieser Wärmedurchgang wird als minimaler Wärmedurchgang der Fensterflächen des Referenzgebäudes angesehen. Die Differenz des gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters zum fixen Anteil beschreibt den variablen Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensterelementes für das Bezugsobjekt.

Da es sich bei der ganzheitlichen Potenzialanalyse um eine theoretisch fundierte Ausarbeitung handelt und die empirischen Angaben für mögliche Wärmedurchgangskoeffizienten von mittleren deutschen Referenzobjekten eine zu große Streuung aufweisen, wird der variable Wärmeverlust nicht durch explizite Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt, sondern über eine relative, variable Wärmeverlustverteilung über die Außenbauteile dargestellt. Die Berechnung der relativen Verteilung der variablen Anteile erfolgt für den variablen Anteil der Fensterfläche sowie für die thermischen Anteile der obersten Geschossdecke, der Außenwand und der Kellerdecke des Referenzgebäudes. Dies liegt darin begründet, dass diese Elemente durch einen Austausch oder eine mögliche Dämmung – bei Betrachtung der Extremwerte – die Eigenschaften einer wärmedichten, somit isolierenden Außenfläche darstellen können.

Die Berechnung der Wärmeverteilung im Gebäude hat das Ziel, eine allgemeingültige Aussage für die Wärmeverlustanteile der einzelnen Gebäudeteile

zu erhalten. Die Wärmebilanzhülle wird vereinfacht durch einen Quader beschrieben, der aus dem Abschluss zum unbeheizten Dachboden  $A_{oG}$  (der sogenannten obersten Geschossdecke), der Kellerdecke  $A_K$ , den Fensterflächen  $A_F$  und der Außenwand  $A_{AW}$  besteht.



**Abbildung 27:** Bilanzielle Darstellung des allgemeinen Referenzobjekts

Sämtliche Berechnungsgrundlagen beruhen auf Richtwerten der [EnEV] und der Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS09]. Die absoluten Bauteilflächen für die unterschiedlichen Teilbereiche können somit für ein mittleres deutsches Referenzobjekt dargestellt werden.

Die Teilbauteilflächen befinden sich nicht in vergleichbaren Einbausituationen. Die Wärmeübertragung über die Außenwand und Fenster gegen die Außenluft ist anders als der Wärmeübergang gegen einen unbeheizten Keller oder Dachboden. Dies resultiert zum einen aus den Temperaturdifferenzen zwischen innerer und äußerer Oberfläche des Bauteils und zum anderen aus den verschiedenen Anström- bzw. Umströmgeschwindigkeiten der Luft auf die unterschiedlichen Bauteile. Die [DIN V 4108-6] sieht für diese Einbausituationen die Verwendung eines Temperaturkorrekturfaktors vor (s. Tabelle 9).

**Tabelle 9:** Temperaturkorrekturfaktoren für verschiedene Bauteile

	Kellerdecke	oberste Geschossdecke	Außenwand	Fenster
Temperatur-Korrekturfaktor	0,6	0,8	1,0	1,0

Die temperaturkorrigierten Flächen beschreiben das Gebäude nun so, als ob alle Flächen die gleichen Umgebungsbedingungen hätten. Die relative Darstellung der Flächen (korrigierte Teilfläche bezogen auf korrigierte Hüllfläche) gibt Aufschluss über den spezifischen Flächenanteil eines Bauteils an der Gesamtgebäudehülle.

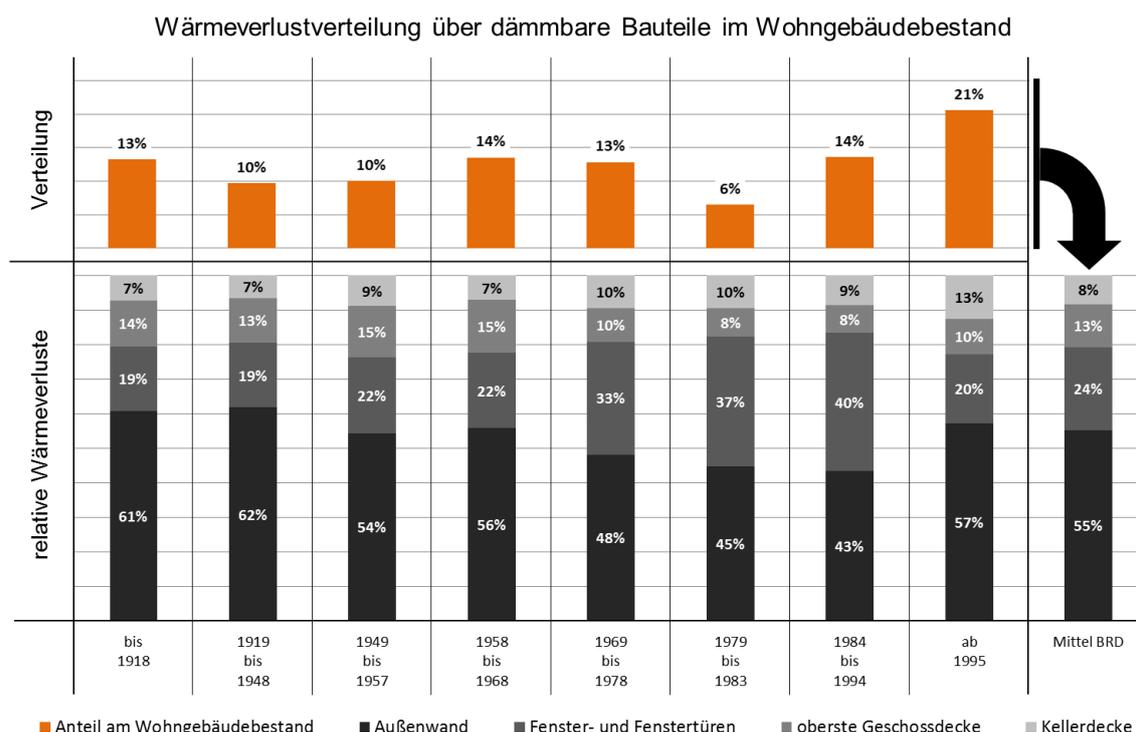
Für eine Aussage über die Wärmeverlustverteilung werden weiterhin die Einflüsse der verschiedenen Wärmedurchgangskoeffizienten der unterschiedlichen Bauteile berücksichtigt. Hierzu werden nach [BMVBS09] Pauschalwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten von nicht nachträglich gedämmten Bauteilen im Urzustand in Abhängigkeit von Baualtersklassen (Tabelle 10) zu Grunde gelegt.

**Tabelle 10:** Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen

		Baualtersklasse							
		bis 1918	1919 bis 1948	1949 bis 1957	1958 bis 1968	1969 bis 1978	1979 bis 1983	1984 bis 1994	ab 1995
		Pauschalwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten in W/(m <sup>2</sup> ·K)							
oberste Geschossdecke	Massive Decke	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3
	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3
Kellerdecke	Massive Bauteile	1,2	1,2	1,5	1,0	1,0	0,8	0,6	0,6
	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4
Außenwand	Massive Konstruktion	1,7	1,7	1,4	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5
	Holzkonstruktion	2,0	2,0	1,4	1,4	0,6	0,5	0,4	0,4
Fenster, Fenstertüren	Holzfenster, einfach verglast	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-	-
	Holzfenster, zwei Scheiben	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	1,8
	Kunststofffenster, Isolierverglasung	-	-	-	3,0	3,0	3,0	3,0	1,8
	Alu- oder Stahlfenster, Isolierverglasung	-	-	-	4,3	4,3	4,3	4,3	1,8

Für die Potenzialabschätzung eines bundesweit durchschnittlichen Referenzgebäudes wird die flächenmäßige, durchschnittliche Verteilung der Baualterklassen in Deutschland nach [IWU07] zu Grunde gelegt. Die Verknüpfung sowohl der Informationen über die Verteilung der Alterststruktur als auch der Ergebnisse der energetischen korrigierten relativen Flächenverteilung ergibt eine Aussage über die mittlere energetische Beschaffenheit der Bauteile im Wohngebäudebestand.

Die resultierende relative Verteilung stellt die Grundlage für die weiteren Berechnungen dar und ist in der folgenden Abbildung aufgezeigt. Die angesetzte mittlere Verteilung der variablen Energieverluste untergliedert sich in 8 % der Verluste über die Kellerdecke, 13 % über die oberste Geschossdecke, 24 % über die Fenster- und Fenstertüren sowie die restlichen 55 % der Verluste über die Außenwand.

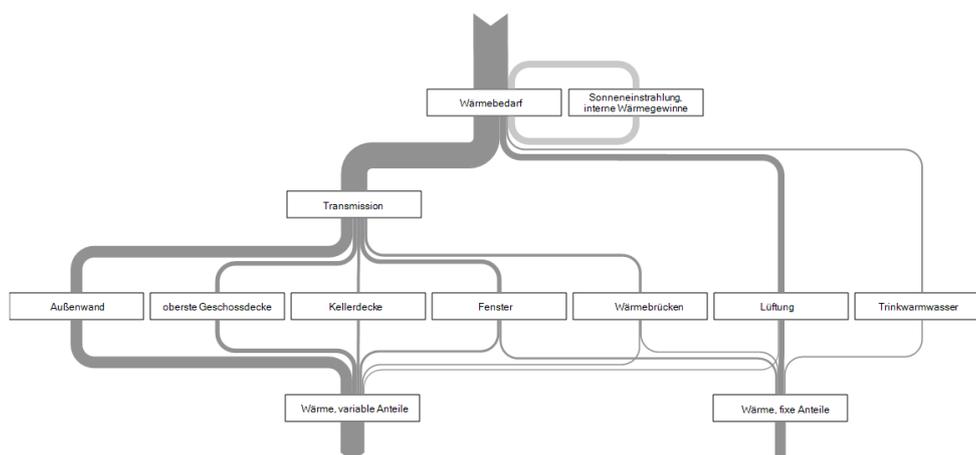


**Abbildung 28:** Wärmeverlustverteilung über dämmbare Bauteile im Wohngebäudebestand

Der variable Wärmeverlust setzt sich aus den Transmissionswärmeverlusten durch die oberste Geschossdecke, die Kellerdecke, die Fenster- und Fenstertüren und die Außenwand, die direkt durch Dämmmaßnahmen beeinflusst werden können, sowie aus den Verlusten durch natürliche, ungewollte Lüftung und durch Wärmebrücken, die nur indirekt durch Dämmmaßnahmen reduziert werden

können, zusammen. Die Dämmmaßnahmen werden durch eine Sanierung der außenliegenden, direkt dämmbaren Bauteile umgesetzt. Es wird angenommen, dass die variablen Lüftungs- und Wärmebrückenverluste an den Sanierungsmaßnahmen partizipieren, da beispielsweise die Luftdichtheit eines Gebäudes im Rahmen der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle verbessert wird. Es wird somit vorausgesetzt, dass sich die variablen Verluste der indirekt durch Dämmmaßnahmen betroffenen Bauteile in Bezug auf die direkt betroffenen Bauteile im gleichen Maße reduzieren. Hierbei wird weiterhin angenommen, dass alle verlustbehafteten Bauteile als Gleichwertig betrachtet werden, da eine allgemeine Priorisierung der Dämmmaßnahmen nicht fundiert möglich ist.<sup>6</sup> Eine Reduzierung der variablen thermischen Verluste eines Objekts um einen relativen Anteil von beispielsweise 30 % entspricht einer gleichwertigen Reduzierung der Verluste über die Teilbauteile um jeweils 30 %.

Das nachfolgende Energieflussbild stellt die hergeleiteten Ergebnisse graphisch in einer möglichst übersichtlichen Form dar. Es wird deutlich, dass der eigentliche Wärmebedarf die internen Wärmegewinne und die solare Einstrahlung nur bilanziell berücksichtigt. Die Verteilung der thermischen Bedarfe erfolgt über die verschiedenen Wärmebedarfseigenschaften – Transmission, Lüftung und Warmwasser – sowie anschließend über die Unterverteilung der Transmissionsverluste. Die einzelnen Teilbedarfe werden infolgedessen in variable und fixe Wärmebedarfsanteile zusammengefasst.

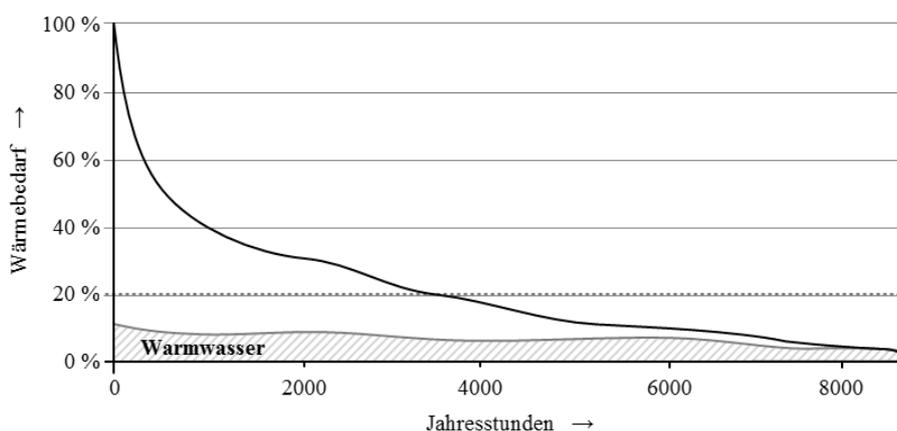


**Abbildung 29:** Energieflussbild der thermischen Bedarfs- / Verlustverteilung

<sup>6</sup> Annahme auf Grundlage von vorhergehenden objekt- und baualtersspezifischen Berechnungen. Eine allgemeingültige und für die Potenzialabschätzung nutzbare Aussage kann aus den Berechnungen aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Bauteile über die Baualtersklassen nur bedingt abgeleitet werden.

### 3.1.3 Einsatz von Technologie

Als Grundlage für die Berechnung für ein möglichst allgemein gültiges und repräsentatives Referenzobjekt wird die zeitliche Bedarfsverteilung, dargestellt durch eine geordnete, relative Jahresdauerlinie, verwendet.



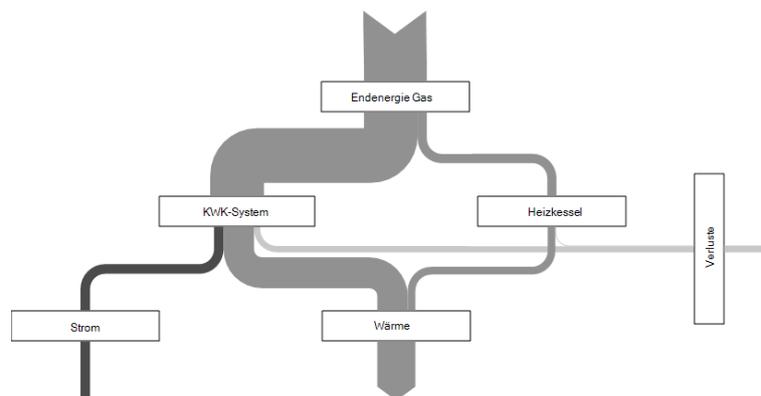
**Abbildung 30:** Darstellung einer möglichen Jahresdauerlinie für ein Wohngebäude

Bei der Darstellung der geordneten Jahresdauerlinie wird der Leistungsbedarf eines Objekts entweder relativ oder absolut über die spezifische, wiederum relative oder absolute Nutzungszeit aufgetragen. Mit Hilfe der Jahresdauerlinie kann ermittelt werden, über welchen Zeitraum eine bestimmte Leistung benötigt wird. Diese Darstellung eignet sich zur Visualisierung von geordneten Lastprofilen in allen energetischen Bereichen. Im Rahmen der weiteren Berechnungen wird eine theoretische Jahresdauerlinie nach Sochinsky [Dit98] mit relativen, thermischen Bedarfen in einem absoluten Zeitintervall für ein Referenzobjekt zu Grunde gelegt. Die hierfür benötigte maximale Heizlast  $Q_H$  des Gebäudes wird vereinfacht nach [Bur04] berechnet. Unter der minimal benötigten Leistung wird die thermische Leistung für die Warmwasserbereitung verstanden, da diese Leistung als über das Jahr konstant betrachtet wird. Weiterhin wird die thermische Leistung zur Warmwasserbereitung über den Tagesverlauf als konstant angesehen, da die Leistungen im Rahmen dieser Herangehensweise bilanziell und nicht über spezifische Typtage berechnet werden.

Es wird angenommen, dass eine im Rahmen dieser Berechnung verwendete KWK-Anlage sämtliche geforderten thermischen Leistungen, die gleich oder kleiner als die thermischen Leistungen des KWK-Aggregates sind, abfahren kann. Da ein vermehrtes Takten – das An- und Abfahren der Anlage – zur Reduzierung der Anlagenbelastung vermieden werden sollte, kann die Taktfrequenz durch den Einsatz eines Pufferspeichers erheblich reduziert werden. Des Weiteren können je

nach Speicherfüllungsgrad auch höhere thermische Anforderungen durch die Kombination aus KWK-Anlage und Pufferspeicher bereitgestellt werden, sodass die obigen Annahmen mit hinreichender Genauigkeit zu Grunde gelegt werden können. Ferner sind bereits einige KWK-Anlagen am Markt verfügbar, die eine modulierende Betriebsweise unterstützen. Die Vollbenutzungsstunden des KWK-Systems werden durch die Division der abgegebenen thermischen Arbeit des KWK-Systems durch die zugehörige thermische Leistung des KWK-Systems ermittelt, wobei davon ausgegangen wird, dass das KWK-Aggregat nicht modulierend, sondern immer unter Volllast betrieben wird.

Das Energieflussbild der Anlagentechnologie ist für eine Kombination aus KWK-System und einem Heizkessel zur Bereitstellung der Spitzenlasten in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 31:** Energieflussbild bei anteiliger Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung

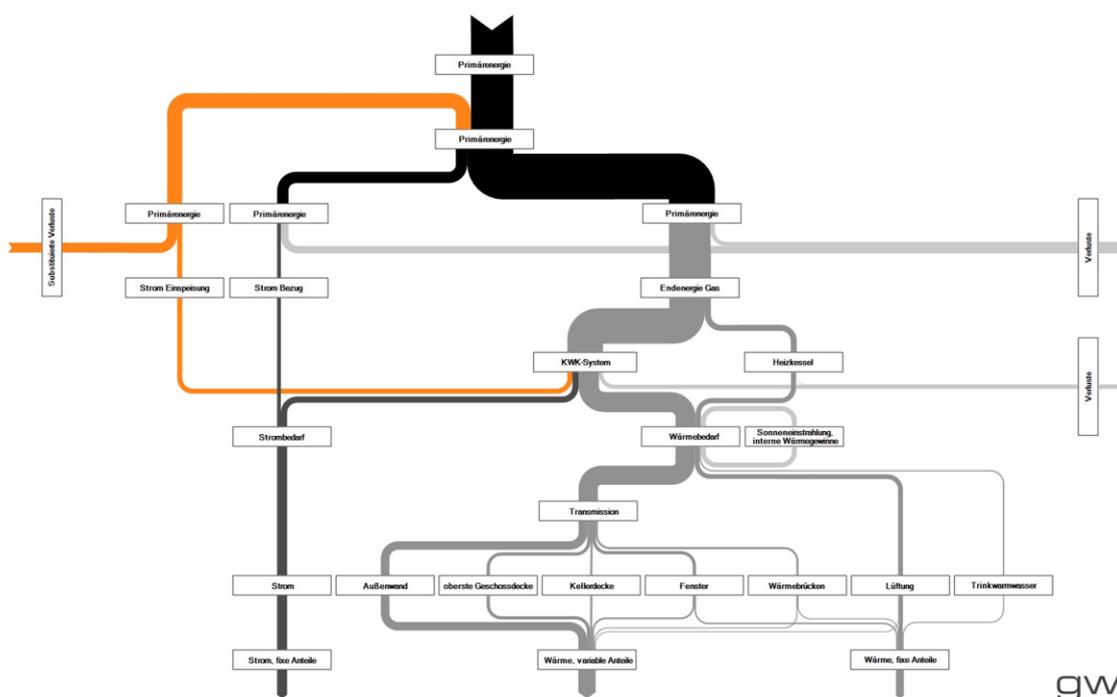
Die eingesetzte Endenergie wird zum Teil für das KWK-System und zum anderen Teil für den Heizkessel benötigt. Die thermische Nutzenergie, die für das Versorgungsobjekt benötigt wird, wird anteilig aus Wärmeenergie des KWK-Systems und des Spitzenheizkessels bereitgestellt. Die Aufteilung erfolgt über die in diesem Teilkapitel dargestellte Berechnungsgrundlage. Die angesetzten Wirkungsgrade bedingen Verluste, also jene Energiemengen, die keiner weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt werden können. Im Gegensatz zum Heizkessel wird bei der Umwandlung der chemisch gebundenen Energie im KWK-System sowohl thermische als auch elektrische Energie bereitgestellt. Der KWK-Strom kann – aufgrund des Vorranges von Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung – entweder in das öffentliche Netz eingespeist, oder im selbigen Objekt genutzt werden.

Der aus den thermischen Bedarfen resultierende KWK-Strom ist zeitlich nicht kongruent zum Strombedarf, daher wird ein Stromeigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen}$  eingeführt. Dieser repräsentiert den Anteil der KWK-Strombereitstellung, die

maximal genutzt werden kann. Die maximale elektrische Arbeit des KWK-Systems die selbst genutzt werden kann, ist durch den Strombedarf des Objekts begrenzt.

### 3.1.4 Grundlagen der Kombination

Die spezifische Betrachtung von Dämmmaßnahmen oder des Einsatzes von KWK-Systemen kann bereits auf den Grundlagen der vorherigen Teilkapitel berechnet und dargestellt werden. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Potenziale durch den Einsatz von KWK in Kombination mit der Modernisierung der energetischen Gebäudehülle eines betrachteten Gebäudes werden in diesem Kapitel angeführt. Die Grundlage für die kombinierte Bilanzierung bilden die Annahmen zum Energiebedarf eines Objekts. Durch die anteilige, gleichwertige Umsetzung von Dämmmaßnahmen erfolgt eine Reduzierung des thermischen Bedarfs des Objekts. Auf Grundlage dieses reduzierten Wärmebedarfs wird das KWK-System, wiederum anteilig, bezogen auf den maximalen Wärmebedarf berechnet. Im nachfolgenden, exemplarischen Energieflussbild wird zur Veranschaulichung ein Stromeigennutzungsanteil von  $r_{S,Eigen} = 50\%$  angenommen.



**Abbildung 32:** Ganzheitliches Energieflussbild für eine kombinierte Umsetzung

Das ganzheitliche Energieflussbild stellt die Verknüpfung der einzelnen bereits aufgeführten Teilenergieflussbilder dar. Es kann besonders jene elektrische Arbeit

des KWK-Systems hervorgehoben werden, welche ins Netz eingespeist wird. Dieser KWK-Strom substituiert – wie in Kapitel 3.1.1 ausgeführt – primär-energetische Verluste des fossilen deutschen Kraftwerksparks und führt somit zu einer Reduzierung des Primärenergiebedarfs des betrachteten Objekts.

### **3.1.5 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen**

Wie bereits im Kapitel 3.1.1 dargestellt, werden die jährlichen Gesamtkosten, bestehend aus den kapital-, verbrauchs-, und betriebsgebundenen Kosten, sowohl für das Referenzobjekt als auch für das resultierende, modernisierte Objekt berechnet. Für die bestmögliche Vergleichbarkeit wird angenommen, dass im Referenzobjekt weder kapital-, noch betriebsgebundene Kosten anfallen. Dies liegt darin begründet, dass sowohl die bereits vorhandene Dämmung als auch das verbaute Heizungssystem als abgeschrieben angesehen werden. Ferner wird angenommen, dass eine Modernisierung aus technischen Gründen nicht erforderlich ist. Dies bedeutet wiederum, dass die vorhandene Struktur weiterhin genutzt werden kann. Die betriebsgebundenen Kosten des vorhandenen Heizkessels werden, da es sich lediglich um einen Vergleich handelt, nicht berücksichtigt, da sich diese Kosten durch die anteilige Umsetzung einer Dämmmaßnahme nicht signifikant ändern. Beim Einsatz eines KWK-Systems wird der verbaute Heizkessel weiterhin als Spitzenlastkessel genutzt, sodass auch hier die anfallenden, verbrauchsgebundenen Kosten nach der Modernisierung angesetzt werden können. Nur bei Simulation eines KWK-Systems mit einem relativen Anteil der Heizlast von  $r_{\text{KWK}} = 100\%$  und somit einer kompletten thermischen Abdeckung würde der Spitzenlastkessel entfallen. Da ein monovalenter Betrieb in der Praxis unüblich ist, kann die resultierende, marginale Abweichung in dieser Konstellation vernachlässigt werden.

Die allgemeinen, verbrauchsgebundenen Kosten werden in Bezug auf die Energiedaten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [BMW11], auf Grundlage eines Erdgasbezugspreises<sup>7</sup> in Höhe von 6,35 Cent/kWh<sub>HS</sub> und eines Strombezugspreises<sup>8</sup> von 23,40 Cent/kWh<sub>el</sub>, jeweils für das Bezugsjahr 2010 ermittelt. Weiterhin wird eine alternative Anlagemöglichkeit des Kapitals mit einem Zinssatz von 4%/a für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten angenommen.

---

<sup>7</sup> Preisbildung auf Grundlage einer Abgabemenge von 325 kWh pro Monat für Tarifabnehmer, inkl. Ausgleichsabgabe, Stromsteuer und Mehrwertsteuer.

<sup>8</sup> Preisbildung auf Grundlage einer Abgabemenge von 1.600 kWh pro Monat, inkl. aller Steuern und Abgaben.

### 3.1.5.1 Dämmung

Die Kosten für die Dämmung eines Bauteils bestehen aus einem Fixkostenanteil (Anfahrt, Montage u. ä.) sowie einem variablen Kostenanteil für den eingesetzten Dämmstoff in Abhängigkeit von der Dicke der Dämmung. Die Umsetzung der Modernisierungsmaßnahmen erfolgt bei den Fensterflächen durch den anteiligen Austausch der Bauteile. Dieses sehr theoretische Vorgehen ist – wie bereits beschrieben – notwendig und bedeutet, dass die Fenster im Falle einer Dämmung um 30 % zu einem Anteil von 30 % ausgewechselt werden würden. Des Weiteren fallen Kosten für die Bereitstellung und den Aufbau eines Gerüsts zur Umsetzung der Maßnahmen an. Da die Notwendigkeit eines Gerüsts keiner Maßnahme in voller Gänze zugeschrieben werden kann, werden die Kosten wiederum in Abhängigkeit von der Umsetzung der Dämmmaßnahmen anteilig ermittelt.

Im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung werden empirische Investitionskosten für die verschiedenen Bauteile in Kombination mit einer Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials von 0,035 W/(m·K) für die Berechnung der erforderlichen Dämmstärke in Bezug auf die Studie [IWU09] zugrunde gelegt. Die variablen und fixen Kosten für die unterschiedlichen Bauteile sowie die Gemeinkosten sind in der folgenden Tabelle aufgetragen.

**Tabelle 11:** Aufgegliederte Brutto-Investitionskosten für verschiedene Bauteile

	Kellerdecke	oberste Geschossdecke	Außenwand	Fenster <sup>9</sup>	Gerüst
<b>variable Kosten in EUR/(m<sup>2</sup><sub>BT</sub>·m)</b>	101,72	81,81	268,91	371,00	-
<b>fixe Kosten in EUR/m<sup>2</sup><sub>BT</sub></b>	25,66	15,66	81,71	-	-
<b>Gemeinkosten in EUR/m<sup>2</sup><sub>WFL</sub></b>	-	-	-	-	6,00

Die obigen Kosten dienen als Grundlage zur Ermittlung der jährlichen kapitalgebundenen Kosten. Die Nutzungsdauer zur Bestimmung der Annuität wird in Anlehnung an den Entwurf der [VDI 2067] auf einen Zeitraum von 50 Jahren<sup>10</sup> festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass durch die energetische Sanierung

<sup>9</sup> Die Kosten für die Fenster gelten für eine mittlere Fensterfläche von  $A_{F,m} = 1,8 \text{ m}^2$  und einer 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U_F = 1,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

<sup>10</sup> Der Zeitraum bezieht sich auf die [VDI 2067] als vergleichbare Grundlage. Je nach Dämmmaterial wird die Lebenszeit vom Hersteller z. T. auch nur mit 25 Jahren angegeben.

der Gebäudehülle keine betriebsgebundenen Kosten entstehen. Die verbrauchsgebundenen Kosten partizipieren an der Energieeinsparung, da der Gasbezug durch einen verminderten Wärmebedarf reduziert wird.

### 3.1.5.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Die Einsatzmöglichkeiten und die damit korrelierenden Einsparpotenziale von KWK-Systemen sind im hohen Maße von der benötigten Wärmemenge des Bezugsobjekts abhängig. Für die wirtschaftliche Betrachtung müssen analog zu den Dämmmaßnahmen Kosten für die KWK-Systeme ermittelt werden.

Das durch die Literatur- und Internetrecherche gesammelte Datenmaterial ist für eine fundierte, aktuelle und marktgerechte wirtschaftliche Grundlage ungeeignet. Im Rahmen einer erstellten Hersteller-Umfrage wurde eine Datenbasis für die Erstellung einer Mikro-KWK-Richtpreisfunktion geschaffen. Der Fragebogen für die Hersteller beinhaltete die folgenden Merkmale:

- Hersteller
- Produktname
- Brennstoff (Öl, Erdgas, Flüssiggas, Biogas)
- KWK-Typ (Otto, Stirling, Dampf, PEMFC oder SOFC)
- maximale elektrische Leistung in kW
- resultierende thermische Leistung in kW
- Brennstoffausnutzungsgrad  $\eta_{Br}$  ( $\eta_{el} + \eta_{th}$ ) in %
- Netto-Verkaufspreis in EUR für KWK-Aggregat

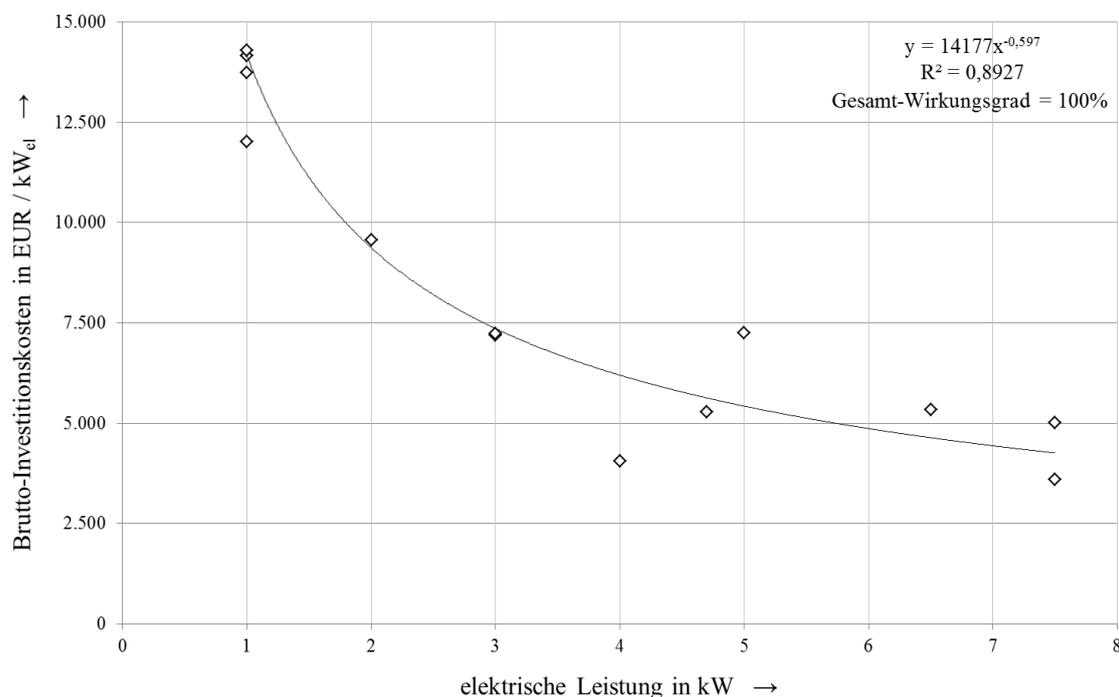
Die Befragung vom 11. Juli 2011 basiert auf Angaben von Herstellern aus allen KWK-Technologiebereichen. Die Rücklaufquote der Befragung liegt bei rund 57 %. Die Anzahl der verwendbaren Rückmeldungen liegt bei 15 Stück und beinhaltet Antworten von marktrepräsentativen Anlagen. Auf eine Veröffentlichung der Antworten wird im gegenseitigen Einverständnis verzichtet.

Da KWK-Anlagen – vor allem im kleinen Leistungsbereich – häufig nur als Gesamtsystem verfügbar sind, werden die angegebenen Verkaufspreise der Gesamtsysteme auf den Netto-Verkaufspreis des reinen KWK-Aggregats zurückgerechnet. Hierbei werden folgende Mehrkosten für spezifische, enthaltene KWK-Systemkomponenten angenommen, die vom angegebenen Netto-Preis abgezogen werden.

**Tabelle 12:** Angenommene Mehrkosten für spezifische KWK-Systemkomponenten<sup>11</sup>

	Zusatzheizgerät	Warmwassermodul	Pufferspeicher
Mehrkosten	2.500 EUR	1.000 EUR	1.500 EUR

Für eine allgemeingültige Aussage wurden die Netto-Verkaufspreise für das reine KWK-Aggregat weiterhin auf einen Brennstoffausnutzungsgrad von 100 % normiert. Da die wirtschaftliche Betrachtung auf Grundlage von Brutto-Preisen erfolgt, werden die vergleichbaren Netto-Investitionskosten des KWK-Aggregats um die Mehrwertsteuer in Höhe von 19 % erhöht. Die Division des normierten Brutto-Verkaufspreises des reinen KWK-Aggregats durch die zugehörige elektrische Leistung ergibt spezifische Investitionskosten für ein Mikro-KWK-Aggregat in Abhängigkeit der elektrischen Leistung und des Brennstoffausnutzungsgrades. Die aus den Rückmeldungen generierten spezifischen Brutto-Investitionskosten sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 33:** Normierte Brutto-Richtpreisfunktion für KWK-Aggregate bis 8 kW<sub>el</sub>

<sup>11</sup> Die Annahmen beruhen auf einer vergleichenden Gegenüberstellung der Umfrage-Rückmeldungen.

In Abbildung 33 ist eine Ausgleichsfunktion enthalten, die einen mathematischen Zusammenhang zwischen den berücksichtigten Umfrage-Rückmeldungen herstellt und als Grundlage für die wirtschaftliche Betrachtung der KWK-Systeme dient.

$$k_{IK,100\%} = 14,177 \frac{\text{Eur}}{\text{kW}} \frac{P_{el}^{-0,597}}{\text{kW}} \quad (10)$$

Daraus resultierend werden die Investitionskosten für das KWK-Aggregat durch das Produkt aus spezifischen Investitionskosten, elektrischer Leistung und Brennstoffnutzungsgrad beschrieben.

$$k_{IK,KWK,Agg} = k_{IK,100\%} P_{el} \eta_{Br} \quad (11)$$

Im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung erhöht sich die Gesamtinvestition des KWK-Systems um die Investitionskosten für einen Pufferspeicher und einen Spitzenlastkessel sowie um die Kostenanteile für die Montage und Installation. Die Investitionskosten für den Pufferspeicher werden relativ, in Abhängigkeit von der thermischen Leistung des KWK-Systems angenommen. Hierbei wird unterstellt, dass ein bereits vorhandener, kleiner Pufferspeicher des Heizungssystems des Referenzobjekts als funktionstüchtig angesehen wird und die Investitionskosten für den Pufferspeicher für das KWK-System somit als systembedingte Mehrkosten in Höhe von 100 EUR/kW angesehen werden. Die im Referenzobjekt installierte Heizung wird – analog zur Bewertung des Pufferspeichers – als funktionsfähig angesehen, sodass die eingebaute Heizung als Spitzenlastkessel arbeiten kann und keine weiteren systembedingten Mehrkosten erforderlich sind. Für die Montage und Installation des KWK-Systems werden 1.000 EUR als pauschale Kosten angenommen.

Die Summe der obigen Teilinvestitionskosten ergibt jene Investition, die für die kapitalgebundenen Kosten zugrunde gelegt werden. In Analogie zu den Investitionskosten der Dämmmaßnahmen werden die jährlichen, kapitalgebundenen Kosten über eine Annuität in Abhängigkeit von der technischen Nutzungsdauer bestimmt. Die technische Nutzungsdauer der KWK-Anlage wird wiederum in Anlehnung an den Entwurf der [VDI 2067] mit 15 Jahren für ein Blockheizkraftwerk angenommen und ist somit wesentlich kürzer als die Nutzungsdauer der Dämmmaßnahmen von 50 Jahren.

Durch den Einsatz eines KWK-Systems fallen betriebsgebundene Kosten für die Wartung und Instandsetzung an, die durch einen Vollwartungsvertrag abgedeckt werden können. Auf arithmetisch gemittelter Grundlage von [Büc11], [Mes11], [Ros11] und [Zie11] werden spezifische Vollwartungskosten in Höhe von  $k_{\text{Wartung}} = 3,25 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$  angenommen. Die resultierenden jährlichen, betriebsgebundenen Kosten ergeben sich somit aus dem Produkt der spezifischen Vollwartungskosten mit der abgegebenen, elektrischen Arbeit des eingesetzten Mikro-KWK-Systems.

Die verbrauchsgebundenen Kosten werden durch die jährlichen Strom- und Erdgasbezüge repräsentiert. Durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung steigt der Erdgasbezug des betrachteten Objekts an, doch neben der bereitgestellten thermischen Energie wird Strom zur Verfügung gestellt, der den Strombezug somit reduziert. Die verbrauchsgebundenen Kosten beinhalten auch mögliche Gewinne, die durch den Einsatz von KWK erwirtschaftet werden können, da die Einspeisung von überschüssigem Strom in das Netz rechtlich zugesichert ist.

Des Weiteren werden in §53 EnergieStG und in §98 EnergieStV die Möglichkeiten von Energiesteuerrückerstattungen geregelt. Für Erdgas beträgt die vollständige Energiesteuerrückerstattung  $0,55 \text{ Cent/kWh}_{\text{HS}}$ . Dieser Anspruch kann geltend gemacht werden, sofern es sich bei der installierten Anlage nachweislich um eine ortsfeste und begünstigte Anlage zur gekoppelten Bereitstellung von Kraft und Wärme handelt und ein Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % im Berichtszeitraum erreicht wird. Dies wird für die wirtschaftlichen Betrachtungen im Rahmen dieser Ausarbeitung als zutreffend angenommen.

Nach §4 Abs. 3 und 3a KWKG wird auf die bereitgestellte elektrische Energie des KWK-Systems – unabhängig davon, ob der Strom selbst genutzt oder eingespeist wird – die Entrichtung eines KWK-Zuschlags nach §7, Abs. 6 KWKG in Höhe von  $5,11 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$  für einen Zeitraum von zehn Jahren sowie die Vergütung der Verminderung der Netznutzung durch die dezentrale Einsparung gesetzlich festgelegt. Voraussetzung dafür ist, dass die Anlage hocheffizient ist, was für diese Ausarbeitung angenommen wird. Die Erlöse aus der vermiedenen Netznutzung sind je nach Anbieter und Region unterschiedlich, sodass wiederum nur ein Mittelwert angenommen werden kann. Laut [Mär11] liegt die spezifische Vergütung in einem Bereich von  $0,2 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$  bis  $1,5 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$ , das arithmetische Mittel dieses Bereiches wird als Grundlage für die weiteren Berechnungen angenommen und liegt bei  $0,85 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$ . Im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung wird der KWK-Bonus auf den Betrachtungszeitraum gleichmäßig umgelegt, was bei einer technischen Nutzungsdauer von 15 Jahren für das KWK-System einem KWK-Bonus von  $3,407 \text{ Cent/kWh}_{\text{el}}$  entspricht.

Auf Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung, der in ein Netz für die allgemeine Versorgung eingespeist wird, entfällt nach §4 Abs. 3 KWKG eine zuzügliche Vergütung in Höhe des üblichen Strompreises. Als üblicher Preis wird der durchschnittliche Preis für den Grundlaststrom, der sogenannten Baseload-Preis, an der Strombörse European Energy Exchange in Leipzig zum jeweils vorangegangenen Quartal vorgeschrieben. Da sich die Strombezugskosten auf das Jahr 2010 beziehen, kann nicht der aktuelle Baseload-Preis zugrunde gelegt werden. Der angesetzte Baseload-Preis wird durch das arithmetische Mittel der Baseload-Quartalspreise des Jahres 2010 gebildet [EEX11].

**Tabelle 13:** Baseload-Quartalspreise für das Bezugsjahr 2010

Quartal	01 / 2010	02 / 2010	03 / 2010	04 / 2010
Baseload-Preis in Cent/kWh <sub>el</sub>	4,102	4,152	4,381	5,149

Der resultierende mittlere übliche Preis des Jahres 2010 liegt bei 4,446 Cent/kWh<sub>el</sub> und wird für die weiteren Berechnungen angesetzt.

### 3.1.5.3 Kombinierte Darstellung

Die Betrachtung der Kombination von Dämmmaßnahmen und KWK-Systemen stellt den Hauptinhalt dieses Arbeitspaketes dar. Das Vorgehen baut auf den bereits dargestellten Grundlagen zur Kombination der Teilsysteme auf. Durch die einheitlich strukturierten Grundlagen der Wirtschaftlichkeit kann eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse und somit eine Kombinationsmöglichkeit angenommen werden.

Bei der Kombination werden die gesamten kapitalgebundenen Kosten durch die Summen der jeweiligen kapitalgebundenen Kosten gebildet. Da die betriebsgebundenen Kosten lediglich bei der Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung anfallen, bilden diese die gemeinsamen betriebsgebundenen Kosten. Die vertriebsgebundenen Kosten ergeben sich aus den resultierenden Erdgas- und Strombezügen und möglichen Stromeinspeisungen.

Eine belastbare Handlungsempfehlung zur Modernisierung eines realen Gebäudes sollte anhand einer eigenständigen energetischen Betrachtung und Bewertung des Gebäudes erfolgen. Die Aussagen dieser Arbeit beruhen auf theoretischen, verallgemeinerten Eigenschaften von Gebäuden und KWK-Systemen und können lediglich als Richtwerte interpretiert werden.

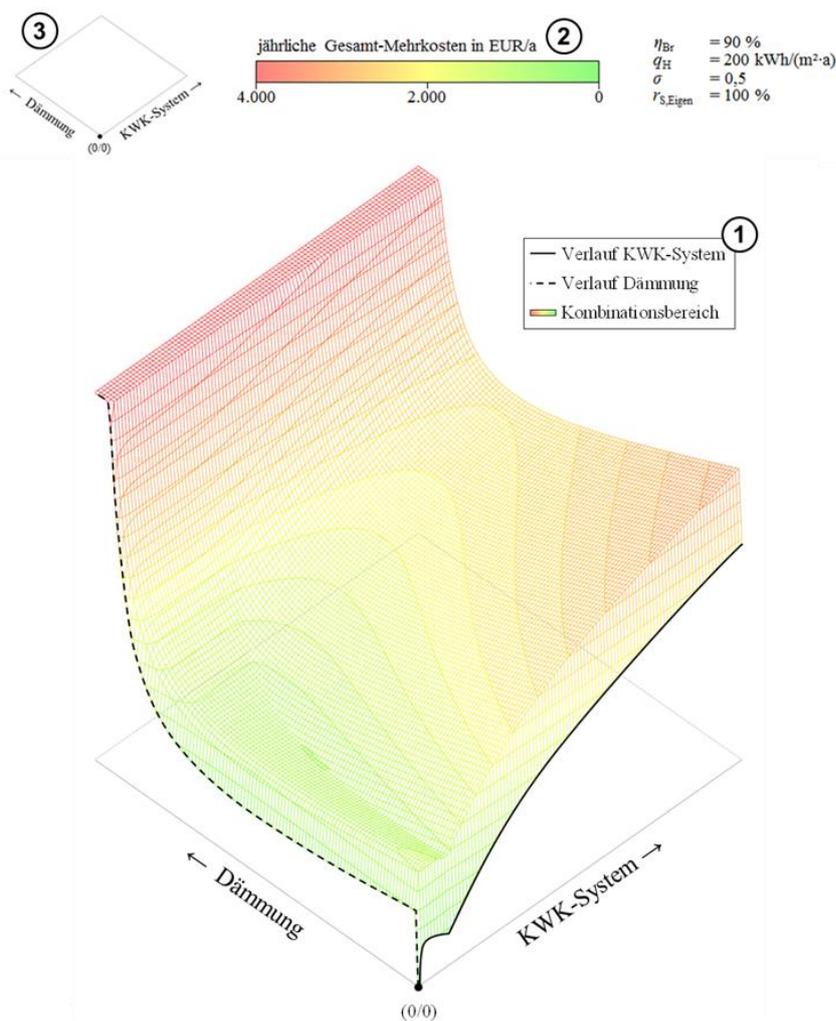
## 3.2 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Für die Herleitung der allgemeinen Aussagen dieser Arbeit werden die Ergebnisse in den folgenden Betrachtungen auf ein gleichbleibendes Referenzobjekt bezogen, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Die Grunddaten des Referenzgebäudes sind eine Wohnfläche von  $A_{WFL} = 115 \text{ m}^2$  und eine Anzahl an Bewohnern von  $n_{Pers} = 3$  Personen (jeweils in Anlehnung an [DVGW10]) sowie ein thermischer Wirkungsgrad des installierten Heizkessels – der wiederum auch als Jahresnutzungsgrad angesetzt wird – von  $\eta_{th} = 90 \%$ .

Die Bewertung der unterschiedlichen Betrachtungen erfolgt auf Grundlage der Variation unterschiedlicher spezifischer Einflussfaktoren. Zur Bestimmung, Erklärung und Veranschaulichung der allgemeinen Ergebnisse werden die Einflüsse unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten von Dämmmaßnahmen und KWK-Systemen jeweils graphisch dargestellt. Die Darstellungen werden für drei Beispielobjekte mit unterschiedlichen energetischen Bedarfen sowie unterschiedlichen KWK-System-Eigenschaften simuliert. Der spezifische Heizwärmebedarf wird unterschieden in  $q_H = 100, 200$  und  $300 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Die unterschiedlichen Heizwärmebedarfe korrelieren mit einem äquivalenten Zustand der energetischen Gebäudehülle und repräsentieren somit indirekt auch unterschiedliche Gebäudealtersklassen. Es werden weiterhin drei unterschiedliche Eigenschaften der eingesetzten KWK-Systeme simuliert, die sich nur durch die Stromkennzahl  $\sigma$  unterscheiden, da diese als primäre Eigenschaft von KWK-Systemen angesehen wird. Die Stromkennzahl wird metrisch von  $\sigma = 0,20, 0,50$  bis  $0,80$  variiert. Zur Maximierung der Vergleichbarkeit wird die Brennstoffausnutzung der unterschiedlichen theoretischen KWK-Anlagen durchgehend mit  $\eta_{Br} = 90 \%$  und der Stromeigennutzungsanteil mit  $r_{S,Eigen} = 50 \%$  angenommen. Die Auswirkungen der Variationen von bestimmten Einflussfaktoren werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 3.3) tiefergehend betrachtet.

Bei der Simulation wird die Dämmung in Abhängigkeit von der relativen Umsetzung der Dämmmaßnahmen aufgetragen. Sollte keine Dämmung eingesetzt werden, liegt der Grad der Umsetzung bei  $0 \%$ . Da die Reduzierung der variablen Verluste durch den Einsatz von Dämmmaterialien nur minimiert werden kann, liegt die maximale Umsetzung beim Grenzwert von  $\lim \rightarrow 100 \%$ . Im Gegensatz zu der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle können die betrachteten KWK-Systeme einen relativen Anteil der Heizlast von  $0$  bis  $100 \%$  abdecken.

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt auf Grundlage von Veränderungen in den zugehörigen Betrachtungsdiagrammen durch Variation von Eingangsparametern. Die folgende Abbildung zeigt eine vergrößerte Darstellung eines exemplarischen Diagramms der Auswertung (siehe auch Anhang A1).



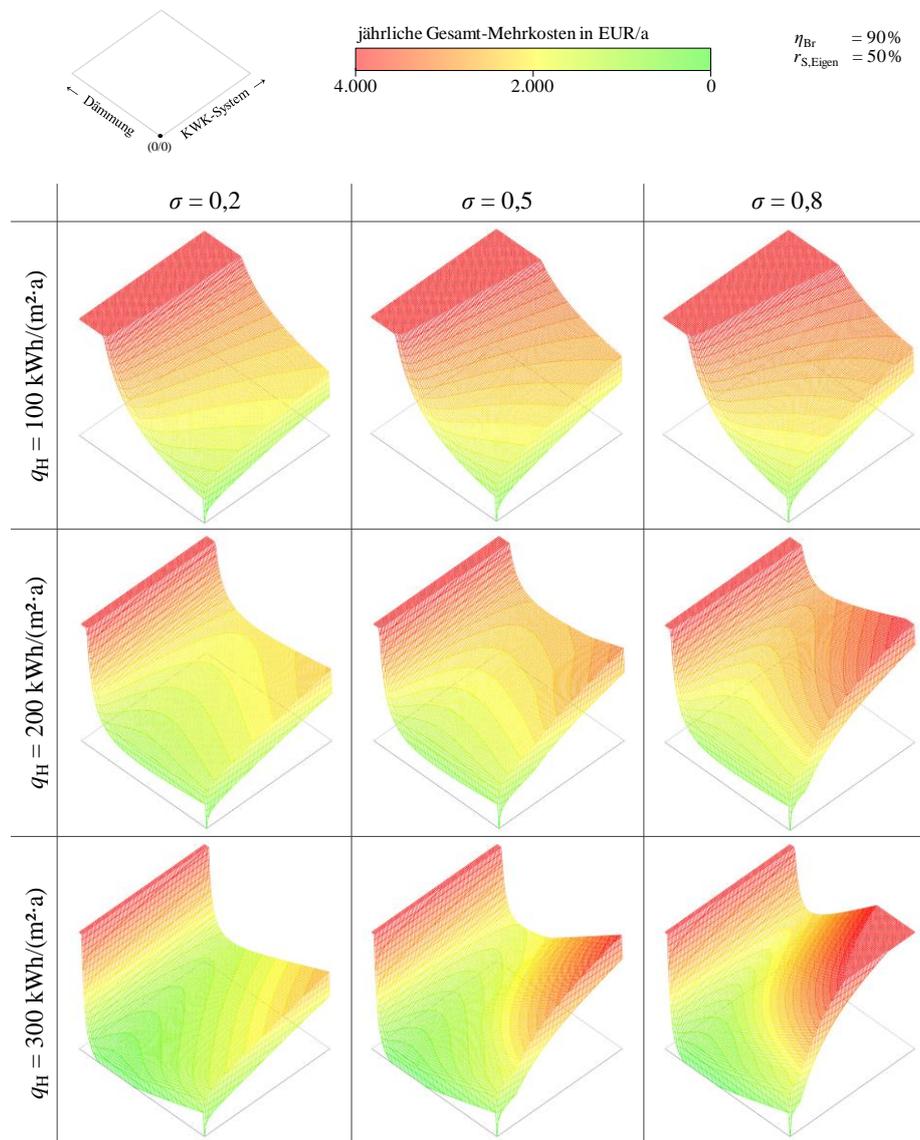
**Abbildung 34:** Exemplarische Darstellung eines Ergebnisdiagramms

Bei der Betrachtung der Seitenflächen der kombinierten Darstellung können die Funktionsverläufe der Maßnahmen unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Verläufe sind in der obigen Abbildung zur Veranschaulichung eingezeichnet (1). Bei den Diagrammen spiegelt die im oberen Bereich beschriftete Skala die Größenordnung der Darstellung wieder (2). Die beiden Achsen der Maßnahmen werden durch die wiederum im oberen Teil der Abbildung dargestellte

Betrachtungsweise des Diagramms definiert (3). Die zugehörigen relevanten Annahmen werden ebenfalls im oberen Bereich der Diagramme aufgeführt.

### 3.2.1 Wirtschaftliche Betrachtung

Die wirtschaftliche Betrachtung stellt die gesamten jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Referenzobjekt unter der Prämisse dar, dass sich sowohl die technischen Systeme als auch die energetische Gebäudehülle in einem funktionsfähigen Zustand befinden und somit ein Austausch nicht erforderlich ist.



**Abbildung 35:** Theoretische Verläufe von Kombinationen - jährliche Mehrkosten

Die obige graphische Darstellung der Ergebnisse zeigt die jährlichen Mehrkosten von verschiedenen Systemkombinationen auf. Die Ordinate deckt einen Bereich der jährlichen Gesamtkosten  $k_{\text{ges}}$  von 0 EUR/a bis 4.000 EUR/a ab. Sollten die Mehrkosten diesen Bereich verlassen, werden sie als Maximal- bzw. Minimalwert aufgetragen. Dies bedeutet, dass Bereiche mit höheren jährlichen Mehrkosten als 4.000 EUR/a als rote glatte Oberflächen zu erkennen sind. Für den Fall, dass die jährlichen Gesamtkosten geringer sind als jene des Referenzobjekts  $k_{\text{ges}} < 0$  EUR/a, so handelt es sich um Einsparungen, die eine Rentabilität und eine Wirtschaftlichkeit der Zusammenstellung im Nutzungszeitraum kennzeichnen. Für die verständlichere und übersichtliche Darstellung werden somit Einsparungen als grüne glatte Oberfläche dargestellt. Die absolute Abweichung – sowohl bei der Über- als auch Unterschreitung des Diagrammbereichs – kann dem Diagramm nicht entnommen werden und liegt nur im Rahmen der Berechnung vor.

### 3.2.1.1 Modernisierung der Gebäudehülle

Es ist zu erkennen, dass bei einem steigenden spezifischen Heizwärmebedarf  $q_H$  – was in dieser Betrachtung einer energetischen Verschlechterung der Gebäudehülle des Referenzobjekts entspricht – die jährlichen Mehrkosten der Dämmmaßnahmen sinken. Dies ist direkt ersichtlich, da die möglichen Einsparungen, die durch die Verbesserung der energetischen Gebäudehülle realisiert werden können, bei hohen thermischen Bedarfen größer sind als bei niedrigen thermischen Bedarfen. Bei steigendem spezifischem Heizwärmebedarf  $q_H$  bildet sich bei der Funktion der jährlichen Gesamtkosten ein stetig größer werdendes Tal. Dieses Tal resultiert aus dem relativ hohen Anteil der Fixkosten an der Investition für die Dämmung – dieser Anteil wird durch den Sprung vom Punkt (0/0) zum ersten Wert der Umsetzung deutlich –, da sich der Einfluss der Fixkosten bei niedrigeren relativen Umsetzungen  $r_D$  maßgeblicher bemerkbar macht, als bei höheren relativen Umsetzungen  $r_D$ . Bei einem sehr hohen Umsetzungsgrad der Dämmmaßnahmen ist eine weitere Optimierung des Wärmedurchgangs nur durch eine enorme Erhöhung der Dämmstärke realisierbar, was in Kombination mit den variablen Kosten des Dämmmaterials mit einer ökonomischen Verschlechterung korreliert. Weiterhin lässt sich erkennen, dass sich die Umsetzung der Dämmmaßnahmen bei einem spezifischen Heizwärmebedarf von  $q_H = 300$  kWh/(m<sup>2</sup>·a) in einem Bereich von  $r_D = 57$  % bis 84 % rentieren und somit wirtschaftlich sind. Das Optimum befindet sich bei einem relativen Anteil der Umsetzung von  $r_D = 74$  % und korreliert – unter Berücksichtigung der kapital- sowie verbrauchsgebundenen Kosten – mit einer jährlichen Einsparung von  $k_{\text{ges}} = -119$  EUR/a. Der Übergang zur Wirtschaftlichkeit der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle liegt – unter Annahme des

definierten Referenzobjekts – bei  $q_H \approx 286 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  sowie einem relativen Anteil der Umsetzung von  $r_D = 73 \%$ .

### 3.2.1.2 Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass eine Wirtschaftlichkeit für den Einsatz von Mikro-KWK-Systemen im Referenzobjekt zum jetzigen Zeitpunkt unabhängig von der KWK-Technologie – repräsentiert durch die Stromkennzahl  $\sigma$  – und der energetischen Gebäudehülle – dargestellt durch den spezifischen Jahreswärmebedarf  $q_H$  – nicht erreicht wird, da die absoluten Investitionskosten für ein KWK-Modul im kleinen Leistungsbereich zu hoch sind. Der dargestellte Verlauf der Funktion der jährlichen Mehrkosten liefert jedoch einige wichtige Erkenntnisse für die Planung und die Dimensionierung von KWK-Anlagen.

Die Funktion der jährlichen Gesamt-Mehrkosten zeichnet sich vor allem durch eine Unstetigkeit in ihrem Verlauf aus, die in Abbildung 35 am deutlichsten bei der Kombination aus hoher Stromkennzahl  $\sigma$  und hohem spezifischem Heizwärmebedarf  $q_H$  zu erkennen ist. Diese stellt zwar – bei diesen Rahmenbedingungen – kein wirtschaftliches Optimum dar, sollte jedoch aufgrund der Auffälligkeit genauer betrachtet und erläutert werden. Der Knickpunkt stellt den Übergang von anteiliger Stromeigennutzung in Abhängigkeit von  $r_{S,Eigen}$  zur kompletten Stromeinspeisung dar. Sowohl der selbstgenutzte als auch der eingespeiste KWK-Strom erhalten die zugesicherten Zuschüsse des KWKG. Durch die Eigennutzung des KWK-Stroms werden die Strombezugskosten in Höhe von  $k_S = 23,4 \text{ Cent}/\text{kWh}_{el}$  vermieden. Der in das öffentliche Netz eingespeiste KWK-Strom wird lediglich mit dem Baseload-Preis von  $4,446 \text{ Cent}/\text{kWh}_{el}$  vergütet, was wesentlich niedriger ist und somit einen geringeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit ausübt. Einen weiteren großen Einflussfaktor beschreibt die Laufzeit des KWK-Systems. Durch die Erhöhung des relativen Anteils der KWK-Anlage an der Heizlast erhöht sich die abgegebene thermische Arbeit nur noch marginal und die Vollastbetriebsstunden des KWK-Aggregats reduzieren sich. Trotz der Verminderung der spezifischen Investitionskosten – aufgrund der nun höheren elektrischen Anlagenleistung – führt die Erhöhung des relativen Anteils des KWK-Systems  $r_{KWK}$  jedoch weiterhin zu einem steigenden absoluten Preis der gesamten KWK-Anlage, was sich in Summe – da es sich noch immer um relativ kleine KWK-Systeme handelt – nicht rentiert.

Die Position und die Ausbildung der nicht differenzierbaren Stelle wird sowohl von der Stromkennzahl  $\sigma$  als auch von dem spezifischen Heizwärmebedarf  $q_H$  des Gebäudes – in den in Abbildung 35 aufgeführten Darstellungen – maßgeblich

beeinflusst. Die Position der Unstetigkeit verschiebt sich mit zunehmendem, spezifischem Heizwärmebedarf  $q_H$  in Richtung einer kleineren relativen thermischen Leistung des KWK-Systems  $r_{KWK}$ , weil die absolute thermische Leistung des Systems  $Q_{KWK}$  nahezu konstant bleibt, um die benötigte Menge KWK-Strom zur Abdeckung des Eigenbedarfs des Objekts  $W_{el,Eigen}$  bereitzustellen. Das gleiche Phänomen lässt sich bei einer steigenden Stromkennzahl  $\sigma$  beobachten. Unter der Annahme, dass eine bestimmte elektrische Leistung  $P_{el}$  zur Deckung des Eigenbedarfs  $W_{el,Eigen}$  ausreicht, reduziert sich folglich die absolute thermische Leistung  $Q_{th}$  des Systems mit steigender Stromkennzahl  $\sigma$ . Weiterhin wird die Ausbildung der Unstetigkeit bei steigender Stromkennzahl  $\sigma$  immer markanter, was durch die steigende Gewichtung der Strombereitstellung dieser KWK-Systeme begründet werden kann. Bei kleinen Stromkennzahlen  $\sigma$  und niedrigen spezifischen thermischen Heizbedarfen  $q_H$  wird die gesamte elektrische Deckung des betrachteten Objekts nicht erreicht, sodass sich kein Knickpunkt ausbildet. Die Bedeutung dieser Unstetigkeitsstelle – sofern sie vorhanden ist – als teilwirtschaftliches Optimum und somit anzustrebende bestmögliche Auslegung wird im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung durch die Variation der Eingangsparameter begründet und weiter verdeutlicht.

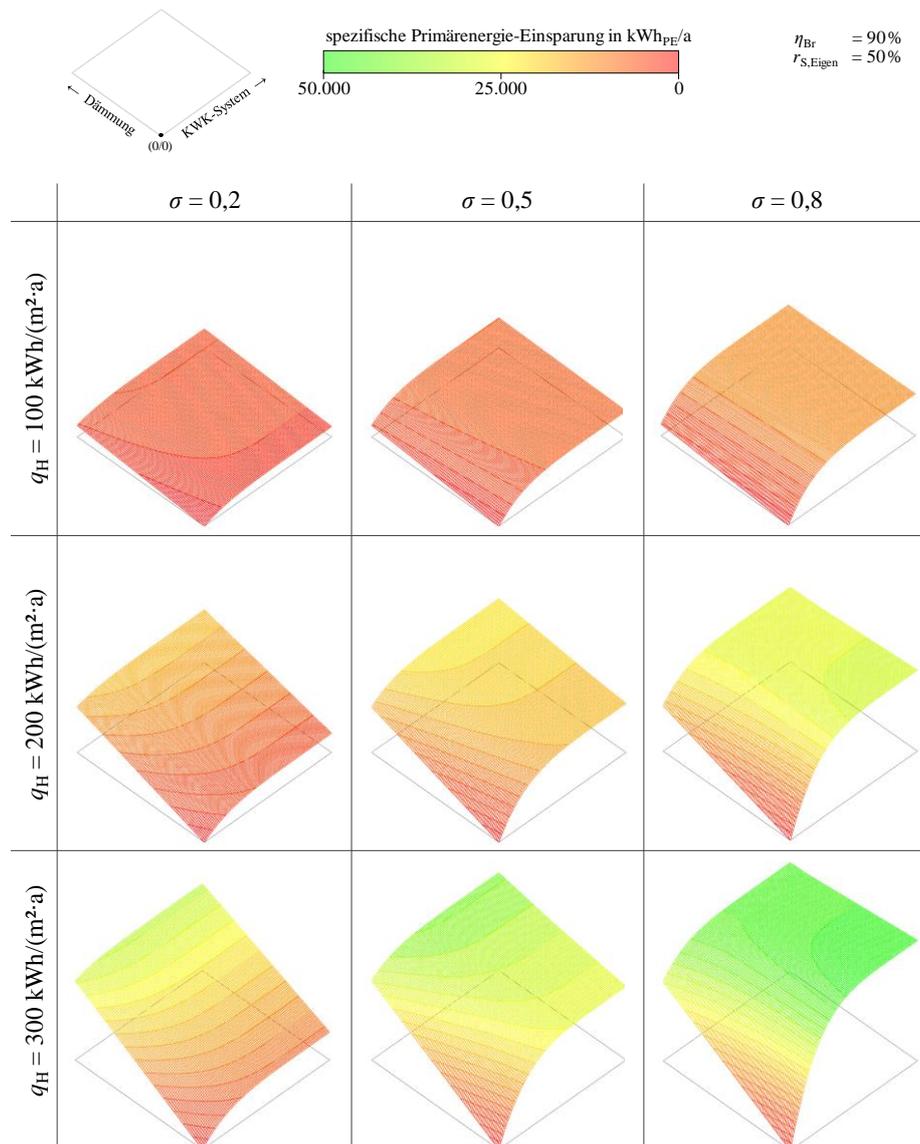
Die Funktion enthält weiterhin einen zweiten Knickpunkt, der aufgrund der relativ geringen Unterschiede beim Übergang quasi nicht erkennbar ist. Dieser resultiert aus dem Übergang vom relativen, als konstant angesehenen thermischen Leistungsanteil für die Warmwasserbereitung  $r < r_{min}$  zum Verlauf der Jahresdauerlinie  $r > r_{min}$ . Da sich der variable Anteil der Jahresdauerlinie dem fixen Anteil für Warmwasser nahezu asymptotisch nähert, ist die Ausbildung dieser Unstetigkeit nicht sichtbar.

### 3.2.1.3 Kombination der Maßnahmen

Die Kombination aus energetischer Gebäudehüllensanierung und dem Einsatz von KWK-Technologie ist – mit Verweis auf die Herleitung der Ergebnisse und die Annahmen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen – derzeit ökonomisch nicht rentabel. Bei der anteiligen Umsetzung beider Maßnahmen fallen sowohl die Fixkosten der Dämmung als auch die Fixkosten der KWK-Anlage an und konterkarieren somit eine potenzielle Wirtschaftlichkeit. Dies wird besonders durch die Betrachtung der Frontflächen des Diagramms (Abbildung 35) deutlich. Der Übergang von  $r_i = 0\%$  zu  $r_i = 1\%$  sieht in der dreidimensionalen Darstellung wie eine Fläche aus. Die Höhe dieser Fläche wird primär durch die fixen Anteile der Kosten verursacht.

### 3.2.2 Primärenergetische und ökologische Betrachtung

Die folgende Abbildung stellt die primärenergetischen Einsparpotenziale in den betrachteten Referenzobjekten und unter Einfluss unterschiedlicher Technologie-Varianten dar.

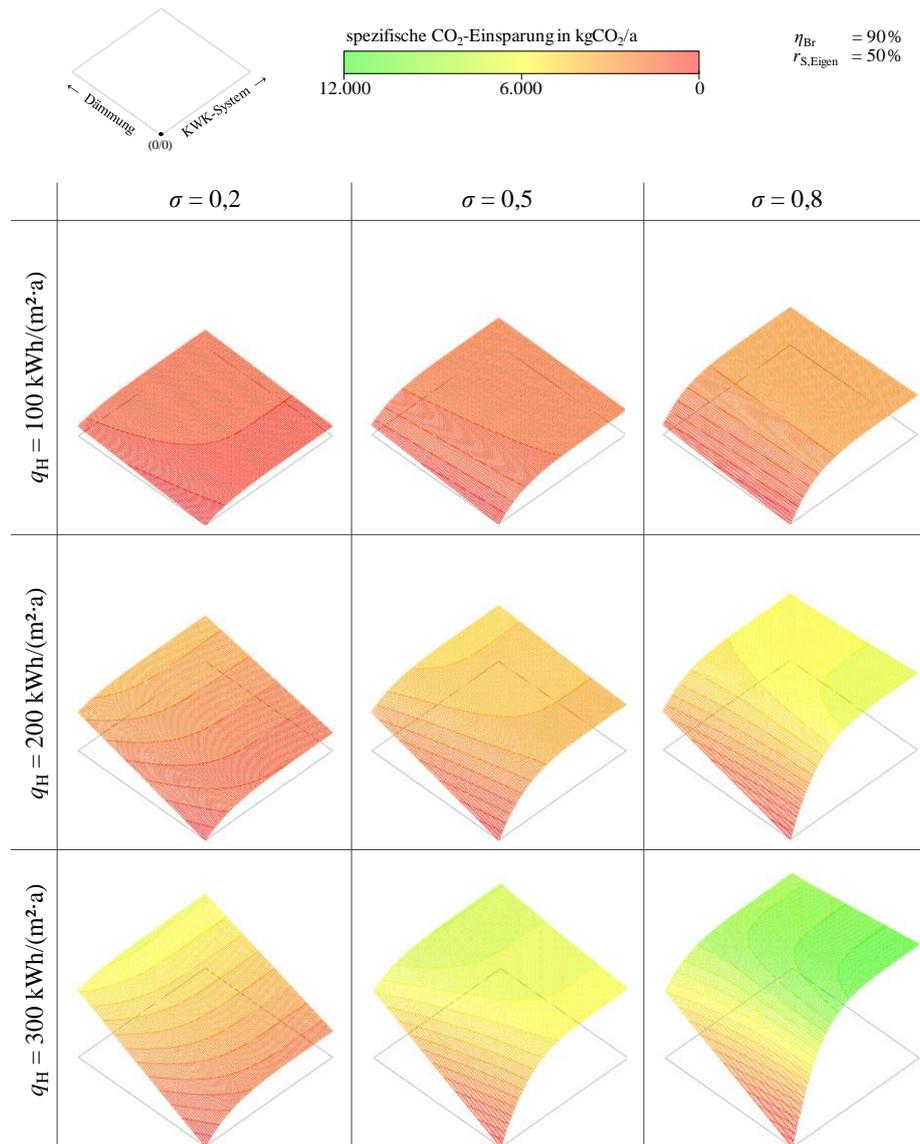


**Abbildung 36:** Theoretische Verläufe von Kombinationen - Primärenergie-Einsparung

Die graphischen Verläufe sowie die Auswertung der CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale im Rahmen der ökologischen Betrachtung beruhen auf den gleichen Grundsätzen

wie die Primärenergiefaktoren und werden daher zusammen in diesem Kapitel betrachtet und analysiert.

Die ökologische Darstellung beinhaltet die absoluten CO<sub>2</sub>-Einsparungen in Abhängigkeit von der Zusammenstellung der Modernisierungen im Bereich der energetischen Gebäudehülle und dem Einsatz von KWK.



**Abbildung 37:** Theoretische Verläufe von Kombinationen - CO<sub>2</sub>-Einsparung

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, liegt der Primärenergiefaktor von Strom derzeit bei  $f_{PE,S,dt.Mix} = 2,6$  für den deutschen Strommix und bei  $f_{PE,S,fossil} = 3,0$  für die Strombereitstellung aus fossil befeuerten Kraftwerken, was ein großes Potenzial

beinhaltet, da der Erdgasbezug lediglich mit einem Primärenergiefaktor von  $f_{PE,EG} = 1,1$  bewertet wird. In Analogie zur Primärenergieeinsparung werden bei den CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzialen unterschiedliche Emissionsfaktoren  $e_{CO_2,i}$  zu Grunde gelegt. Die spezifischen Emissionen des deutschen Strommix liegen bei  $e_{CO_2,dt.Mix} = 563$  g CO<sub>2</sub>/kWh und für Erdgas bei  $e_{CO_2,EG} = 202$  g CO<sub>2</sub>/kWh. Aus dem Verhältnis der Primärenergiefaktoren (siehe Kapitel 3.1.1) folgen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die fossile Strombereitstellung in Höhe von  $e_{CO_2,fossil} = 650$  g CO<sub>2</sub>/kWh. Die Verhältnisse der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind sehr ähnlich zu jenen der Primärenergiefaktoren.

### 3.2.2.1 Modernisierung der Gebäudehülle

Bei der Betrachtung der Funktionsverläufe der Primärenergie- als auch der CO<sub>2</sub>-Einsparung für die Umsetzung der Dämmmaßnahmen fällt direkt der lineare Verlauf dieser Funktionen ins Auge (Abbildung 37). Dieser liegt darin begründet, dass die Funktion der Einsparung über den relativen Anteil der Umsetzung der Dämmmaßnahmen  $r_D$  aufgetragen wird und dieser relative Anteil der Reduzierung der variablen Wärmeverluste um eben diesen Anteil entspricht. Die Reduzierung eines thermischen, in diesem Fall variablen, Bedarfs ist direkt mit einer Einsparung verknüpft, was den linearen Verlauf zur Folge hat. Die Einsparung ist dementsprechend bei maximaler Umsetzung der Dämmung  $r_D = \lim \rightarrow 100\%$  am höchsten. Da auch bei einem zunehmenden spezifischen Heizwärmebedarf der fixe Anteil der thermischen Bedarfe konstant bleibt, erhöht sich folglich der variable Anteil, der wiederum durch die Dämmmaßnahmen reduziert werden kann. Daher steigt das Einsparpotenzial mit steigendem spezifischem Heizwärmebedarf  $q_H$  des Objekts an. Da es sich ausschließlich um die Betrachtung der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle handelt, hat die Stromkennzahl  $\sigma$  eines möglichen KWK-Moduls keinen Einfluss auf die Funktionsverläufe.

### 3.2.2.2 Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung

Im Gegensatz zur reinen Dämmung zeichnet sich die Funktion für die alleinige Umsetzung eines KWK-Systems durch einen sich asymptotisch an einen Extremwert nähernden Verlauf aus. Dies liegt darin begründet, dass der relative Anteil des KWK-Einsatzes  $r_{KWK}$  nicht proportional zu einer resultierenden Einsparung ist. Dies wiederum resultiert aus dem Bezug zur genutzten Jahresdauerlinie nach Sochinsky (siehe Kapitel 3.1.3), weil die zeitlichen thermischen Anforderungen in kleinen relativen Leistungsbereichen höher sind als in Regionen der Heizlast  $r_{KWK} = 100\%$ . Somit kann durch den Einsatz einer kleinen relativen

Leistung des KWK-Systems  $r_{\text{KWK}}$  bereits ein großer Teil des Wärmebedarfs  $Q_{\text{ges}}$  abgedeckt werden, was mit einer hohen Einsparung korreliert, da bei der Wärmebereitstellung auch Strom als Kopplungsprodukt zur Verfügung gestellt wird. Die weitere Anhebung des relativen Anteils des KWK-Systems  $r_{\text{KWK}}$  führt zu einer stetig geringer werdenden Erhöhung des thermischen Deckungsgrads  $\varepsilon_{\text{KWK}}$ , also einer nur marginal steigenden Erhöhung der Wärmebereitstellung  $Q_{\text{KWK}}$  und somit nur zu geringfügig höheren Primärenergie-Einsparungen. Der zu erreichende Extrempunkt ist im Normalfall – hierbei wird unterstellt, dass die gekoppelten Eigenschaften eines KWK-Systems besser sind als jene des verbauten Heizkessels – beim maximalen Grad der Umsetzung  $r_{\text{KWK}} = 100\%$  zu finden.

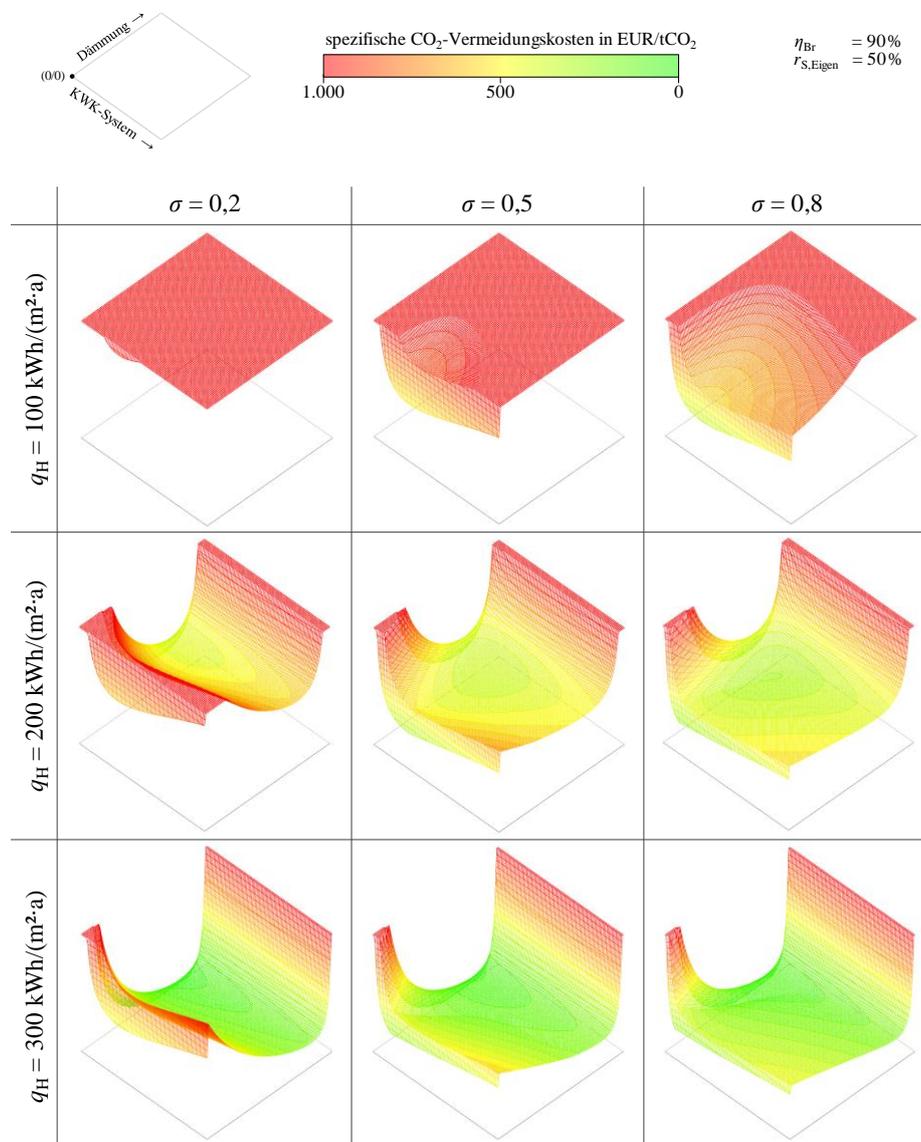
### 3.2.2.3 Kombination der Maßnahmen

Ein absolutes Einsparoptimum für die anteilige Umsetzung von Dämmmaßnahmen in Kombination mit dem Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung stellt sich in Abhängigkeit von der Stromkennzahl  $\sigma$  des KWK-Systems ein. Hierbei liegt die maximale Einsparung im Normalfall immer bei kompletter Umsetzung des KWK-Systems  $r_{\text{KWK}} = 100\%$ . Ob der Einsatz einer Dämmmaßnahme in Kombination mit einem KWK-System Vorteile ergibt, ist abhängig von der Stromkennzahl  $\sigma$ , da bei hohen Stromkennzahlen die Strombereitstellung effizienter ist als jene des deutschen Strommix, sodass eine möglichst hohe Laufzeit und KWK-Strombereitstellung angestrebt werden sollte. Der Wendepunkt, an dem es sinnvoller ist nicht zu dämmen, liegt für die Primärenergieeinsparung bei diesen Annahmen bei einer Stromkennzahl von  $\sigma = 0,77$ . Dieser Übergang unterscheidet sich von dem der Minimierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen des Referenzobjekts. Dieser liegt bei  $\sigma = 0,69$  und ist rund zehn Prozent kleiner, was durch die leicht unterschiedlichen Verhältnisse der Primärenergiefaktoren und spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen untereinander begründet werden kann. Der Wendepunkt wird weiterhin stark von den zugrunde gelegten Primärenergiefaktoren und den spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen beeinflusst. Die Übergänge ändern sich nur marginal durch die Änderungen des spezifischen Heizwärmebedarfs  $q_{\text{H}}$  des Objekts. Diese Verschiebung resultiert aus einer nicht differenzierbaren Stelle innerhalb der KWK-Funktion (Abbildung 37), deren Auswirkungen aufgrund der geringfügigen Ausbildung des Knicks sehr klein sind, da die Reduzierung des Primärenergiebedarfs und der  $\text{CO}_2$ -Emissionen beim Übergang der Stromeigennutzung zur Einspeisung aufgrund der Substitution der fossilen Kraftwerkskapazitäten zunimmt. Diese Zunahme ist wiederum vom Stromeigennutzungsanteil  $r_{\text{S,Eigen}}$  abhängig und liegt bei einem maximalen

relativen Unterschied von rund zwölf Prozent. Im Sinne der maximalen Einsparung – auf Grundlage der angenommenen Bilanzierungen – liegt das anzustrebende ökologische sowie primärenergetische Optimum bei  $r_{S,Eigen} = 0\%$ , da hier der gesamte bereitgestellte KWK-Strom die fossile Kraftwerksleistung substituiert.

### 3.2.3 Wirtschaftlich-ökologische Betrachtung

Aufgrund der aktuellen politischen Relevanz beschränkt sich die kombinierte Betrachtung von Wirtschaftlichkeit und Einsparpotenzialen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die dargestellten Ergebnisse unterscheiden sich primär in den verwendeten Einheiten, da eine direkte Abhängigkeit besteht.



**Abbildung 38:** Theoretische Verläufe von Kombinationen - CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Diese Auswertung wird explizit für die Vermeidungskosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet, da zum einen die primärenergetischen Verläufe und Schlussfolgerungen ähnlich wären und zum anderen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aktuell einen politisch sehr hohen Stellenwert besitzen und somit von primärem Interesse sind. Die Vermeidungskosten werden als Verhältnis der jährlichen Mehrkosten zu den absoluten jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen definiert.

Bei der obigen Abbildung muss beachtet werden, dass sich der Bezugspunkt nicht frontal, sondern an der linken Seite befindet. Dies ist notwendig, da die wesentlichen Ergebnisse sonst nur schwer zu erkennen wären. Auf der Ordinate sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten  $k_{\Delta\text{CO}_2}$  von 0 EUR/t CO<sub>2</sub> bis 1.000 EUR/t CO<sub>2</sub> aufgetragen, um eine übersichtliche Darstellung zu erhalten. Bei der Überschreitung dieses Bereichs werden die spezifischen Vermeidungskosten mit 1.000 EUR/t CO<sub>2</sub> angesetzt, was sich in einem glatten Bereich der Oberfläche zeigt. Diese Bereiche werden aufgrund der hohen Kosten als uninteressant betrachtet und somit nicht in der Darstellung berücksichtigt. Die gewählte Darstellung ermöglicht nur schwerlich einen Blick auf den Funktionsverlauf der Dämmmaßnahmen. Der Darstellung des Kombinationsbereiches kommt in dieser Betrachtung eine erhöhte Aufmerksamkeit zu. Diese Bewertung stellt einen Zusammenhang zwischen den wirtschaftlichen und ökologischen Ergebnissen der vorherigen Kapitel dar. Die Wertung dieser Ergebnisse birgt ein gewisses Risiko, da eine Aussage über die absolute CO<sub>2</sub>-Einsparung oder die gesamten jährlichen Mehrkosten aufgrund der relativen Angaben nicht direkt abgeleitet werden können.

### 3.2.3.1 Modernisierung der Gebäudehülle

Wie bereits bei den vorangegangenen Einzelbetrachtungen der Dämmmaßnahmen wird die Plausibilität dadurch unterstrichen, dass die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten unabhängig von den simulierten Stromkennzahlen  $\sigma$  einer potenziellen KWK-Anlage sind. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung (Abbildung 38) bildet sich ein Tal im Funktionsverlauf aus, was in Kombination mit dem linearen Verlauf der Einsparungen zu einer Verschiebung des Tals in Richtung einer höheren anteiligen Umsetzung der Dämmmaßnahmen  $r_D$  führt. Die Tendenz, dass ein steigender spezifischer Heizwärmebedarf  $q_H$  für die Umsetzung von Dämmmaßnahmen von Vorteil ist, wird auch in der Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ersichtlich.

### 3.2.3.2 Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung

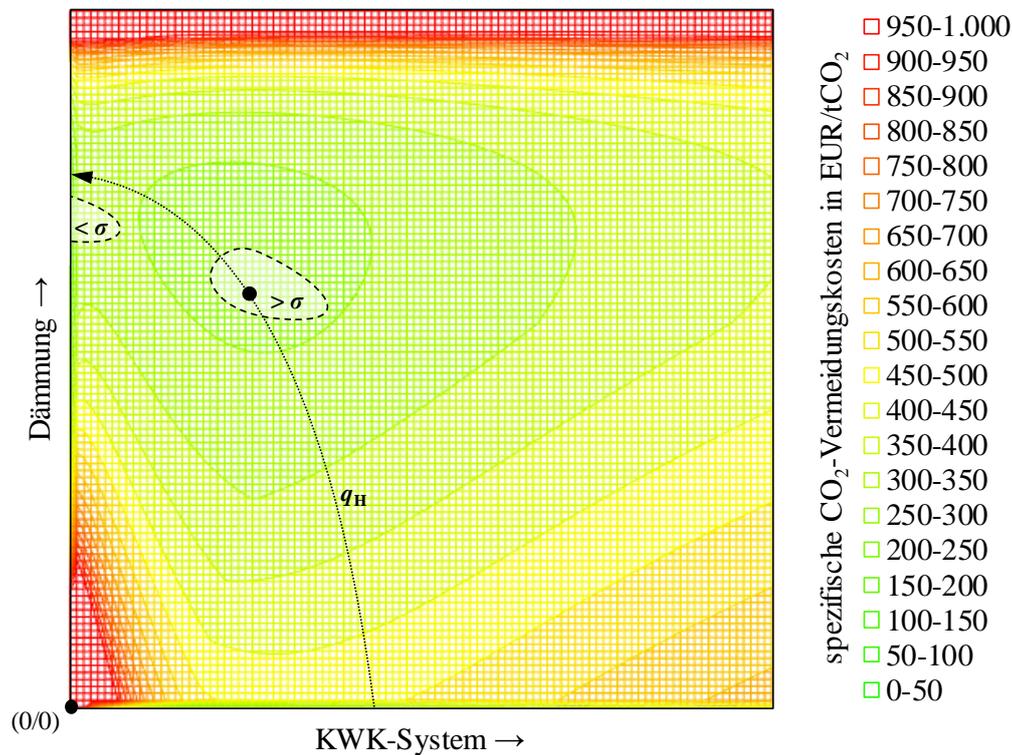
Der Funktionsverlauf der alleinigen relativen Implementierung eines KWK-Systems  $r_{\text{KWK}}$  ist aus den Darstellungen besser erkennbar. Bei kleinen Stromkennzahlen  $\sigma$  sind vor allem die Investitionskosten für die resultierende geringe Einsparung an  $\text{CO}_2$  deutlich zu hoch, sodass ein wirtschaftlich-ökologischer Betriebspunkt nicht erreicht werden kann.

Die Charakteristika sowohl der wirtschaftlichen als auch der ökologischen Funktionsverläufe stechen deutlich hervor. Der Übergang von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung wird wiederum bei höheren spezifischen Heizwärmebedarfen  $q_{\text{H}}$  und steigenden Stromkennzahlen  $\sigma$  deutlich. Bereits bei diesen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird ein lokales Minimum im Funktionsverlauf deutlich. Dieses Optimum liegt in einem relativ kleinen Bereich der Umsetzung  $r_{\text{KWK}}$ , da hier verhältnismäßig viel  $\text{CO}_2$  durch den Einsatz begrenzter finanzieller Mittel eingespart werden kann.

### 3.2.3.3 Kombination der Maßnahmen

Im Gegensatz zu den vorherigen Betrachtungen stellt sich bei der wirtschaftlich-ökologischen Betrachtung ein lokales Minimum im Kombinationsbereich beider Technologien ein. Wie in Abbildung 38 erkennbar, stellt dieses jedoch nicht das absolute Minimum dar. Dieses liegt entweder bei hohen spezifischen Heizwärmebedarfen  $q_{\text{H}}$  im Tiefpunkt des Tals der Dämmmaßnahmenfunktion, oder im Bereich des Übergangs von KWK-Stromeigennutzung zu -einspeisung bei der Funktion der KWK. Hierdurch wird die bereits aufgezeigte Bedeutung der markanten Unstetigkeitsstelle unterstrichen.

Die folgende Abbildung stellt eine Draufsicht des obigen Diagramms für einen spezifischen Heizwärmebedarf des Objekts von  $q_{\text{H}} = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  und ein angenommenes KWK-System mit einer Stromkennzahl von  $\sigma = 0,5$  dar. Weiterhin wird unterstellt, dass der Stromeigennutzungsanteil bei  $r_{\text{S,Eigen}} = 50 \%$  liegt. Diese Darstellung beinhaltet die Verläufe der Kernaussagen in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmebedarfs  $q_{\text{H}}$  und der Stromkennzahl  $\sigma$ , die nachfolgend erläutert werden



**Abbildung 39:** Draufsicht des theoretischen Verlaufs - CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Bei dieser Bewertung wird angenommen, dass eine Kombination zwingend erforderlich ist, da das absolute Optimum außerhalb des Kombinationsbereichs liegt. Der eingezeichnete Verlauf  $q_H$  stellt die Entwicklung der Optima unter der Annahme einer gleichbleibenden Stromkennzahl von  $\sigma = 0,5$  bei der Variation des spezifischen Heizwärmebedarfes  $q_H$  dar. Bei niedrigen spezifischen Bedarfen  $q_H$  ist eine Dämmung bei der wirtschaftlich-ökologischen Analyse nicht sinnvoll, da die geringen Einsparungen einem hohen Aufwand gegenüberstehen. Bei steigenden Bedarfen entwickelt sich ein Optimum aus einem immer geringer werdenden KWK-Anteil  $r_{KWK}$ , der einem immer größer werdenden Grad der Umsetzung der Dämmmaßnahmen  $r_D$  gegenübersteht. Bei hohen Heizwärmebedarfen ist die Einsparung der Dämmung im Vergleich zu den Kosten so enorm, dass eine weitere Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch ein KWK-System – bei einer Stromkennzahl von  $\sigma = 0,5$  – lediglich eine Verschlechterung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zur Folge hätte.

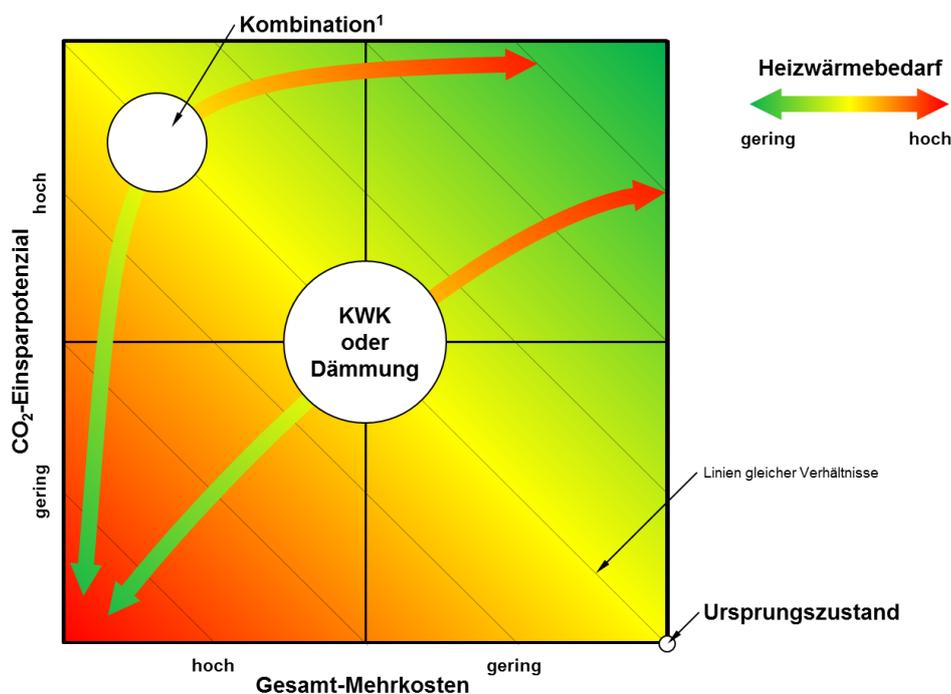
Die dargestellten Kennfelder für die Variation der Stromkennzahl  $\sigma$  zeigen jene Kombinationsparameter, die aus einer Variation der Stromkennzahl  $\sigma$  resultieren. Die Darstellung gilt wiederum nur für einen spezifischen Heizwärmebedarf von  $q_H = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  und steht somit nur im Punkt des Optimums dieser

Darstellung in Zusammenhang mit dem bereits erläuterten Verlauf  $q_H$ . Die Kennfelder teilen sich in zwei unterschiedliche Bereiche auf, was an den bereits aufgeführten Phänomenen liegt. Das linke Feld beschreibt Stromkennzahlen  $\sigma < 0,37$ , wobei das KWK-System zwar CO<sub>2</sub>-Einsparungen liefert, die aber in Bezug auf die zugehörigen Kosten nicht wirtschaftlich-ökologisch rentabel sind. Das rechte Feld  $\sigma \geq 0,37$  zeigt die sinnvolle Kombination aus Dämmmaßnahme und Kraft-Wärme-Kopplung. Der Grad der Umsetzung der Dämmung bewegt sich hier in einem Bereich von  $58 \% < r_D < 68 \%$ . In einem Bereich von  $0,37 > \sigma > 0,7$  liegen die Optima zur Umsetzung im Bereich von  $22 \% < r_{KWK} < 28 \%$ . Bei höheren Stromkennzahlen  $\sigma > 0,7$  kann – auf Grundlage eines konstanten spezifischen Heizwärmebedarfs  $q_H$  – festgestellt werden, dass der relative Anteil an der Heizlast  $r_{KWK}$  mit steigender Stromkennzahl  $\sigma$  sinkt.

In der dargestellten Abbildung –  $q_H = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,  $\sigma = 0,5$ ,  $r_{S,Eigen} = 50 \%$  – liegt das kombinierte, lokale Optimum bei einem relativen Anteil der Umsetzung der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle von  $r_D = 66 \%$  und einem relativen Anteil der KWK-Umsetzung von  $r_{KWK} = 25 \%$ . Die minimalen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten liegen bei  $k_{\Delta\text{CO}_2} = 356 \text{ EUR}/\text{t CO}_2$  und stellen nicht das absolute Optimum dar. Die alleinige Umsetzung der Dämmmaßnahmen von  $r_D = 67 \%$  korreliert mit CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in Höhe von  $k_{\Delta\text{CO}_2} = 263 \text{ EUR}/\text{t CO}_2$ , die das wirtschaftlich-ökologische Optimum repräsentieren. KWK-Systeme erreichen im Optimum spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von  $k_{\Delta\text{CO}_2} = 307 \text{ EUR}/\text{t CO}_2$  bei einer relativen Umsetzung von  $r_{KWK} = 28 \%$ .

Eine vereinfachte Darstellung der wirtschaftlich-ökologischen Ergebnisse ist in Abbildung 40 aufgezeigt. In der Entscheidungsmatrix sind die CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale, die äquivalent zu einer Primärenergieeinsparung gesehen werden können, gegenüber den Gesamt-Mehrkosten einer energetischen Maßnahme aufgetragen. Die waagerechte Bezeichnung stellt ein qualitatives Maß der Gesamt-Mehrkosten – diese beinhalten kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundene Kosten – dar. Auf der senkrechten Seite ist das absolute CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial wiederum qualitativ aufgetragen. Die untere linke Ecke beschreibt die schlechteste Option, wohingegen die obere rechte Ecke die beste Entscheidung, also das absolut wirtschaftlich, ökologische Optimum darstellt. Das Feld oben links zeigt ein hohes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial, welches mit hohen Gesamt-Mehrkosten verbunden ist. Im Gegensatz hierzu stellt das Feld unten rechts ein geringes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial bei ebenfalls geringen Gesamt-Mehrkosten dar. Das Verhältnis, also die relative Darstellung der wirtschaftlich-ökologischen Ergebnisse, von absoluter CO<sub>2</sub>-Einsparung zu den korrelierenden Gesamt-Mehrkosten sind somit identisch. Diese in diesem Kapitel bereits aufgezeigte

Problematik der relativen Wertung der wirtschaftlich-ökologischen Aussagen kann in der Darstellung der Entscheidungsmatrix umgangen werden. Die Linie gleicher Verhältnisse ist zur Vereinfachung der Beurteilung der Darstellung in der Abbildung eingefügt. Die eingezeichneten weißen Flächen stehen repräsentativ für die unterschiedlichen Entscheidungsmöglichkeiten. Die dargestellten Pfeile mit dem Farbverlauf symbolisieren die Verschiebung der weißen Flächen in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs eines Objekts. Ein hoher Heizwärmebedarf lässt auf eine schlechte energetische Bausubstanz eines Objekts schließen, sodass ein geringer Heizwärmebedarf ein gut gedämmtes Gebäude repräsentiert. Der Ursprungszustand eines Objekts befände sich unten rechts, da kein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial vorliegt, dieses jedoch auch keine Mehrkosten erfordert.



<sup>1</sup>: gültig sofern die elektrische Effizienz des KWK nicht besser als der dt. Kraftwerksmix ist

**Abbildung 40:** Qualitative wirtschaftlich-ökologische Effizienz

Die qualitative Darstellung der wirtschaftlich-ökologischen-Effizienz zeigt deutlich, dass sowohl die maximalen Einsparpotenziale, als auch die geringsten Mehrkosten bei hohen Heizwärmebedarfen vorhanden sind. Die CO<sub>2</sub>- oder Primärenergieeinsparungen für eine Kombination aus energetischer Sanierung der Gebäudehülle und einer gekoppelten Bereitstellung sind höher als jene einer Einzelumsetzung, jedoch korrelieren diese verbesserten Einsparpotenziale mit höheren Gesamt-Mehrkosten.

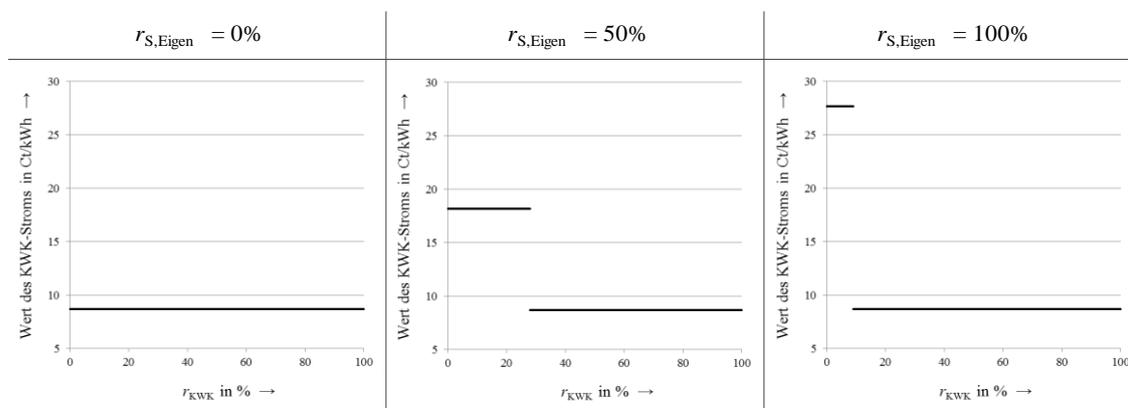
### 3.3 Sensitivitätsanalyse

Innerhalb der Sensitivitätsanalyse werden die Veränderungen der Ergebnisse durch Variation der Eingangsparameter dargestellt. Bei einer Sensitivität wird im klassischen Sinne die Veränderung eines Ergebnisses in Abhängigkeit der Änderung einer Variablen betrachtet. Aufgrund der Komplexität kann kein allgemeines, repräsentatives Ergebnis – z. B. wird bei wirtschaftlichen Betrachtungen häufig die Amortisationszeit aufgetragen – betrachtet werden, sodass die Sensitivitätsbetrachtung wiederum nur durch die Analyse von dreidimensionalen Vergleichsdiagrammen erfolgen kann. Die daraus folgenden Erkenntnisse werden anschließend möglichst allgemeingültig formuliert.

Um eine Übersichtlichkeit herstellen zu können, wird diese Betrachtung für eine beispielhafte Objekt- und Systemkonfiguration durchgeführt. Alle Variationen der Eingangsparameter erfolgen auf Grundlage eines Referenzobjekts mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von  $q_H = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , einem KWK-System mit einer Stromkennzahl von  $\sigma = 0,5$  sowie einem Stromeigennutzungsanteil von  $r_{S,\text{Eigen}} = 50 \%$  – sofern diese Parameter nicht explizit als Variable angeführt werden –, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit und Kombinierbarkeit der Ergebnisse zu schaffen. Weiterhin werden – erneut aufgrund der Übersichtlichkeit – nur bestimmte, besonders interessante, bereits aufgeführte Betrachtungen in ihren Auswirkungen durch die Variation der Eingangsparameter dargestellt.

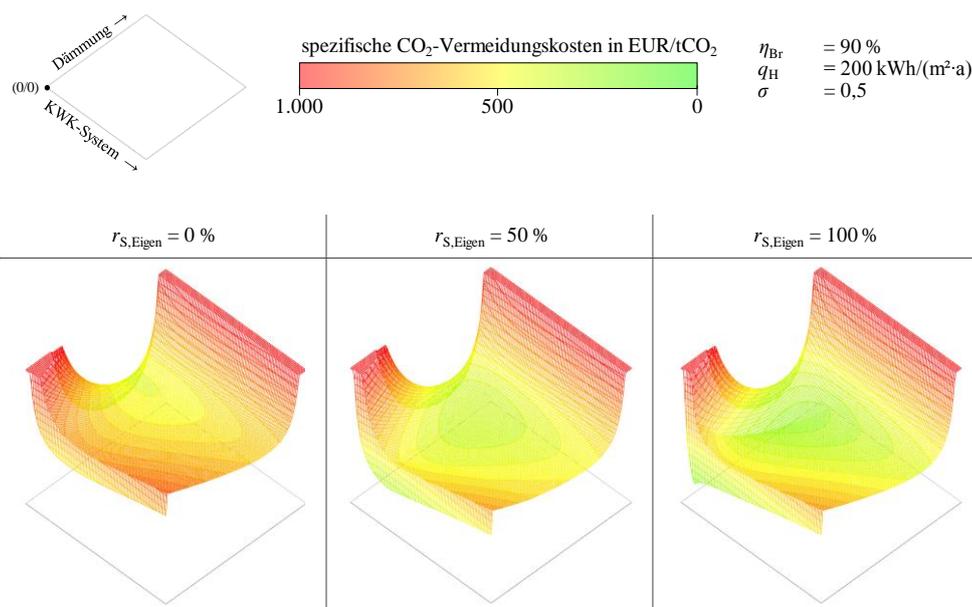
### 3.3.1 Auswirkungen der Stromverteilung

Die Überprüfung der Auswirkungen eines veränderten Eigennutzungsanteils wird anhand der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten verdeutlicht. Die folgende Abbildung zeigt den Wert des KWK-Stroms in Abhängigkeit des Eigennutzungsanteils  $r_{S,Eigen}$ . Auf der Abszisse wird der relative Anteil des KWK-Systems  $r_{KWK}$  aufgetragen. Die korrelierenden elektrischen Energiemengen  $W_{el,KWK}$  können aufgrund des Verlaufes der Jahresdauerlinie nicht direkt abgelesen werden.



**Abbildung 41:** Wert des KWK-Stroms in Abhängigkeit des Eigennutzungsanteils

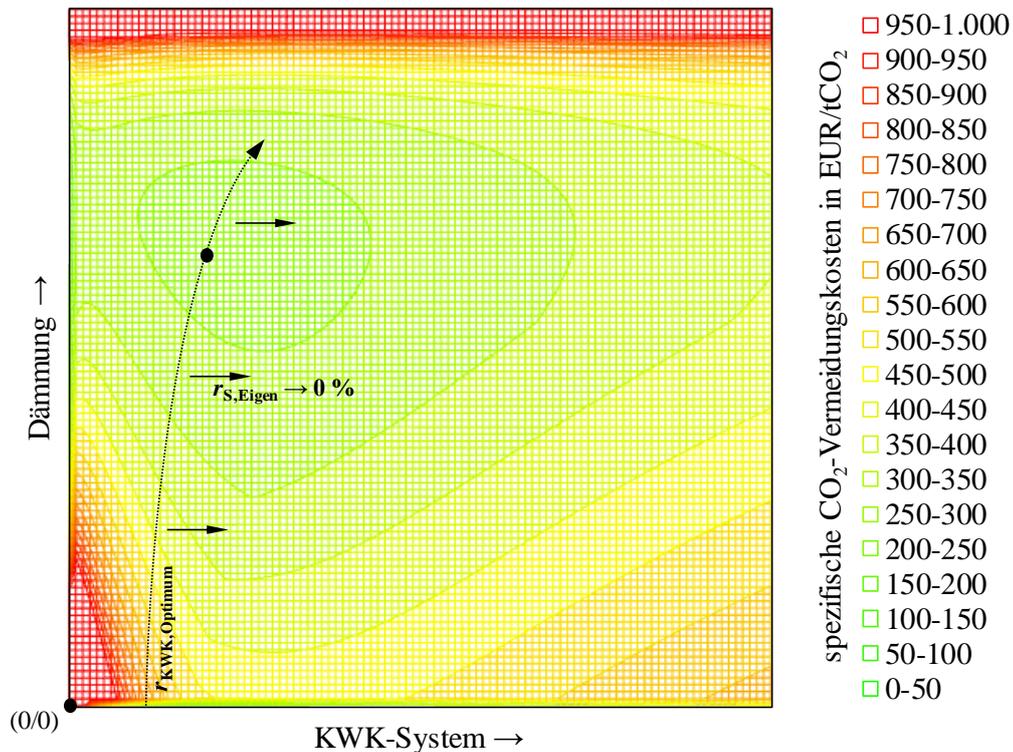
Abbildung 41 verdeutlicht die bereits erwähnte Hebelwirkung des Übergangs von Stromeigennutzung zu -einspeisung aufgrund der mit Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils  $r_{S,Eigen}$  steigenden Wertdifferenzen des KWK-Stroms. Dieser Übergang – der Sprung der Funktion – verschiebt sich mit steigendem Stromeigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen}$  immer weiter in Richtung kleinerer relativer KWK-System-Umsetzungen  $r_{KWK}$ , da die Deckung des elektrischen Eigenbedarfs früher erreicht wird. Die nachfolgende Abbildung stellt die Auswirkungen auf die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten dar.



**Abbildung 42:** Wirtschaftlich-ökologischer Einfluss des Stromeigennutzungsanteils

Die Höhe des in Abbildung 41 aufgezeigten Sprungs verdeutlicht die markanten Auswirkungen insbesondere auf den Ausbildungsgrad der Unstetigkeitsstelle. Bei einem steigenden Stromeigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen}$  lässt sich der Verlauf des Knickpunkts in Richtung höherer anteiliger Dämmung  $r_D$  gut erkennen. Die Ausprägung flacht mit zunehmender Dämmung  $r_D$  mehr und mehr ab. Dies liegt darin begründet, dass die steigenden Kosten der Dämmung die markante Grabenbildung konterkariert. Des Weiteren kann der Zusammenhang zwischen dem KWK-Eigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen}$  und dem Verlauf der Jahresdauerlinie erahnt werden. Für eine komplette Einspeisung  $r_{S,Eigen} = 0\%$  des bereitgestellten KWK-Stroms  $W_{el,KWK}$  wird der Verlauf der Jahresdauerlinie deutlich. Da die zunehmenden Kosten bei großen relativen Anteilen des KWK-Systems  $r_{KWK}$  mit nur noch relativ geringen CO<sub>2</sub>-Einsparungen korrelieren, ist die asymptotische Annäherung jedoch nicht so stark ausgeprägt wie beim eigentlichen Verlauf der Jahresdauerlinie. Bei steigenden Stromeigennutzungsanteilen  $r_{S,Eigen}$  bildet sich ein ähnlicher Verlauf wie bei hohen relativen Umsetzungsanteilen  $r_{KWK}$  aus, jedoch ist das ökonomische Niveau, in dem es liegt, aufgrund der erheblich besseren wirtschaftlichen Betriebsweise deutlich niedriger. Dies resultiert aus den finanziellen Einsparungen durch den in Abbildung 41 dargestellten Sprung des Wertes des KWK-Stroms. Durch diese Betrachtung wird die Bedeutung des Übergangs unterstrichen. Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen ändern sich nur marginal mit der Veränderung der Stromeigennutzung  $r_{S,Eigen}$ .

Die folgende Abbildung stellt eine Draufsicht auf die obige Darstellung für einen Stromeigennutzungsanteil von  $r_{S,Eigen} = 100\%$  dar und beinhaltet Informationen bezüglich des Verlaufs des Kombinationsoptimums.



**Abbildung 43:** Draufsicht auf den Einfluss des Stromeigennutzungsanteils

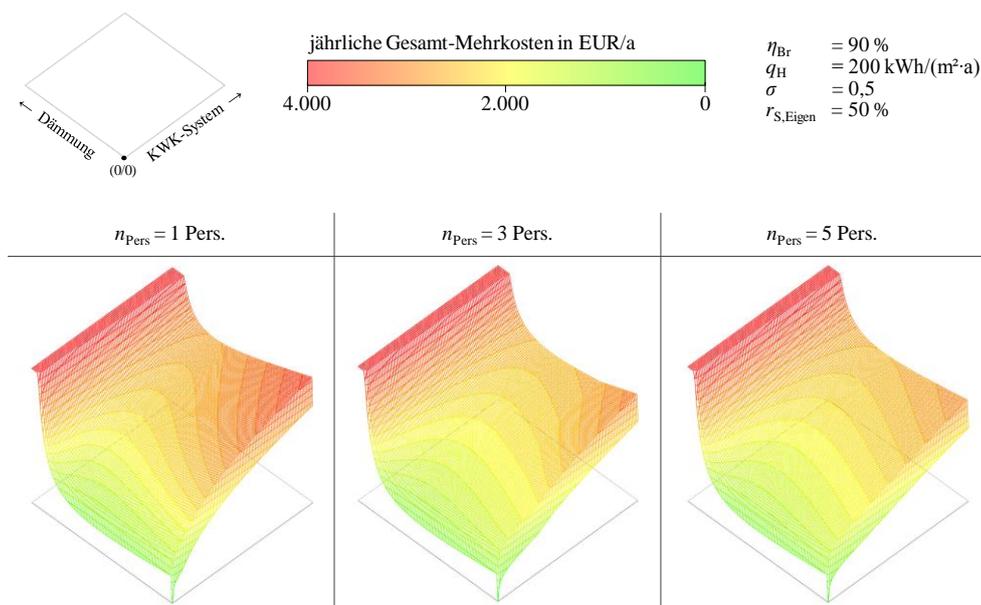
Der Verlauf des  $r_{KWK,Optimum}$  ist abhängig vom Grad der relativen Umsetzung der Dämmmaßnahmen  $r_D$ . Es wird deutlich, dass der relative Leistungsanteil des KWK-Systems  $r_{KWK}$  mit zunehmender Minimierung des Heizwärmebedarfs  $q_H$  größer wird. Der Verlauf der Optima wird besonders in der dreidimensionalen Darstellung durch die Ausbildung eines „Grabens“ im Oberflächenverlauf deutlich. Bei Verkleinerung des Stromeigennutzungsanteils  $r_{S,Eigen}$  bewegt sich der angedeutete Verlauf in Richtung einer größeren relativen thermischen Leistung des KWK-Systems  $r_{KWK}$ . Diese Ausbildung des Optimaverlaufs wird mit abnehmendem Stromeigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen}$  immer geringer und verschiebt sich – wie bereits angedeutet – in kleinere relative Umsetzungen der Dämmung  $r_D$ . Das Optimum der Kombination liegt bei dieser Darstellung bei  $r_D = 65\%$  und  $r_{KWK} = 19\%$  und korreliert mit CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von 259 EUR/t CO<sub>2</sub>. Ein lokales Optimum liegt mit 263 EUR/tCO<sub>2</sub> bei  $r_D = 67\%$ . Das absolute Optimum bei

Einsatz von KWK liegt mit spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in Höhe von 213 EUR/a bei  $r_{\text{KWK}} = 10\%$ .

### 3.3.2 Änderung der Wohnungsbelegung

Neben den Auswirkungen der elektrischen Energieverteilung über die Bilanzhülle des Referenzobjekts stellt der Nutzereinfluss eine Variable dar, die im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse betrachtet werden sollte. Das Nutzerverhalten hat Auswirkungen auf die thermischen Heiz- und Warmwasserbedarfe sowie den elektrischen Bedarf des betrachteten Objekts.

Um das komplexe, mathematisch nicht darstellbare variable Nutzerverhalten für die Simulation greifbar zu machen, wird dies durch die Veränderung der Anzahl der Bewohner im Gebäude umgesetzt. Die Abhängigkeit des Strombedarfs und des Warmwasserbedarfs wird durch die Variation der Belegung abgebildet. Eine Änderung des Heizwärmebedarfs wird nicht unterstellt.



**Abbildung 44:** Wirtschaftlicher Einfluss - Personenzahl

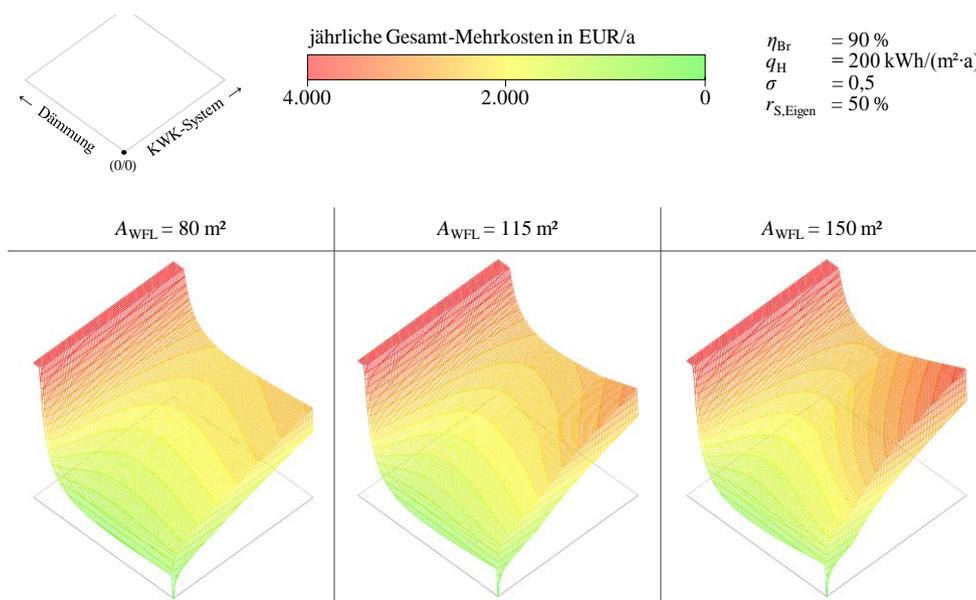
Da sich die variierenden Energiekenngößen weiterhin auf die gleiche Fläche beziehen, erfolgt eine Verschiebung der relativen thermischen Anteile zueinander. Eine Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Dämmmaßnahmen  $r_{\text{D}}$  ist nicht zu erkennen, da die absoluten variablen thermischen Verluste keine Änderung erfahren. Durch eine steigende thermische Grundlast sind höhere Laufzeiten  $t_{\text{Vbh}}$  der KWK-Systeme möglich. Bei einer Erhöhung des Strombedarfs im Gebäude durch mehr Bewohner kann eine größere absolute Strommenge  $W_{\text{el,ges}}$  durch das

KWK-System abgedeckt werden. Unter gleichen Rahmenbedingungen ist eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei größerer Personenbelegung erkennbar. Dieser Effekt würde sich bei einem höheren Stromeigennutzungsanteil  $r_{S,Eigen} > 50\%$  stärker bemerkbar machen.

### 3.3.3 Einfluss der Wohnfläche

Ähnlich wie bereits bei der Variation der Anzahl der Bewohner im Gebäude handelt es sich bei der Betrachtung der Sensitivität der Wohnfläche  $A_{WFL}$  um eine Möglichkeit, den Nutzereinfluss wiederzuspiegeln. Nach [DVGW11] ist neben der Tendenz stetig sinkender Belegung weiterhin festzustellen, dass der spezifische Wohnflächenbedarf des mittleren, statistischen Bundesbürgers steigt.

Die Auswirkung der Veränderung der Wohnfläche  $A_{WFL}$  bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



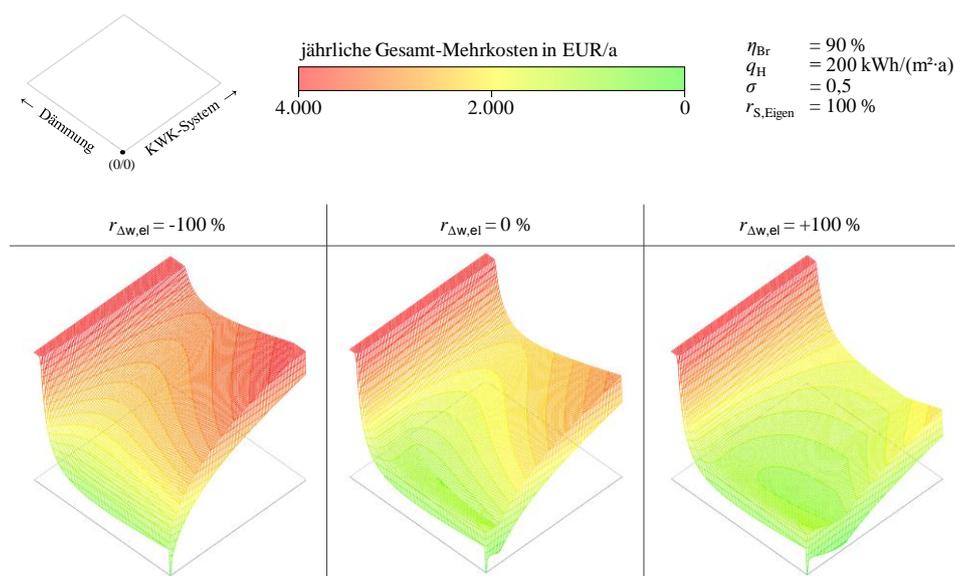
**Abbildung 45:** Wirtschaftlicher Einfluss der Wohnfläche

Bei der Vergrößerung der Wohnfläche steigt das Objektvolumen, sodass der fixe Anteil der Lüftungswärmeverluste an den Gesamtverlusten steigt. Dies konterkariert eine Wirtschaftlichkeit einer Sanierung jedoch nur marginal. Eine energetische Modernisierung steht, trotz absolut steigender zu modernisierender Gebäudehüllfläche, wesentlich höheren Kosten für die steigenden Endenergiebezüge zur Wärmebereitstellung gegenüber.

Die besondere Relevanz des Übergangs von anteiliger Stromeigennutzung zur kompletten Einspeisung wird durch den Verlauf der KWK-Funktion besonders deutlich. Mit steigender Wohnfläche  $A_{WFL}$  steigt der absolute Heizwärmebedarf des Objekts proportional an, sodass aufgrund der höheren Heizlast des Gebäudes bereits immer kleinere relative Leistungen des KWK-Systems  $r_{KWK}$  ausreichen, um den Eigenstrombedarf  $W_{el,Eigen}$  zu decken.

### 3.3.4 Veränderung des Strombedarfs

Im Rahmen der Betrachtung des Nutzereinflusses stellt die Variation des spezifischen Strombedarfs eine relevante Eingangsgröße, deren Einfluss betrachtet werden muss, dar. In den vergangenen Jahren kann nach [BMWi11] ein tendenziell steigender spezifischer Strombedarf angenommen werden. Um die Auswirkungen der Veränderung des Strombedarfs bestmöglich zu verdeutlichen, wird eine Bedarfsänderung um  $r_{\Delta W,el} = -100\%$  und um  $r_{\Delta W,el} = +100\%$  bei einem Stromeigennutzungsanteil von  $r_{S,Eigen} = 100\%$  für die Simulation angesetzt.



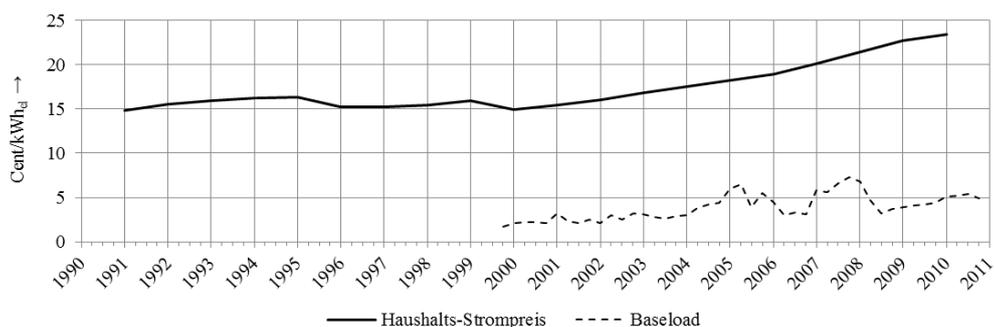
**Abbildung 46:** Wirtschaftlicher Einfluss des Strombedarfs

Es wird deutlich, dass die Änderung des Strombedarfs keine Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen hat. Die Auswirkungen auf die Verläufe der KWK-Systeme hingegen sind jedoch besonders auffällig. Mit steigendem spezifischem Strombedarf  $w_{el}$  verschiebt sich der Übergang von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung immer weiter in Richtung höherer relativer Anteile des KWK-Systems an der Heizlast des Objekts. Die Ausbildung der Unstetigkeitsstelle flacht jedoch mit zunehmendem Strombedarf mehr und mehr

ab, da der Einfluss des Verlaufs der Jahresdauerlinie und der damit korrelierenden Reduktion der Laufzeit des KWK-Systems bei höheren relativen Anteilen  $r_{\text{KWK}}$  zunimmt. Dies wird auch bei der Betrachtung der Kombinationsoberfläche deutlich, da sich der „Graben“, resultierend aus der Unstetigkeit, mit steigendem Strombedarf wesentlich seichter ausbildet. Hierin liegt auch begründet, dass der Übergang von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung nicht automatisch das wirtschaftliche Optimum für die Auslegung von Mikro-KWK-Systemen darstellt.

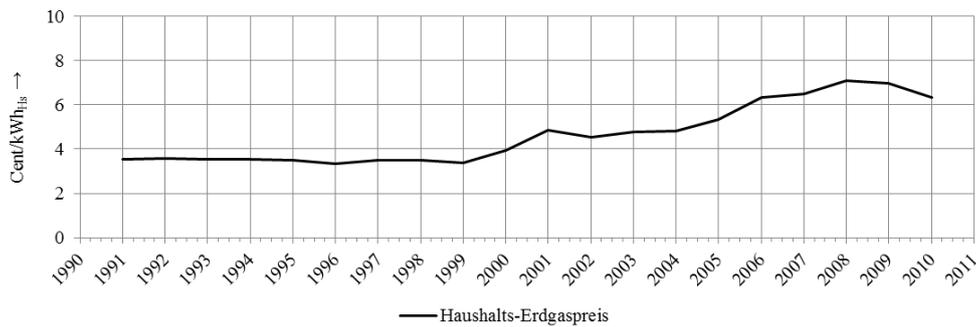
### 3.3.5 Variation des Strom- und Gaspreises

Die Auswirkungen von Veränderungen des Strom- und Gaspreises stellen eine relevante Fragestellung dar, da die Entwicklung der Energiepreise nicht fundiert beschrieben werden kann. Der volatile Verlauf der Energiepreise wird in Abbildung 47 durch den Verlauf der Haushalts-Strompreise [BMWi11] sowie der Baseload-Quartalspreise [EEX11] verdeutlicht.



**Abbildung 47:** Zeitliche Entwicklung der Strompreise

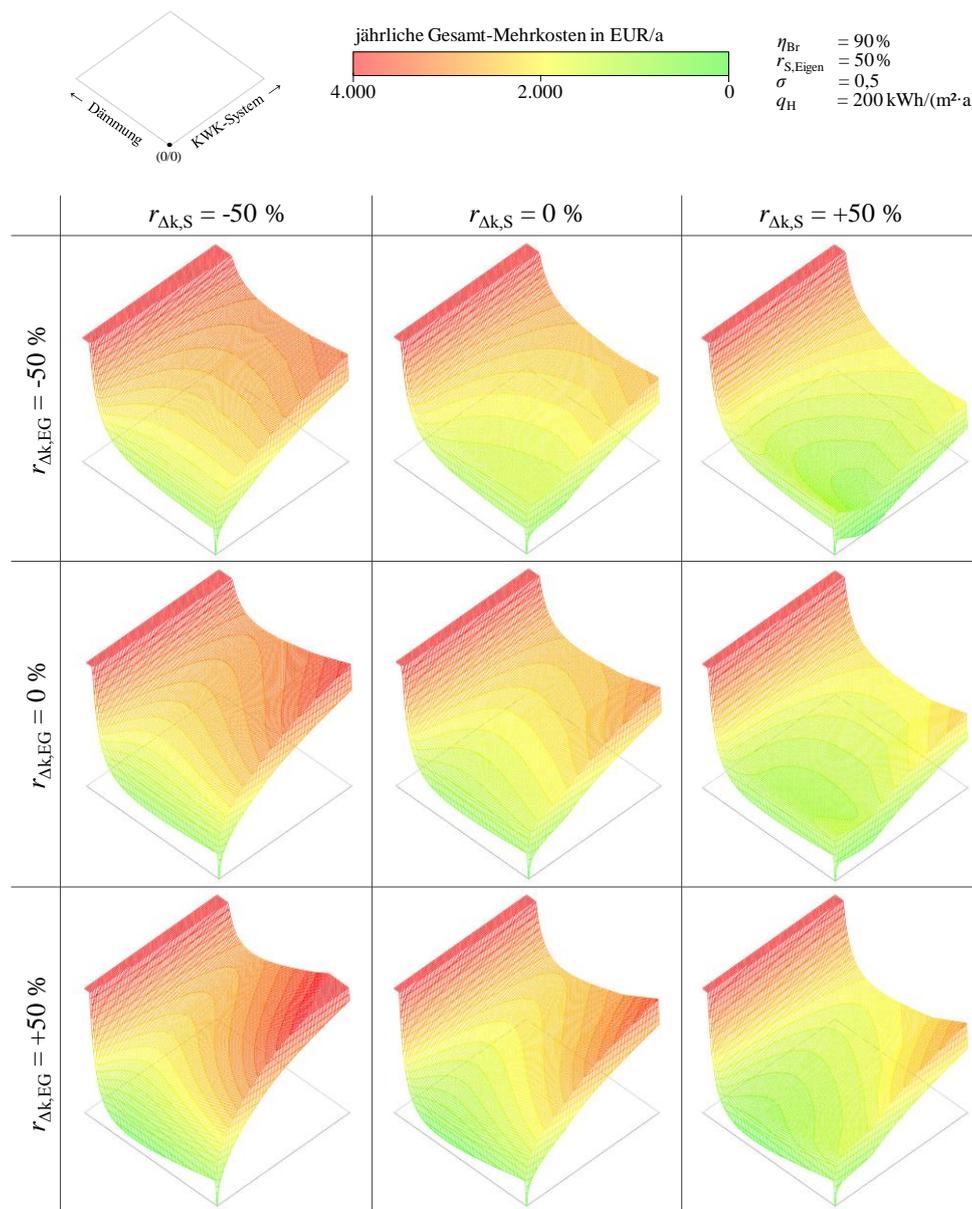
Neben der Verknappung der Ressourcen, den Einflüssen der stark schwankenden energiepolitischen Beschlüsse und den klimatischen Rahmenbedingungen, haben zahlreiche weitere äußere Einflüsse Auswirkungen auf die Entwicklung des Strom- und Gaspreises. Die folgende Abbildung zeigt die Preisentwicklung des Erdgasbezugspreises für Haushaltskunden nach [BMWi11]. Eine fundierte Prognose ist auch hier nicht möglich.



**Abbildung 48:** Zeitliche Entwicklung der Gaspreise

Die jährlichen Energiepreise spiegeln einen geglätteten Verlauf der Energiepreise eines Jahres wider. Dies wird durch den Verlauf des bereits gemittelten Baseload-Quartals-Preises bei den Stromkosten veranschaulicht. Da eine Preissteigerung eher als eine -senkung vermutet werden kann, wird in dieser sensiblen Betrachtung die Auswirkung eines um 50 % steigenden sowie sinkenden Gas- und Strompreises ( $r_{\Delta k,S}$  und  $r_{\Delta k,EG}$ ) dargestellt. Diese enorme Sensitivität wird auch deshalb gewählt, um die Auswirkungen bestmöglich zu veranschaulichen.

Die Einflüsse der betrachteten Sensitivität auf die Darstellung der Kombinationsmöglichkeiten aus der Sanierung der energetischen Gebäudehülle und dem Einsatz von KWK werden in der folgenden Abbildung auf Grundlage der wirtschaftlichen Betrachtung aufgezeigt.



**Abbildung 49:** Wirtschaftlicher Einfluss der Energiepreisentwicklung

Die wirtschaftliche Betrachtung der Auswirkungen der Simulation von verschiedenen Energiepreisen liefert wichtige Aussagen für mögliche zukünftige Szenarien. Die Funktion der Einzelbetrachtung der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle  $r_D$  zeigt klar auf, dass die Wirtschaftlichkeit unabhängig vom angenommenen Strompreis ist. Dies liegt darin begründet, dass die Bilanz des Strombedarfs durch die Dämmmaßnahmen nicht berührt wird und somit die verbrauchsgebundenen Strombezugskosten sowohl beim Referenzobjekt als auch beim gedämmten Objekt gleich bleiben. Die ökonomische Rentabilität wird jedoch

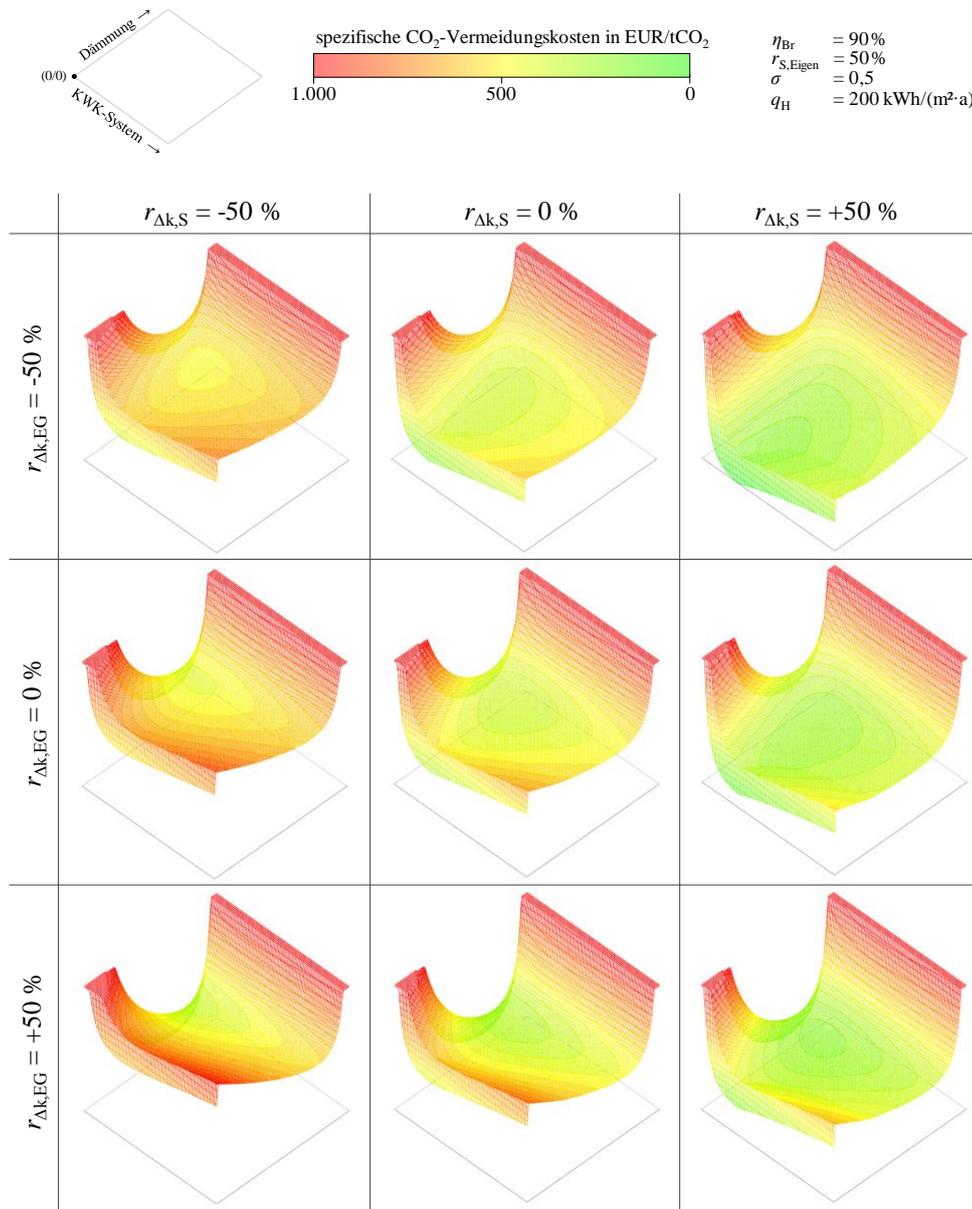
durch die Änderung des Erdgasbezugspreises  $r_{\Delta k,EG}$  enorm beeinflusst. Da die Investitionskosten bei dieser Simulation unberührt bleiben, steigt die Wirtschaftlichkeit der Dämmmaßnahmen - resultierend aus den größeren finanziellen Einsparungen bei gleichbleibenden Kapitalkosten - mit Zunahme des Erdgasbezugspreises.

Bei der separaten Betrachtung des Einsatzes von Kraft-Wärme-Kopplung  $r_{KWK}$  wird die Abhängigkeit sowohl von den Erdgas- als auch von den Strombezugspreisen deutlich. Bei steigenden Strombezugspreisen  $r_{\Delta k,S} > 0 \%$  wird der Einsatz eines KWK-System immer rentabler, da der bereitgestellte Strom an Wert zunimmt. Dieser Effekt wird jedoch von steigenden Erdgasbezugspreisen  $r_{\Delta k,EG} > 0 \%$  zumindest teilweise wieder konterkariert. Durch den Einsatz eines KWK-Systems sinkt zwar der Strombezug, sodass eine Einspeisung zum Teil möglich wird, jedoch steigt damit auch der Erdgasbezug des Gesamtobjekts an. Durch einen steigenden Erdgasbezugspreis werden die erhöhten Gewinne der Strombezugssubstitution oder Stromeinspeisung gemindert. Bei der Erhöhung der Strombezugspreisen  $r_{\Delta k,S} > 0 \%$  wird eine ausgeprägtere Ausbildung des Übergangs von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung deutlich. Im Falle eines um  $r_{\Delta k,EG} = -50 \%$  verminderten Erdgas- und um  $r_{\Delta k,S} = 50\%$  erhöhten Strompreis läge das absolute wirtschaftliche Optimum bei einer relativen Umsetzung eines KWK-Systems von  $r_{KWK} = 28 \%$ . Dies würde mit jährlichen Mehrkosten in Höhe von lediglich  $\Delta k_{ges} = 13 \text{ EUR/a}$  korrelieren und sehr nah an einer wirtschaftlich rentablen Betriebsweise liegen. Für das Szenario einer verhältnismäßig gleichbleibenden Steigerung beider Energiebezugspreisen  $r_{\Delta k,EG} > 0 \%$ ,  $r_{\Delta k,S} > 0 \%$  nimmt die Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen zu.

Eine Kombination von Dämmung und KWK ist unter den derzeitigen Umständen wirtschaftlich nicht sinnvoll. Nur bei einer – im Vergleich zu den Erdgaspreisen – überproportionalen Erhöhung der Strombezugspreisen  $r_{\Delta k,S} > r_{\Delta k,EG}$  kann ein lokales wirtschaftliches Optimum im Kombinationsbereich generiert werden.

Als allgemeingültige Kernaussage kann angeführt werden, dass sich ein steigender Erdgaspreis auf eine energetische Modernisierung der Gebäudehülle wirtschaftlich positiv auswirkt und sich negativ bei einer wirtschaftlichen Betrachtung von KWK bemerkbar macht. Ein steigender Strompreis führt nur zu wirtschaftlichen Vorteilen auf Seiten der KWK-Systeme.

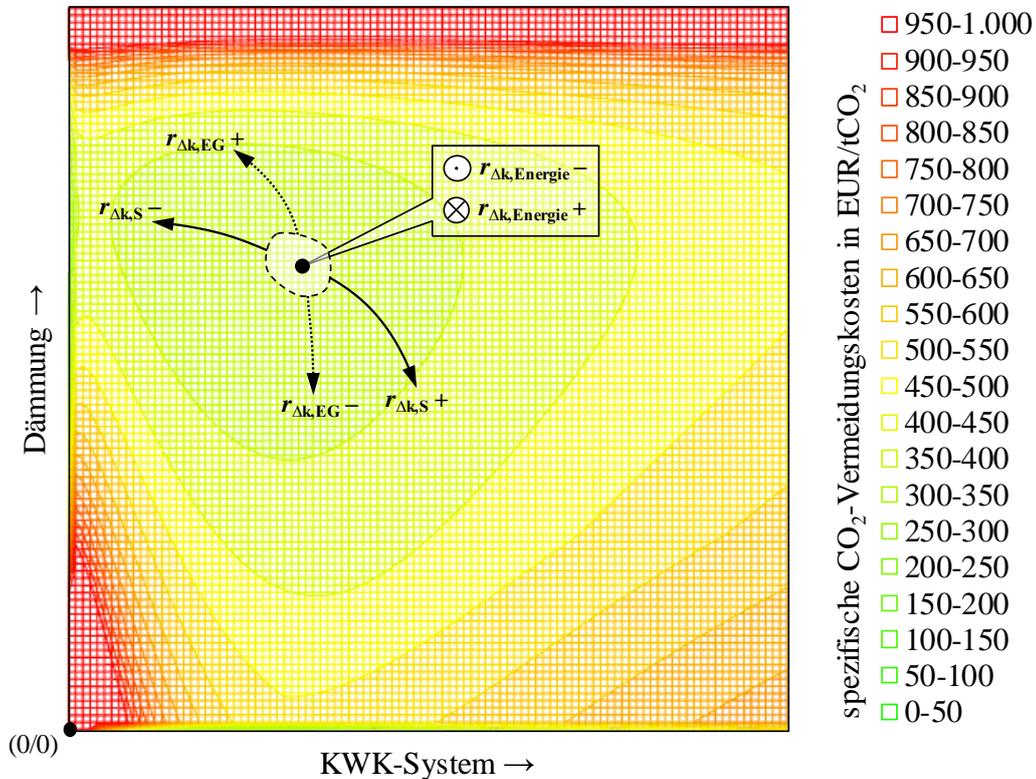
Die folgende Darstellung beinhaltet die Auswirkungen der verschiedenen Energiepreisänderungen auf die wirtschaftlich-ökologische Betrachtung.



**Abbildung 50:** Wirtschaftlich-ökologischer Einfluss - Energiepreisentwicklung

Durch die Änderung der spezifischen Energiebezugpreise ändert sich die Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht. Daher können die wirtschaftlichen Schlussfolgerungen in Kombination mit den in Kapitel 3.2.2 aufgeführten Einsparungen kombiniert werden. In der folgenden Abbildung ist wiederum eine Draufsicht der resultierenden Oberfläche bei einem spezifischen Heizwärmebedarf von  $q_H = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , einer Stromkennzahl von  $\sigma = 0,5$ , einem Stromeigen-nutzungsanteil von  $r_{S,Eigen} = 50\%$  und unveränderten Energiebezugspreisen mit

eingezeichneten, richtungsweisenden Verläufen der kombinierten Optima dargestellt.

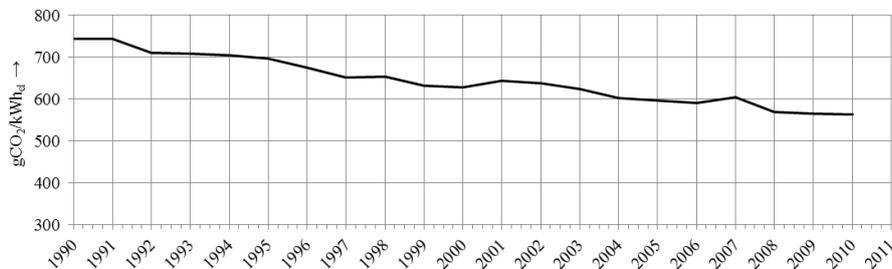


**Abbildung 51:** Draufsicht auf den Einfluss von Energiepreisänderungen

Der eingekreiste Bereich des Optimums wird wirtschaftlich rentabler bei verhältnismäßig gleichbleibenden Steigerungen der Energiepreise. Das Gegenteil geschieht bei der gleichmäßigen Reduktion der Energiebezugskosten. Das Optimum bewegt sich in Regionen kleinerer relativer Leistungen des KWK-Systems  $r_{KWK}$  bei Senkung der Strombezugskosten  $r_{\Delta k,S-}$ . Der Verlauf bei einem steigenden Erdgaspreis  $r_{\Delta k,EG+}$  verläuft ähnlich, bewegt sich jedoch in Richtung eines höheren relativen Anteils der Umsetzungen der Dämmmaßnahmen  $r_D$ . Gegensätzlich verhalten sich die jeweils anderen Änderungen der spezifischen Energiebezugskosten. Bei steigenden Strombezugskosten  $r_{\Delta k,S+}$  verschiebt sich das Optimum in Richtung eines höheren relativen Anteils des KWK-Systems aufgrund des besseren Verhältnisses vom erzielten Gewinn des Stromverkaufs in Bezug auf die gleichbleibende Einsparung in diesem Kombinationenpunkt. Für fallende Erdgasbezugskosten  $r_{\Delta k,EG-}$  lässt sich wiederum ein gleicher Trend erkennen. Hierbei nimmt jedoch der relative Anteil der Dämmmaßnahmen  $r_D$  aufgrund der resultierenden schlechteren Wirtschaftlichkeit und der konstanten CO<sub>2</sub>-Einsparungen stark ab.

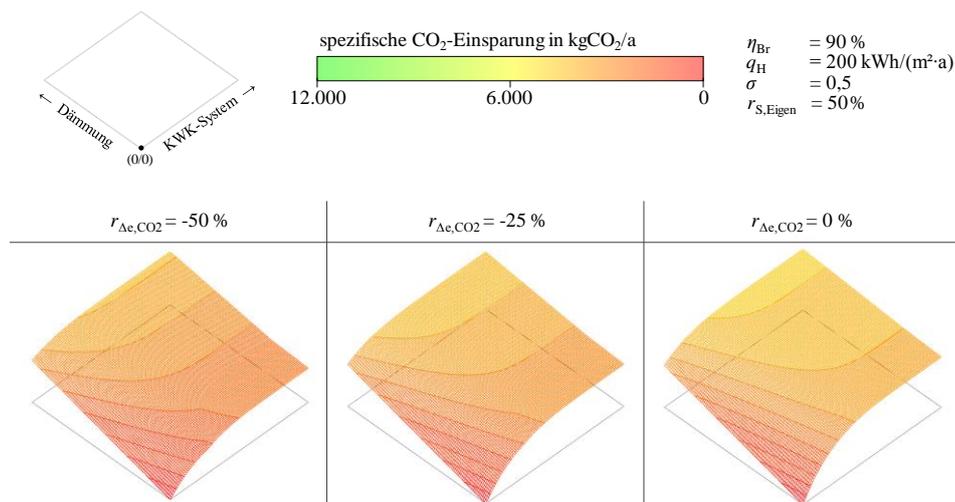
### 3.3.6 Entwicklung des Strommix

Die folgende Abbildung zeigt die zeitliche Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommix [BUA11]



**Abbildung 52:** Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommix

Die Einflüsse sinkender CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den steigenden Anteil regenerativer Energien und effizienterer Anlagen werden in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 53:** Ökologischer Einfluss - CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Auswirkungen einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommix auf die ökologische und primärenergetische Betrachtung sind relativ gering, da durch den Vorrang der erneuerbaren und gekoppelten elektrischen Energie nur fossile Anteile im Strommix substituiert werden und diese – in dieser Betrachtung – als konstant angesehen werden.

Durch den Einsatz von Biogas könnten die angesetzten CO<sub>2</sub>-Emission und der Primärenergiefaktor für den zugrunde gelegten Erdgasbezug erheblich reduziert

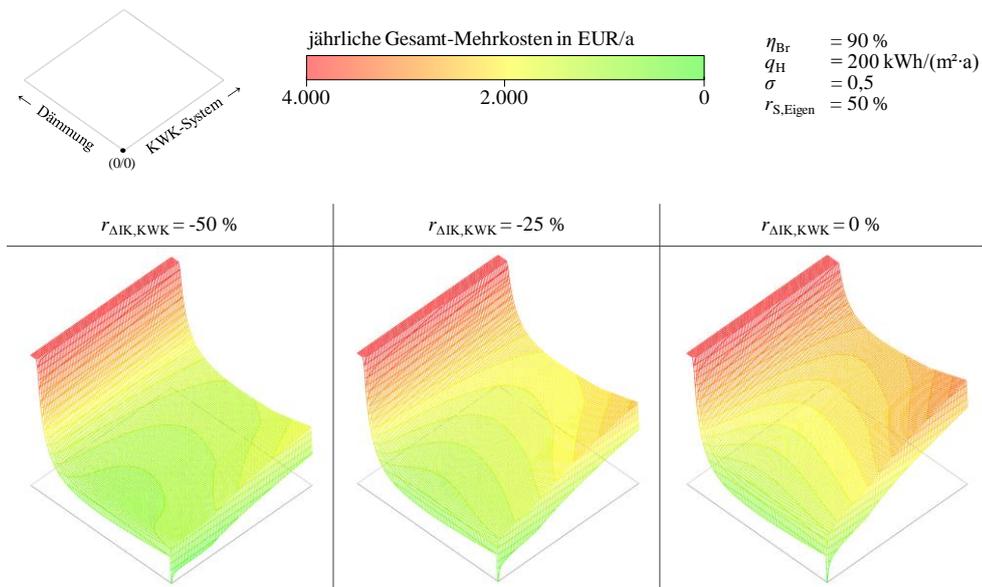
werden, was mit höheren CO<sub>2</sub>- und Primärenergie-Einsparungen korrelieren würde.

### 3.3.7 Verminderung der Investitionskosten

Die kapitalgebundenen Kosten stellen einen sehr großen Anteil der jährlichen Gesamtkosten dar. Eine Überprüfung der Sensitivität der Investitionskosten eines KWK-Komplettsystems kann daher sehr interessante Handlungsempfehlungen hervorbringen. Da vor allem die Investitionskosten für die Mikro-KWK-Systeme für den Einsatz im Wohngebäudebestand derzeit zu hoch sind, wird in diesem Kapitel lediglich die Reduzierung der Investitionskosten und somit der kapitalgebundenen Kosten simuliert und analysiert. Die Kosten für die Sanierung der Gebäudehülle wird in dieser Arbeit nicht variiert, da zum einen die ganzheitliche Betrachtung des KWK-Potenzials im Vordergrund steht und es sich hierbei zum anderen eine am Markt etablierte und bereits – unter bestimmten Rahmenbedingungen – wirtschaftliche Art der energetischen Modernisierung handelt.

Im Rahmen von Förderprogrammen durch Bund und Länder wären potenzielle Kostenreduktionen im Hinblick auf die Ziele des [IEKP07] möglich. Sofern ein wirtschaftlicher Betrieb hierdurch realisierbar wäre, könnte ein steigender Absatz in Korrelation mit der Produktion höherer Stückzahlen die Kosten der Hersteller reduzieren, was wiederum eine Verkleinerung der Investitionskosten für einen möglichen KWK-Betreiber zur Folge hätte.

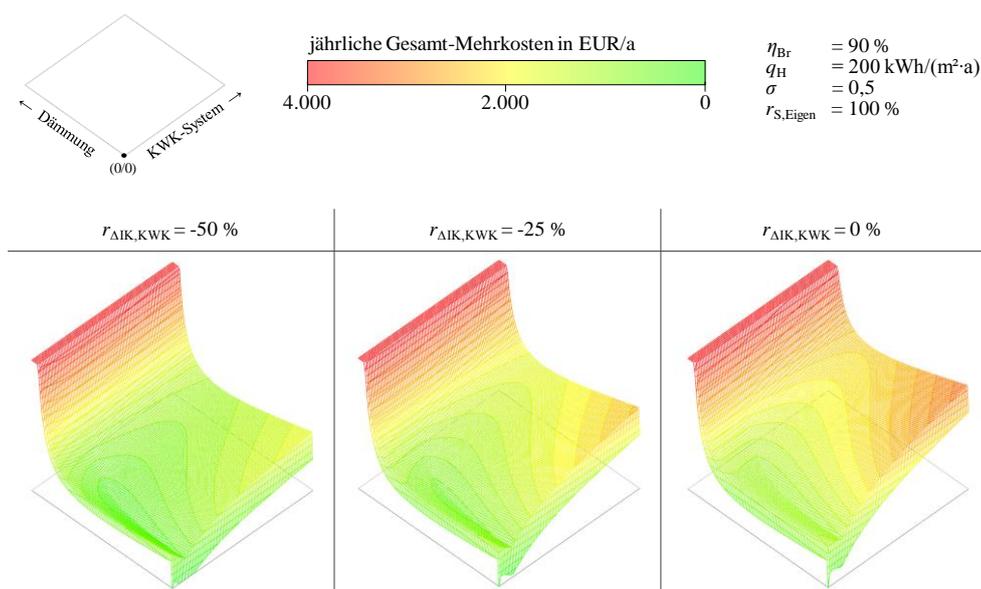
Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der jährlichen Gesamt-Mehrkosten bei um  $r_{\Delta IK, KWK} = -25\%$  und  $r_{\Delta IK, KWK} = -50\%$  reduzierten Investitionskosten auf Grundlage der definierten Rahmenbedingungen  $q_H = 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,  $\sigma = 0,5$  und  $r_{S, \text{Eigen}} = 50\%$ .



**Abbildung 54:** Wirtschaftlicher Einfluss - Kostenreduktion bei 50 % Stromeigennutzung

Abbildung 54 verdeutlicht, dass eine Verminderung der Investitionskosten den Verlauf der jährlichen Gesamtkostenfunktion senkt. Bei starker Reduzierung bildet sich der Übergang von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung immer deutlicher heraus, da die verbrauchsgebundenen Kosten einen größeren Anteil an den jährlichen Gesamtkosten einnehmen als zuvor. Eine wirtschaftliche Rentabilität wäre – unter Annahme der Eingangsparameter – erst bei einer Reduktion der kapitalgebundenen Kosten um  $r_{\Delta IK, KWK} = -70\%$  realisierbar. Die Auslegungsgröße würde einer relativen Umsetzung von  $r_{KWK} = 28\%$  entsprechen und mit jährlichen Einsparungen in Höhe von 6 EUR/a korrelieren. Die resultierenden jährlichen  $\text{CO}_2$ -Einsparungen lägen bei rund  $\Delta E_{\text{CO}_2} = 3,7 \text{ t CO}_2/\text{a}$ . Eine Kombination aus Dämmung und KWK-System wäre auch hier wiederum nicht sinnvoll, da die weiterhin vorhandenen hohen Fixkostenanteile der beiden Modernisierungsmaßnahmen einen wirtschaftlichen Betrieb verhindern würden.

Die wirtschaftlich-ökologischen Auswirkungen der Variation des Stromeigennutzungsanteils auf  $r_{S, \text{Eigen}} = 100\%$  werden in Kombination mit der Reduzierung der Investitionskosten für KWK-Systeme in der folgenden Abbildung in Bezug auf die Veränderung der Wirtschaftlichkeit angeführt.



**Abbildung 55:** Wirtschaftlicher Einfluss - Kostenreduktion bei 100 % Stromeigennutzung

Bei einem angenommenen Stromeigennutzungsanteil von  $r_{S,Eigen} = 100\%$  wäre ein ökonomisch rentabler und somit sinnvoller Betrieb bereits bei einer Verminderung der Investitionskosten um  $r_{\Delta IK,KWK} = -30\%$  möglich. Die optimale relative Leistung des KWK-Systems läge bei  $r_{KWK} = 10\%$ , was in der früheren Abdeckung des Stromeigenbedarfs begründet ist. Die Optimierung der elektrischen Einbindung sollte daher aus wirtschaftlicher Sicht vorangetrieben werden. Die Kehrseite ist, dass sich die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die geringe relative Leistung des KWK-Systems  $r_{KWK}$  gegenüber geringeren Stromeigennutzungsanteilen  $r_{S,Eigen}$  verringern, weil die absolute Energiebereitstellung  $W_{el,KWK}$  und  $Q_{KWK}$  des KWK-Systems sinkt. Die ökologischen Einsparungen würden bei dem beschriebenen Betriebspunkt auf  $\Delta E_{CO_2} = 1,7 \text{ t CO}_2/\text{a}$  reduziert werden, was jedoch aus ökologischer und politischer Sicht ein weiterhin positives und somit verfolgungswertes Ziel darstellt.

Die Auswirkungen einer sensitiven Betrachtung der nach dem Entwurf der [VDI 2067] zugrunde gelegten technische Nutzungsdauer von  $t_N = 15 \text{ a}$  für KWK-Systeme können durch die erzielten Ergebnisse dieses Teilkapitels abgedeckt werden. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer  $t_N$  entspricht einer zeitlich größeren Aufteilung der anfallenden kapitalgebundenen Kosten (siehe Kapitel 3.2.1), die durch die Investitionskosten verursacht werden. Es entstehen Einflüsse auf die verbrauchsgebundenen Kosten, da die KWK-Vergütung des [KWKG] über einen Zeitraum von zehn Jahren zugesichert wird. Die Abweichungen können in einer ersten Näherung vernachlässigt werden. Des Weiteren spiegeln die

Ergebnisse eine Variation des angesetzten Zinssatzes von  $i = 4\%$  wieder. Eine Reduktion dieses Zinssatzes korreliert direkt mit der Annuität  $a$  (siehe wiederum Kapitel 3.2.1) und vermindert somit die jährliche Belastung durch die kapitalgebundenen Kosten. Eine Untersuchung der genauen Einflüsse der tatsächlichen technischen Nutzungsdauer  $t_N$  als Funktion der Vollbetriebsstunden  $t_{vbn}$  von KWK-Aggregaten auf die Wirtschaftlichkeit stellt einen weiterführenden Handlungsbedarf dar.

Um diese große Problematik des unwirtschaftlichen Betriebs geringfügig zu relativieren, sollte die Zielsetzung betrachtet werden. Es wird unterstellt, dass es sich um eine Investition handelt, die nicht notwendig ist, sodass keine Investitionskosten für ein Alternativsystem zu Buche fallen. Eine Wirtschaftlichkeit wird bei dieser Berechnung erst erreicht, wenn es Sinn macht, eine vollkommen funktionsfähige Gebäudehülle oder einen intakten Heizkessel durch eine Modernisierung zu ersetzen. Das bedeutet, dass der wirtschaftliche Vergleich eine Geldanlage mit einem zugesicherten Zinssatz – in den Berechnungen  $i = 4\%$  – darstellt, und die Frage geklärt wird, ob die Investition in eine energetische Modernisierung der Gebäudehülle oder in eine Wärme- und Strombereitstellung durch Kraft-Wärme-Kopplung eine rentablere Geldanlage darstellen.

Die aufgezeigten Ergebnisse unterliegen einer möglichst allgemeingültigen Berechnungsgrundlage, daher sind die Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf ein bestimmtes Objekt im Einzelfall zu prüfen.

### **3.4 Wesentliche Erkenntnisse**

Die ganzheitliche Betrachtung des Mikro-KWK-Potenzials im Wohngebäudebestand unter der Prämisse der Nutzung möglicher Synergien von energetischer Sanierung der Gebäudehülle und Einsatz von KWK beruht auf theoretischen Grundlagen und fokussiert sich auf die Simulation von Einflüssen verschiedener Eingangsvariablen sowie auf die anschließende Analyse und Interpretation der Ergebnisse. Durch die hohe Komplexität der Zusammenhänge verschiedener Einflussparameter sind die Aussagen lediglich als Empfehlungen zu verstehen.

Die Potenziale der Dämmmaßnahmen sind unter der Annahme einer allgemeingültigen, in fixe und variable Anteile aufgeteilten, Wärmeverteilung innerhalb eines Objekts quantifizierbar. Die Optimierung der Auslegung von beliebigen, durch die Stromkennzahl und den relativen Anteil an der Heizlast desselben Objekts definierten KWK-Systemen bildet die Grundlage der wirtschaftlichen, ökologischen und primärenergetischen Potenzialabschätzung sowohl der Einzelumsetzungen als auch der Kombinationsmöglichkeiten aus Dämmung und KWK.

Eine quantitative Beurteilung der Einzelsysteme und der Kombinationsmöglichkeiten muss auf gleichen Grundlagen erfolgen. Im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung wird geprüft, ob eine Investition in eine der energetischen Modernisierungen – unter der Annahme einer alternativen Verzinsung des Investitionskapitals von vier Prozent – sinnvoll ist. Unter Berücksichtigung der fundierten Annahmen zeigen die durchgeführten Berechnungen, dass ein wirtschaftlich rentabler Einsatz einer Kombination aus Dämmung und Kraft-Wärme-Kopplung nicht möglich ist. Die primären Ursachen dafür sind die fixen Anteile der jeweiligen Investitionskosten, die eine gemeinsame Wirtschaftlichkeit konterkarieren.

Die Rentabilität einer energetischen Modernisierung der Gebäudehülle erhöht sich mit steigendem Heizwärmebedarf des Objekts und kann bei sehr hohen Bedarfen eine wirtschaftlich rentable Geldanlage darstellen. Relativ neue Objekte, die einen sehr geringen Heizwärmebedarf aufweisen, sind für eine zusätzliche Dämmung ungeeignet, da lediglich eine geringe Verminderung der Energiekosten, die aus der Reduktion der thermischen Transmissions- und Lüftungswärmeverluste resultieren würden, nur durch den Einsatz einer unverhältnismäßig aufwändigen und somit teuren Erweiterung der Dämmstärke realisierbar wäre. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Sanierung der Gebäudehülle angenommen, dass alle unterschiedlichen Möglichkeiten der Dämmung in ihrer Umsetzbarkeit als gleichwertig in der Priorisierung der Umsetzung angesehen werden, da eine fundierte Empfehlung aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der deutschen durch die Baualterklassen strukturierten Gebäudetypen nicht möglich ist.

Als weiteres Ergebnis kann festgehalten werden, dass der Einsatz von KWK im Wohngebäudebestand derzeit wirtschaftlich nicht darstellbar ist, da die Investitionskosten für KWK-Systeme in Bezug auf die Energiepreise unverhältnismäßig hoch sind. Die Ergebnisse zeigen jedoch Optimierungspotenziale auf, die einen ökonomischen Einsatz von Mikro-KWK-Systemen in Zukunft ermöglichen könnten.

Das Auslegungsoptimum ist im Wesentlichen vom Übergang von Stromeigennutzung zu Stromeinspeisung des KWK-Systems in das Netz und von der Laufzeit des KWK-Systems abhängig. Aufgrund der enormen Unterschiede der Verminderung des Strombezugs durch Stromeigennutzung und Vergütung durch Netzeinspeisung ist ein möglichst hoher Stromeigennutzungsanteil aus wirtschaftlicher Sicht empfehlenswert. Die Maximierung der Stromeigennutzung ist – aufgrund der zeitlich nicht kongruenten Bedarfe von Strom und Wärme – möglicherweise durch eine Optimierung der Betriebsweise in Richtung einer

kombinierten, intelligenten wärme- und stromgeführten Fahrweise in Verbindung mit energetischen Pufferspeichern realisierbar. Diese Einflüsse sollten im Rahmen eines weiteren Forschungsschwerpunktes untersucht werden. Durch die Steigerung des Stromeigennutzungsanteils verschiebt sich der relative Anteil des KWK-Systems an der Heizlast in immer kleinere Bereiche, da die Eigenbedarfsabdeckung immer früher ermöglicht wird. Diese geringen Größen der KWK-Systeme bedingen weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Technologiebereich der Mikro-KWK.

Aus primärenergetischer und ökologischer Sicht ist sowohl eine Dämmung als auch der Einsatz von KWK sinnvoll. Bei der Kombination der energetischen Modernisierungsmaßnahmen ist es bei hohen elektrischen Nutzungsgraden des KWK-Systems – diese werden in der Regel durch Brennstoffzellen erreicht – sinnvoll, die Sanierung der Gebäudehülle als sekundären Schritt anzusehen, um die Laufzeit des KWK-Systems nicht zu vermindern. Dies liegt darin begründet, dass die Strombereitstellung aus KWK in diesem Fall effizienter wäre als jene der fossilen Kraftwerke, die durch die Netzeinspeisung der elektrischen Energie substituiert würden. Aufgrund der letzten Entwicklungen in der Energiepolitik sollte die Möglichkeit einer Aussetzung des KWK-Einspeisevorrangs im Zuge stetig sinkender spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarfen des deutschen Strommix durch die Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energien und den Einsatz effizienterer Technologien bedacht werden. Diese Überlegung sollte die Priorität des Stromeigennutzungsanteils noch stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit lenken.

Eine ökonomisch optimierte Dimensionierung der Modernisierungsmaßnahmen konterkariert eine Maximierung der ökologischen und primärenergetischen Einsparpotenziale im Wohngebäudebestand. Die Grenze der Wahrung der wirtschaftlichen Vertretbarkeit von energetischen Modernisierungsmaßnahmen im Sinne des Energie-Einspargesetzes kann nicht objektiv bestimmt werden, sodass eine fundierte wirtschaftlich-ökologische Handlungsempfehlung aufgrund der subjektiven Bewertungsebene nicht gegeben werden kann.

Eine allgemeine Umsetzungsempfehlung für Gebäude ist aufgrund der zahlreichen äußeren Einflüsse der unterschiedlichen Rahmenbedingungen nicht möglich. Die Sanierung der Gebäudehülle in Kombination mit der Investition in eine gekoppelte Wärmebereitstellung wird aus wirtschaftlicher Sicht keinen positiven Schnittpunkt ergeben. Wegen der vielfältigen Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Mikro-KWK kann ein wirtschaftlicher Betrieb im Wohngebäudebestand in Zukunft möglich sein. Grundsätzlich kann weiterhin festgehalten werden, dass sowohl durch den Einsatz von Dämmmaßnahmen als auch durch

das Einsetzen von KWK – sowohl bei der Einzelumsetzung als auch bei deren Kombination – die vorhandenen Umweltbelastungen und Primärenergiebedarfe enorm vermindert werden können.

## 4 Experimentelle und Praktische Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen und praktischen Untersuchungen von unterschiedlichen Mikro-KWK-Anlagen können theoretische Angaben von Herstellern auf den Prüfständen der unabhängigen Institute verifiziert werden. Aus den gemessenen Betriebszuständen lassen sich zahlreiche Kenndaten, wie zum Beispiel Wirkungsgrade oder Normnutzungsgrade ableiten. Die resultierenden Kenngrößen können zum Beispiel zur Erstellung des Nachweises zur Erfüllung der EnEV-Vorgaben oder für Anträge für das ab 01. April 2012 in Kraft tretende Impulsförderprogramm der BAFA für Mini-KWK-Anlagen [BAFA12] herangezogen werden. Sämtliche projektbezogenen Messungen beruhen auf den neusten Normen und Richtlinien und werden somit nach dem neuesten Erkenntnisstand durchgeführt.

### 4.1 Ergebnisse alter Messungen und Feldtestuntersuchungen

An den drei beteiligten Forschungsinstituten wurden bereits in den letzten Jahren umfangreiche Messprogramme und Feldtestuntersuchungen zum Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen durchgeführt und begleitet. Diese brachten erste Erkenntnisse und konnten die Weiterentwicklung der Anlagen positiv beeinflussen. In den folgenden Kapiteln werden wichtige Ergebnisse vorhergegangener Forschungstätigkeiten kurz dargestellt.

#### 4.1.1 Feldtestuntersuchungen WhisperGen - GWI

Das Gaswärme-Institut e. V. Essen hat in Kooperation mit der Gelsenwasser AG im Jahr 2006 ein Projekt zur Untersuchung eines Mikro-KWK-Stirlingmotors des neuseeländischen Anlagenherstellers WhisperTech ins Leben gerufen. Die Ziele dieses Projektes sind sowohl die Beurteilung der Anlagenzuverlässigkeit, der Anlagenleistung und der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs sowie die Abschätzung eines möglichen Marktpotenzials gewesen. Im Zuge dessen sind jeweils eine Anlage in Löhne und eine in Bad Oeynhausen, mit der Ambition den Betrieb über mindestens zwei Heizperioden zu erfassen, installiert worden.

Bei den eingesetzten Anlagen handelt es sich um einen WhisperGen, ein kombiniertes Mikro-KWK-System aus Stirlingmotor und integriertem Zusatzbrenner. Dieses System kann in einem Arbeitsbereich von 0,4 kW bis 1,2 kW elektrischer Leistung modulierend arbeiten. Die thermische Leistung bewegt sich

in einer Bandbreite von 4,9 kW bis 8 kW. Neben dem Kombigerät ist ein weiteres Zusatzheizgerät installiert worden um mögliche Lastspitzen abfahren zu können.

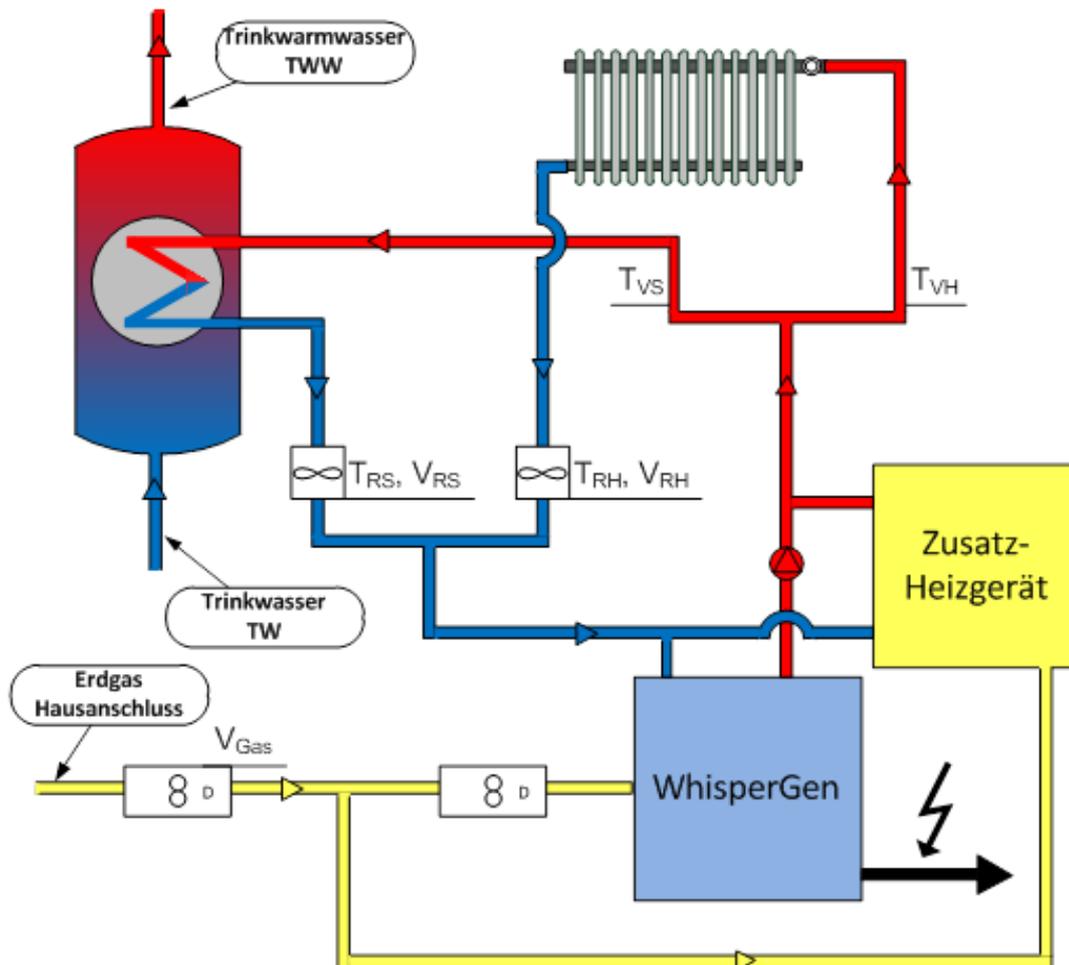
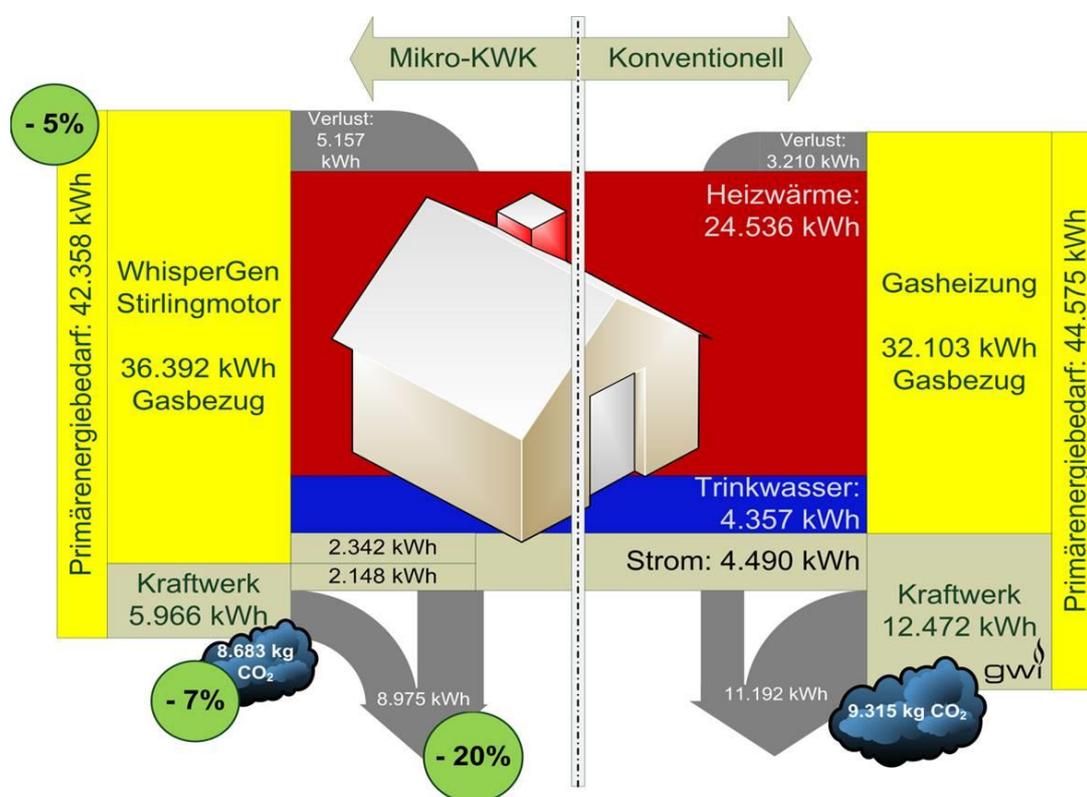


Abbildung 56: Schema des Anschlusses im Gebäude

Da es an beiden Standorten zu den erwarteten Anlagenstörungen, als auch zu kurzzeitigen Aussetzern der Messdatenerfassung gekommen ist, sind lediglich jene Zeitintervalle in die Auswertung eingeflossen, in denen die jeweilige Anlage planmäßig betrieben wurde. In diesen Zeiträumen ist es möglich gewesen, den Wärmebedarf des Gebäudes vollständig zu decken. Die deutliche Anzahl an Anlagenstörungen relativiert sich vor dem Hintergrund, dass sich die Anlagen zum damaligen Zeitpunkt noch im Teststadium befanden und somit noch nicht die Marktreife erlangt hatten.

Eine Vergleichskostenrechnung für einen Betrachtungszeitraum von Februar bis September 2006 zeigte Einsparungen von rund 125 Euro gegenüber einer konventionellen Versorgung mit einem Niedertemperaturkessel auf. Die Exploration dieses Ergebnisses auf ein Zeitintervall von einem Jahr korreliert mit potenziellen jährlichen finanziellen Ersparnissen in Höhe von 200 Euro bis 250 Euro.

Die folgende Abbildung zeigt die Energieflüsse bei zentraler und konventioneller dezentraler Versorgung eines im Feldtest betrachteten Haushalts schematisch auf und verdeutlicht die Entstehung der Einsparungen.



**Abbildung 57:** Energieverteilung und Verluste bei konventioneller Gasheizung und Mikro-KWK WhisperGen

Durch den Einsatz des Mikro-KWK-Systems konnte im betrachteten Objekt eine Primärenergieeinsparung von rund 5% realisiert werden. Des Weiteren wurden rund 632 kg CO<sub>2</sub> eingespart, was einer relativen Reduktion von 7% entspricht. Die größte relative Einsparung befindet sich bei der Reduktion der energetischen Verluste um 20%. Diese relative Reduktion entspricht einer absoluten jährlichen Verminderung der Arbeitsverluste von rund 2.217 kWh.

Durch die Feldtestmessungen konnte somit aufgezeigt werden, dass der Einsatz eines Mikro-KWK-Systems sowohl finanzielle Vorteile durch die Reduktion der verbrauchsgebundenen Kosten mit sich führt als auch ökologische und primärenergetische Einsparungen bedingt.

#### **4.1.2 Feldtestuntersuchung (EBI)**

Die DVGW-Forschungsstelle begleitet seit Ende der 1990er Jahre die Entwicklung von KWK-Technologien. Ein Teil der Untersuchungen konzentrierte sich vor allem auf die Prüfungen von gastechnischen Komponenten für den Einsatz in Mikro-KWK-Systemen, der gerade im Bereich von Brennstoffzellensystemen vom derzeit verfügbaren Regelwerk nur unzureichend abgedeckt wird. Bislang werden die Komponenten in diesen Fällen in Anlehnung an die vorhandenen Normen und die Erfüllung der Anforderungen aus der Gasgeräte-richtlinie getestet. Grundlegende Untersuchungen finden derzeit auch im Bereich Entschwefelung des Erdgases für Brennstoffzellensysteme statt. Diese zielen auf die Optimierung der Filterstandzeiten bei hinreichenden Sicherheitsreserven ab, um bei effizienter Ausschöpfung der Filtermaterialien keine Durchbrüche schwefelhaltiger Verbindungen zum Ende der Filternutzungsdauer zu riskieren und damit die Stack-Lebensdauer zu gefährden.

Weitere Untersuchungen haben sich im Herstellerauftrag bzw. auch aus dem Normungsumfeld ergeben, da hier die DVGW-Forschungsstelle den Obmann des europäischen Normungskreis für die neue Produktnorm prEN 50465 stellt. Gegenstand der Untersuchungen waren neue Effizienzbewertungsverfahren, nach denen KWK-System primärenergetisch bzw. nach den Hocheffizienzrichtlinien bewertet werden. In dem Fall eines Brennstoffzellensystems konnte die stete Fortentwicklung der Technologie über Jahre verfolgt werden, die eine Leistungsanpassung nach unten zu 1 kW<sub>el</sub> und von dem Aufbau und der Handhabung eine Reifung des Gerätes für den Betrieb unter normalen häuslichen Bedingungen beinhaltete. Einige Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigten den gleichen Trend wie die Laboruntersuchungen in diesem Projekt. Die Geräte arbeiten bei Volllast vergleichsweise effizient, Teillastbetrieb über Modulation und Takten gehen zu Lasten der Effizienz. Aus Verfolgung von Wärmebedarfsverteilung über das Jahr in Ein- und Mehrfamilienhäusern wird vor allem aus Sicht der Forschungsstelle eine passende Auslegung der Objekte mit einem entsprechenden Mikro-KWK-System zwingend, um auf entsprechende Laufzeiten zu kommen.

### 4.1.3 Feldtestuntersuchung (DBI)

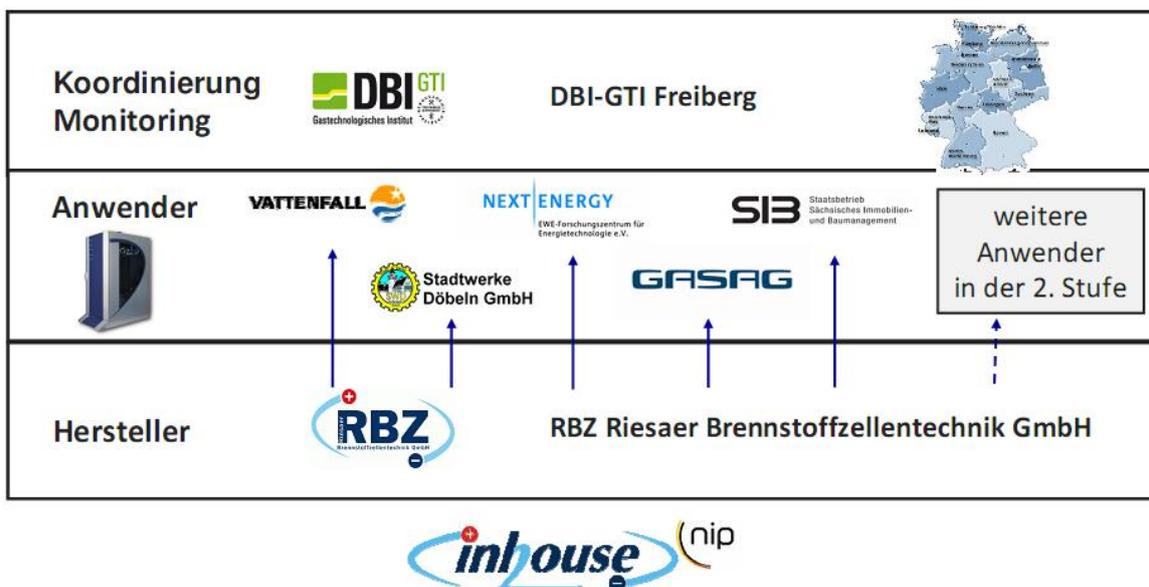
Am DBI-Gastechnologischen Institut gGmbH Freiberg wurden im Vorfeld des Projektes mehrere Mikro-KWK-Geräte im Rahmen von Monitoringaufgaben wissenschaftlich begleitet. Ergebnisse von folgenden Geräteuntersuchungen wurden von Herstellern freigegeben und werden im Folgenden kurz zusammengefasst:

- inhouse5000
- *lion*<sup>®</sup>-Powerblock (OTAG)
- HRe 28 (De Dietrich Remeha)
- WhisperGen EU1
- Energy Power Station 4 (Wätas)

#### 4.1.3.1 Feldtest inhouse5000

Im Rahmen des Feldtest- und Demonstrationsprojektes „PEM-Brennstoffzellenanlage inhouse5000 - Effiziente Gebäudeenergieversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung“, das durch das BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung gefördert wird, werden Brennstoffzellenheizgeräte des Herstellers Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH (RBZ) installiert und betrieben. Der Betrieb der Geräte wird an Standorten mit unterschiedlichen Bedarfsstrukturen während einer Testlaufzeit von mindestens zwei Jahren untersucht.

Die DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg koordiniert den Einsatz der Brennstoffzellenheizgeräte, führt das Monitoring der Standorte durch und wertet die Ergebnisse gemeinsam mit den Partnern des Vorhabens (s. Übersicht Abbildung 58) aus. Das Vorhaben wird in zwei Stufen realisiert. In der ersten Stufe werden derzeit 5 Anlagen getestet. In einer zweiten Stufe wird der Feldtest mit voraussichtlich 13 Brennstoffzellenheizgeräten einer nächsten Generation fortgeführt.



**Abbildung 58:** Projektstruktur des Feldtestprojektes

Bei dem Brennstoffzellenheizgerät handelt es sich um eine PEM-FC mit folgenden technischen Daten:

- Elektrische Leistung: 1,5 - 5 kW
- Wärmeleistung: 3,0 - 10 kW
- Heizkreistemperaturen: 50/70 °C
- Gesamtwirkungsgrad: 85 %
- Elektrischer Wirkungsgrad: 30 %
- Abmessungen (B x T x H): 0,7 x 1,0 x 1,5 m

Die Tabelle 14 zeigt die bisherigen Ergebnisse des Anlagenbetriebs an den 5 Feldteststandorten. In der

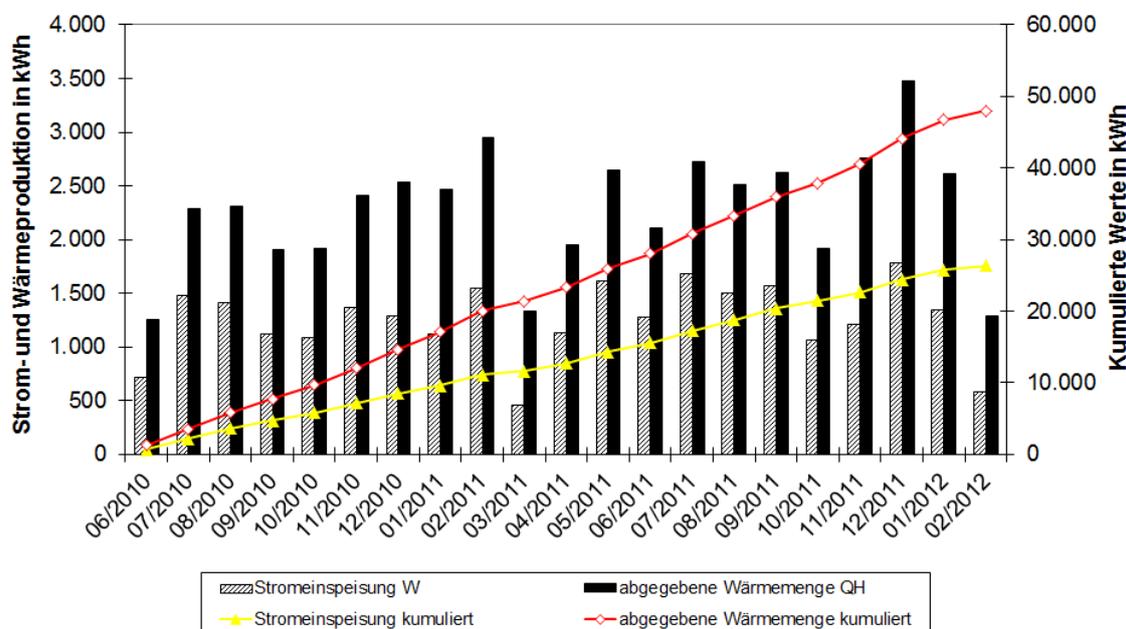
Abbildung 59 sind am Beispiel des Feldtestanlagenstandortes 1 (FTA1) die erzeugten monatlichen Energiemengen dargestellt.

**Tabelle 14:** Bisherige Ergebnisse des Feldtests

	 VATTENFALL	 Stadtwerke Döbeln GmbH	 NEXT ENERGY	 GASAG Fühl die Energie	 SIB Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement
<b>Feldtestpartner</b>	Vattenfall	SW Döbeln	NEXT ENERGY	GASAG	SIB
<b>Ort</b>	Berlin	Döbeln	Oldenburg	Berlin	Dresden
<b>Datum der Inbetriebnahme</b>	05/2010	08/2010	02/2011	03/2011	08/2011
<b>Betriebszeit (h)</b>	10.080	8.735	3.395	3.975	1.900
<b>eingespeiste Strommenge (kWh)</b>	24.454	21.328	6.838	9.667	4.295
<b>ausgekoppelte Wärme (kWh)</b>	44.098	43.919	16.852	16.178	7.957
<b>Start-/Stopppzyklen</b>	BZ: 147	BZ: 76	BZ: 52	BZ: 56	BZ: 41
	Ref.: 158	Ref.: 73	Ref.: 67	Ref.: 59	Ref.: 46
<b>Stack - Degradation (% pro 1.000 h)</b>	1,20%	1,04%	1,03%	1,15%	1,09%

Stand 31.01.2012

**FTA 1 - Werte für Stromeinspeisung und Wärmeabgabe pro Monat und kumuliert**



**Abbildung 59:** Erzeugte Energiemengen am Beispiel der Feldtestanlage 1

Die ersten Ergebnisse des Feldtests zeigen, dass das Brennstoffzellenheizgerät eine hohe Verfügbarkeit und Effizienz aufweist. Die Erkenntnisse aus dem Betrieb haben zu einer Verbesserung des Balance of Plant und der besseren Anpassung den Anlagenbetriebs an die jeweilige Gebäudesituation geführt. Die über den bisherigen Betriebszeitraum ermittelten elektrischen Nutzungsgrade betragen 26 – 28 Prozent. In Abhängigkeit von den an den Standorten vorliegenden Heizkreistemperaturen wurden Gesamtnutzungsgrade ermittelt, die die Herstellerangaben bestätigen.

#### 4.1.3.2 Feldtest *lion*<sup>®</sup>-Powerblock (OTAG)

Im Rahmen eines Feldversuches der GASAG, Berliner Gaswerke AG, wurde mit zusätzlicher Unterstützung durch den DVGW in den Jahren 2006 - 2009 ein Mini-Kraft-Wärme-Kopplungssystem, das auf Basis einer Freikolbendampfmaschine mit integriertem Lineargenerator (LINATOR) arbeitet, erprobt. Es handelt sich dabei um den *lion*<sup>®</sup>-Powerblock des Herstellers OTAG Vertriebs GmbH & Co. KG. Diese Strom erzeugende Heizung eignet sich aufgrund ihrer Leistungsparameter (elektrische Leistung: 0,3 - 2,0 kW ( $\pm 10$  Prozent) modulierend, thermische Leistung: 3,0 – 16,0 kW) optimal für den Einsatz in Ein- bis Dreifamilienhäusern zur gleichzeitigen Erzeugung von Elektroenergie und Wärme [DBI1, DBI2].

Im Projektzeitraum wurden Geräte an sieben Standorten in die wissenschaftliche Begleitung durch das DBI einbezogen. Der in der Abbildung 60 dargestellte Messstellenplan zeigt die an den Gerätestandorten zu erfassenden Messgrößen, die für eine Bilanzierung der Geräte notwendig waren.

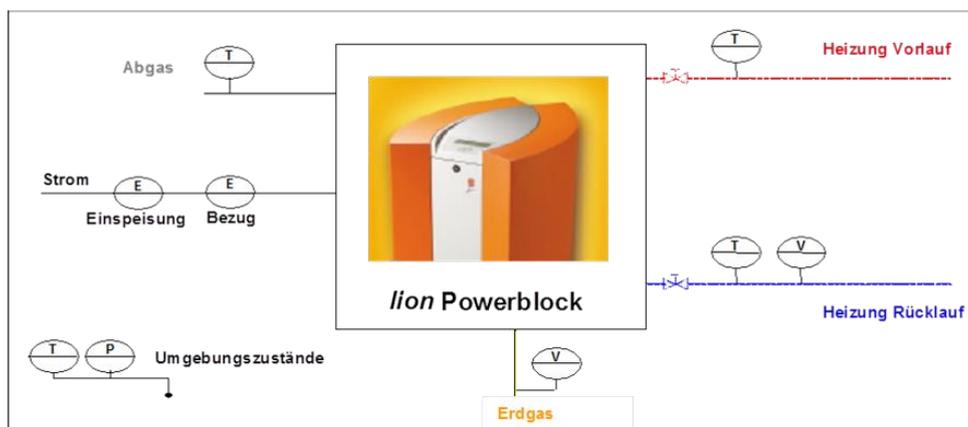


Abbildung 60: Messstellenplan eines Standortes

Im Rahmen des mehrjährigen Monitorings wurden Dauermessungen (Aufzeichnung von Minutenwerten der in der

Abbildung 60 dargestellten Mess-stellen) und stichprobenartige Messungen (Abgas- und Schallpegelmessungen) durchgeführt.

Die Einbindung des *lion*<sup>®</sup>-Powerblocks in bestehende Heizungsanlagen erforderte häufig die Durchführung nachträglicher Optimierungsmaßnahmen an den hydraulischen Systemen (Einbau von Puffer- bzw. Kombispeichern an 2 Standorten bzw. Einbau einer hydraulischen Weiche an einem Standort). Außerdem wurden seitens des Herstellers und der Servicepartner seit Beginn des Anlagenbetriebs an den Standorten Optimierungen der Anlagensteuerung vorgenommen, die sich in niedrigeren Schalzhäufigkeiten und längeren Betriebsphasen der Geräte niederschlugen. Außerdem wirkten sich diese Änderungen positiv auf die erreichten Nutzungsgrade aus. Die in die Abbildung 61 eingefügten mittleren Laufzeiten pro Takt, Schalzhäufigkeiten und mittlere Rücklauf-temperaturen zeigen mögliche Zusammenhänge zu den erreichten thermischen Nutzungsgraden. So wirkten sich insbesondere hohe Rücklauf-temperaturen und kurze Laufzeiten pro Takt negativ auf den thermischen Nutzungsgrad aus.

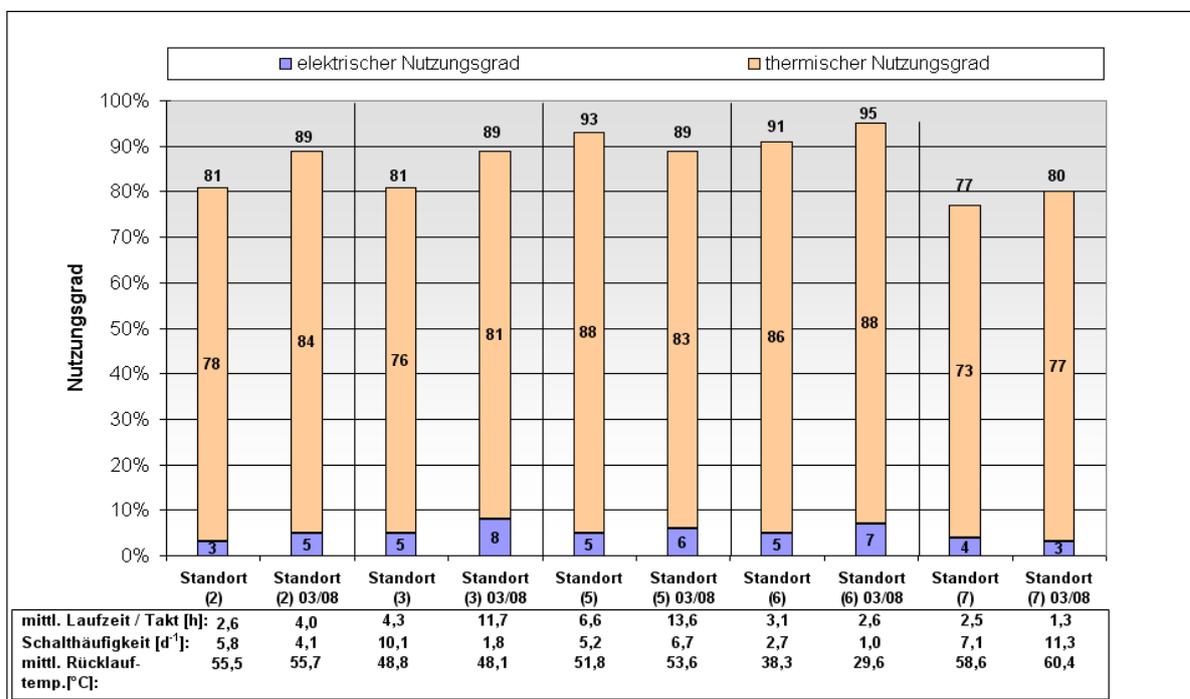


Abbildung 61: Mittlere Nutzungsgrade im Berichtszeitraum und im Monat März 2008

In der Tabelle 15 sind ausgewählte Kennziffern dargestellt, die in längeren stationären Betriebszuständen ermittelt wurden, die die Herstellerangaben aber nur teilweise bestätigen.

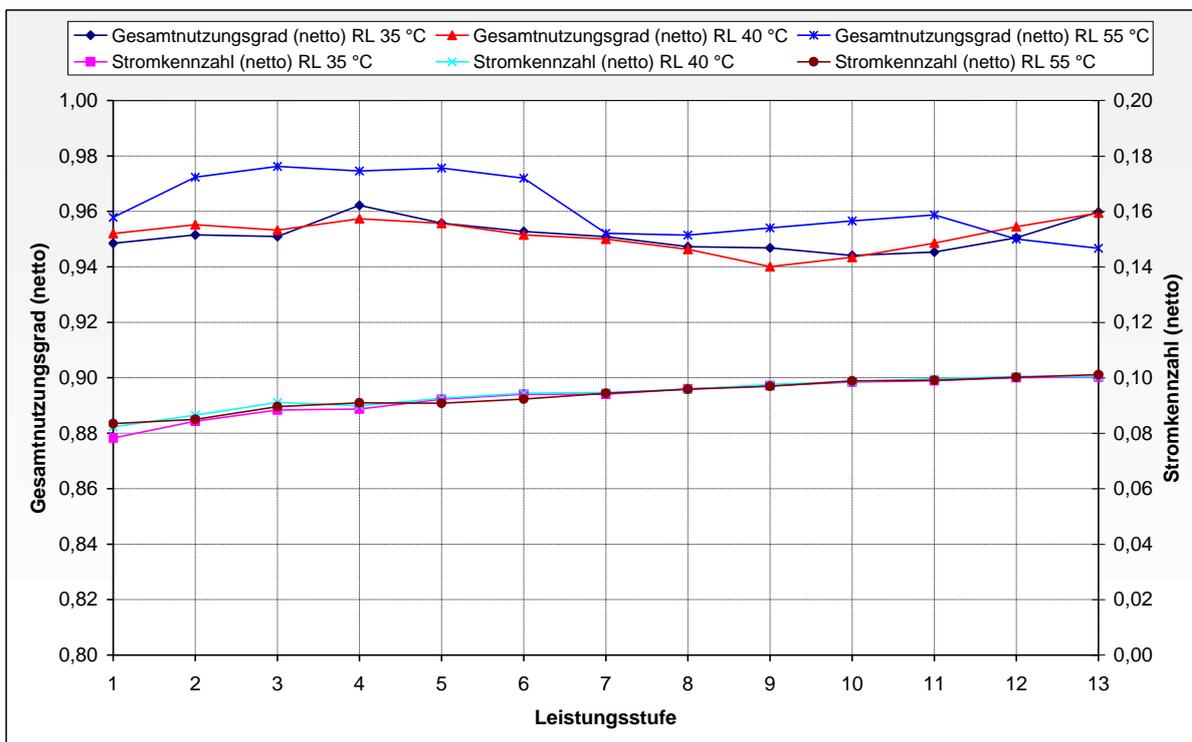
**Tabelle 15:** Ausgewählte Kenngrößen in langen stationären Betriebszuständen

Standort	(2)	(3)	(5)	(6)	(7)
Stationärer Betrieb					
- Gesamtnutzungsgrad	90 %	90 %	91 %	96 %	79 %
- thermischer	84 %	82 %	83 %	87 %	73 %
- elektrischer (netto)	6 %	8 %	8 %	9 %	6 %
bei mittlerer elektr. Leistung (W)	533	1.175	824	1.830	650
Leistung bezogen auf P <sub>N</sub> (2.000 W)	27 %	59 %	41 %	92 %	33 %
Mittlere Rücklauftemperatur (°C)	55,7	48,0	50,2	40,5	56,6
Stromkennzahl	0,06	0,10	0,09	0,10	0,08

Im Verlaufe des Feldtests wurde ein Gerät von einem Standort in Berlin in das Technikum des DBI nach Freiberg verlegt, sodass in Absprache mit dem Hersteller ein umfangreicheres Messprogramm durchgeführt werden konnten.

Im Rahmen von Prüfstandsuntersuchungen am Standort DBI Freiberg wurde der *lion*<sup>®</sup>-Powerblock jeweils in allen verfügbaren Leistungsstufen, bei 3 unterschiedlichen Rücklauftemperaturen (35 °C; 40 °C; 55 °C), betrieben. Aus den Messwerten wurden Gesamtnutzungsgrade und Stromkennzahlen (Nettowerte) berechnet und im Diagramm in der Abbildung 62 grafisch dargestellt.

Bei Volleistung (Stufe 13) erreichte das Gerät die höchsten elektrischen Wirkungsgrade und Stromkennzahlen. Eine Abhängigkeit von der Rücklauf-temperatur konnte erwartungsgemäß nicht festgestellt werden. Der Gesamtnutzungsgrad erreichte einen durchschnittlichen Wert von ca. 96 %. Es ist keine signifikante Abhängigkeit von der Leistungsstufe zu erkennen.



**Abbildung 62:** Kenngrößen des *lion*<sup>®</sup>-Powerblock bei unterschiedlichen Rücklauftemperaturen

Abschließende Bewertung der Marktreife:

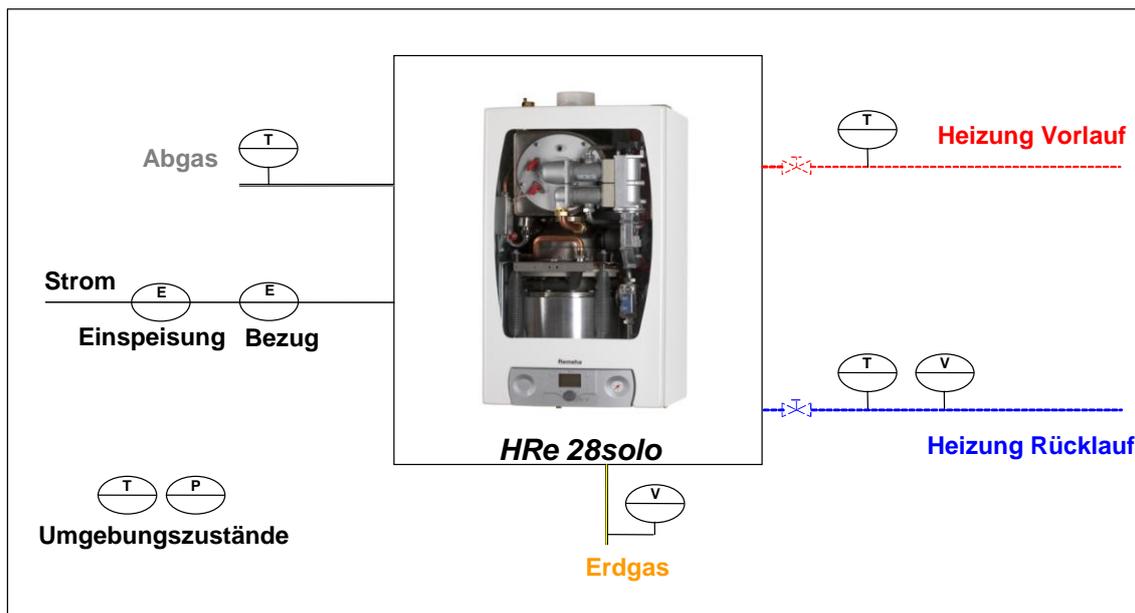
Gesamtnutzungsgrad:	durchschnittlich gut (bezogen auf Brennwertnutzung)
elektrischer Nutzungsgrad:	Bruttowerte erreichen Herstellerangaben (In der Auswertung wurden Nettowerte verwendet.)
Abgasverluste:	sehr gut
Abgasemissionen: CO	sehr gut
NO <sub>x</sub>	sehr gut
Schallemissionen:	gut (standortabhängig)
Verfügbarkeit:	Optimierungsbedarf (teilweise Ausfall der Stromerzeugung, Heizbetrieb gewährleistet)

#### **4.1.3.3 Feldtest eVita HRe 28 (Remeha)**

Im Rahmen eines einjährigen Feldversuches der GASAG, Berliner Gaswerke AG, wurden zwei Mikro-KWK-Anlagen mit integriertem Brennwertkessel des Herstellers Remeha getestet. Dabei handelte es sich um den eVita HRe 28, eine Kombination aus Stirlingmotor und Brennwerttherme, der in zwei unterschiedlichen Varianten entwickelt wurde. Während des Feldversuchs wurden jeweils ein Sologerät (eVita HRe 28s) mit einem internen Wärmeübertrager in einem Einfamilienhaus und ein Kombigerät (eVita HRe 28c) mit zwei integrierten Wärmeübertragern in einer Etagenwohnung getestet [DBI3].

Beim Solo-Gerät erfolgt die Erzeugung von Warmwasser durch die Umschaltung des Heizkreises auf einen Warmwasserspeicher, beim Kombigerät kann mit Hilfe eines zweiten, integrierten Plattenwärmeübertragers, Warmwasser im Durchlaufprinzip erzeugt werden. Das Gerät eignet sich aufgrund seiner Leistungsparameter (elektrische Leistung: 0,8 - 1,0 kW, thermische Gesamtleistung: 4,0 - 24,0 kW, Warmwasserleistung: bis 28 kW) optimal für den Einsatz in Einfamilienhäusern zur gleichzeitigen Erzeugung von Elektroenergie und Wärme.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurden Dauermessungen (Aufzeichnung von Minutenwerten der Abbildung 63 dargestellten Messstellen) und stichprobenartige Messungen an den Geräten (Abgas- und Schallpegelmessungen) durchgeführt. Der Unterschied bei der messtechnischen Ausrüstung bestand darin, dass beim Kombigerät die Warmwasser-Erzeugung gesondert bilanziert wurde.



**Abbildung 63:** Messstellenplan für die äußere Bilanzierung des HRe 28s-Gerätes

Während des einjährigen Feldversuches arbeiteten die im Projekt begleiteten Remeha eVita HRe 28-Geräte mit unterschiedlicher Verfügbarkeit.

Beim HRe 28s-Gerät traten nach den ersten 4 Betriebsmonaten einige Betriebsunterbrechungen auf. Bei aufgetretenen Störungen trat jeweils zunächst eine Abschaltung des KWK-Blocks auf, wonach der interne Brennwert-Block wiederholt nicht in Betrieb ging. Damit konnte die Versorgungssicherheit (Deckung des Wärmebedarfs) nicht ständig gewährleistet werden, sodass durch den Betreiber manuelle Umschaltungen des Heizungssystems auf das redundant installierte Brennwert-Gerät nötig waren.

Das HRe 28c-Gerät arbeitete, abgesehen von einer ca. 3-wöchigen Betriebsunterbrechung des KWK-Blocks, störungsfrei. In diesem Zeitraum wurde der Wärmebedarf des Objektes durch den internen Brennwert-Block gedeckt. Damit konnte die Versorgungssicherheit (Deckung des Wärmebedarfs) ständig gewährleistet werden.

Die Hauptkennziffern der eVita HRe 28-Geräte, der elektrische und der thermische Nutzungsgrad, sind zuzüglich des daraus resultierenden Gesamtnutzungsgrades in der Abbildung 64 und in der Abbildung 65 als Monatsmittelwerte dargestellt. Die im Berichtszeitraum gemittelten Kennziffern, sowie ermittelte Kennziffern in längeren stationären Betriebsphasen zeigen die Tabelle 16 und die Tabelle 17.

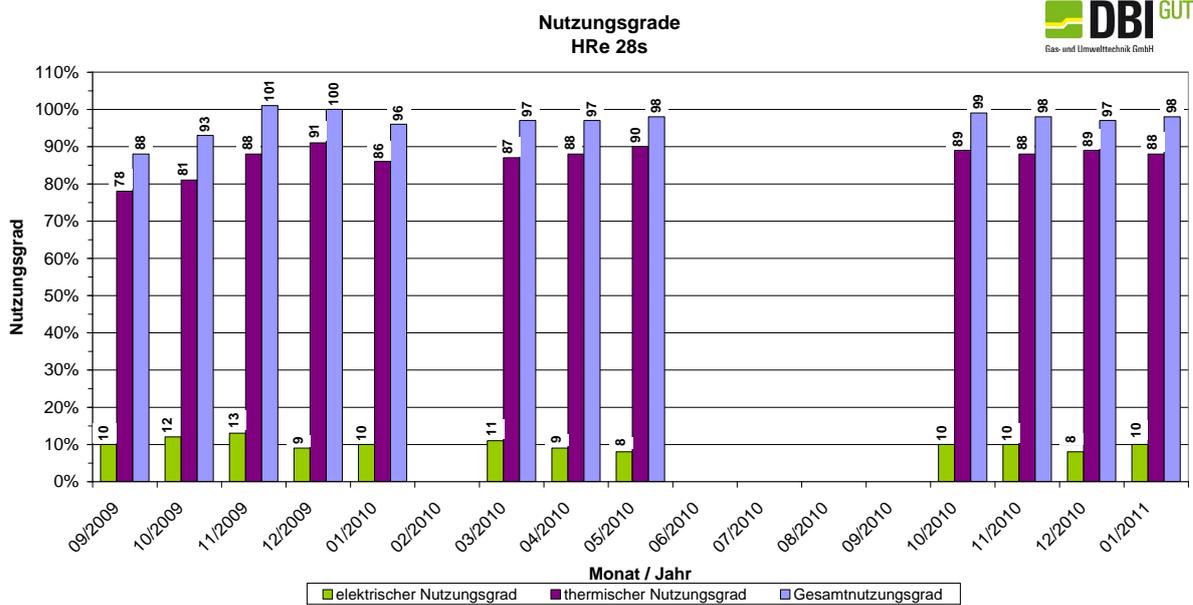


Abbildung 64: Mittlere monatliche Nutzungsgrade (HRe 28s)

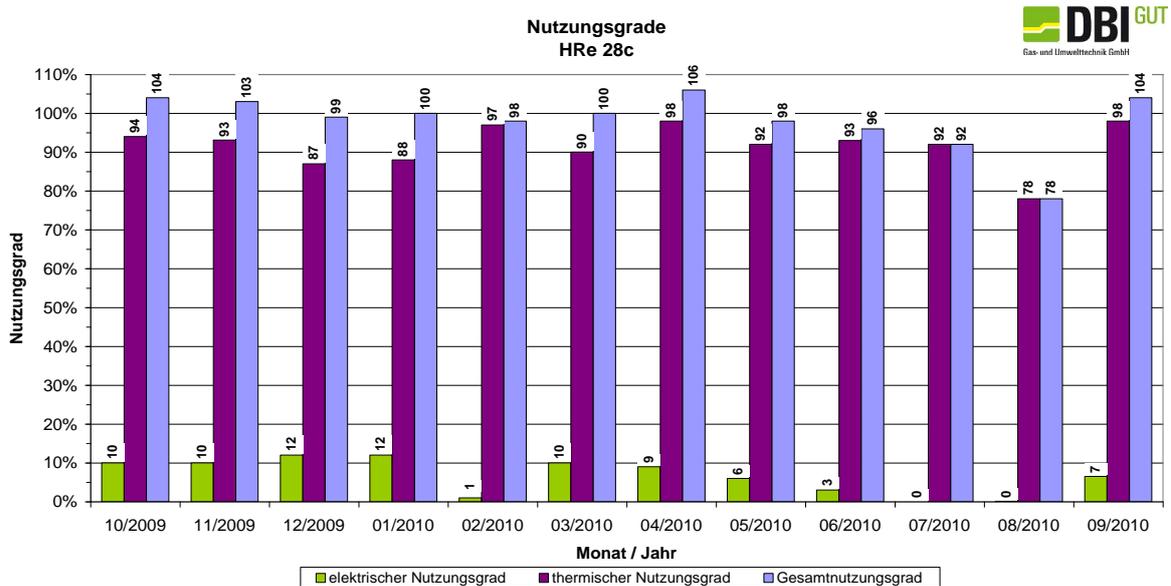


Abbildung 65: Mittlere monatliche Nutzungsgrade (HRe 28c)

**Tabelle 16:** Erreichte Kennziffern im Berichtszeitraum (eVita HRe 28s)

	Einh.	Mittelwerte Berichtszeitraum	Stationärer Betriebszustand Heizung (KWK-Block)	Stationärer Betriebszustand WW-Bereitung (KWK- und Brennwert-Block)	Herstellerangaben (KWK-Block) <sup>1)</sup>
Gesamtnutzungsgrad	%	96	103	96	93,6
thermischer Nutzungsgrad	%	86	88	85	-
elektrischer Nutzungsgrad (netto)	%	10	15	11	-
Stromkennzahl		0,12	0,17	13	0,17
mittlere Temperatur Rücklauf-Heizkreis	°C	48	49	64	49

<sup>1)</sup> bezogen auf eine Heizkreistemperatur von 60 °C Vorlauf, 50 °C Rücklauf

**Tabelle 17:** Erreichte Kennziffern im Berichtszeitraum (eVita HRe 28c)

	Einh.	Mittelwerte Berichtszeitraum	Stationärer Betriebszustand Heizung (KWK-Block)	Stationärer Betriebszustand WW-Bereitung (Brennwert-Block)	Herstellerangaben (KWK-Block) <sup>2)</sup>
Gesamtnutzungsgrad	%	99	106	100	105,4
thermischer Nutzungsgrad	%	92	93	100	-
elektrischer Nutzungsgrad (netto)	%	7	13	-	-
Stromkennzahl		0,08	0,14	-	0,17
mittlere Temperatur Rücklauf / Frischwasser	°C	27	25	12	30

<sup>2)</sup> bezogen auf eine Heizkreistemperatur von 40 °C Vorlauf, 30 °C Rücklauf

Die Tabelle 16 und die Tabelle 17 zeigen außerdem, dass in stationären Betriebsphasen höhere Nutzungsgrade sowohl vom HRe 28s, als auch vom HRe 28c erreicht wurden, als bei der im praktischen Betrieb aufgetretenen intermittierender Betriebsweise. Die Ursachen dafür bestehen insbesondere in der hohen Schalzhäufigkeit der Geräte und den damit verbundenen häufigen Aufheiz- und Abkühlphasen, in denen erhöhte Verluste auftreten. Außerdem ist in der Abbildung 65 (Nutzungsgrade HRe 28c) erkennbar, dass beim alleinigen Betrieb des Brennwert-Blocks zur Warmwassererzeugung (07 – 08/2010) niedrigere Nutzungsgrade als bei der Raumwärmeerzeugung auftraten. Auch hier liegt die Ursache insbesondere in den kurzen Betriebsphasen der Warmwasserbereitung, die häufig nur wenige Minuten betragen. Während dieser kurzen Betriebsphasen

werden neben den Warmwasser-Armaturen auch die am Gerät angeschlossenen Rohrleitungen und Armaturen des Heizkreises erwärmt und geben die Wärme langsam an den Aufstellraum ab. Diese messtechnisch nicht erfassten Wärmemengen, führen zu einer Verschlechterung des thermischen Nutzungsgrades des Gerätes.

Um die ermittelten Kennziffern mit Herstellerangaben vergleichen zu können, wurden in der Tabelle 16 und in der Tabelle 17 Angaben des Herstellers eingesetzt, die bei Nennleistung des KWK-Blocks bei Heizkreistemperaturen ermittelt wurden, die mit den aufgetretenen Betriebsbedingungen (HRe 28s - Temperaturverhältnis Heizkreis 60 °C / 50 °C (Vor- / Rücklauf); HRe 28c - Temperaturverhältnis Heizkreis 40 °C / 30 °C (Vor-/Rücklauf)) vergleichbar sind. Demnach wurde im stationären Betrieb des KWK-Blocks der vom Hersteller angegebene Gesamtnutzungsgrad bei beiden Geräten erreicht bzw. überschritten. Die für den Berichtszeitraum berechneten Mittelwerte des Gesamtnutzungsgrades liegen beim HRe 28s über den Herstellerangaben, beim HRe 28c werden die vom Hersteller angegebenen Werte um ca. 6 Prozent unterschritten. Die für den Nenn- und Teillastbetrieb angegebenen Stromkennzahlen wurden im stationären Betrieb vom HRe 28s erreicht, beim HRe 28c fast erreicht. Herstellerangaben über den elektrischen und thermischen Nutzungsgrad der HRe 28-Geräte liegen nicht vor.

#### Abschließende Bewertung der Remeha eVita HRe 28-Geräte:

Gesamtnutzungsgrad:	sehr gut
Stromkennzahl:	gut (Herstellerangaben werden unter stationären Bedingungen fast erreicht, für den Gerätetyp sehr gut)
Abgasverluste:	sehr gut
Abgasemissionen: CO	sehr gut
NOx	sehr gut
Schallemissionen:	befriedigend (Optimierungsbedarf), wird lt. Herstellerangabe beim Seriengerät um ca. 5 dB(A) niedriger sein
Verfügbarkeit:	befriedigend (Aufgetretene Störungen des KWK-Blocks weisen auf eine teilweise Überlastung interner Baugruppen hin.) Laut Herstellerangabe wird die Betriebssicherheit beim Seriengerät höher sein.

#### 4.1.3.4 Prüfstandstest und Monitoring WhisperGen EU1

Im Rahmen der Markteinführung des Mini-BHKW-Systems vom Typ WhisperGen EU1 wurden erste Geräte durch die Direkt-Service Energie GmbH (DSE), ein Unternehmen der GASAG Gruppe, vertrieben. Eines der ersten Seriengeräte (Serien-Nummer 72) wurde über einen Zeitraum von 3 Monaten beim DBI getestet und wissenschaftlich begleitet [DBI4].

Der WhisperGen wurde hydraulisch in einen Kühlkreis im Technikum des DBI eingebunden, dessen Kühlleistung regelbar ist. Damit konnten Rücklauf-temperaturen zwischen 30 °C und 70 °C für den Betrieb des WhisperGen bereitgestellt werden. Zur Regelung des Wärmebedarfs wurde ein thermostatischer Regler am potentialfreien Reglereingang installiert, der eine Einstellung der maximalen Vorlauf-temperatur ermöglicht. Die Zuschaltung des Zusatzbrenners erfolgte manuell über einen Schalter, der ebenfalls am potentialfreien Regeleingang des WhisperGen angeschlossen wurde.

Die Abbildung 66 zeigt ein Foto des Gerätestandortes am DBI Freiberg. Am Standort wurde außerdem die zur Bilanzierung des Gerätes benötigte Messtechnik installiert und die Messdaten mit Hilfe eines Dataloggers aufgezeichnet. Stichprobenartig erfolgten im Betriebszeitraum Abgas- und Schallpegelmessungen.



**Abbildung 66:** Gerätestandort am DBI Freiberg

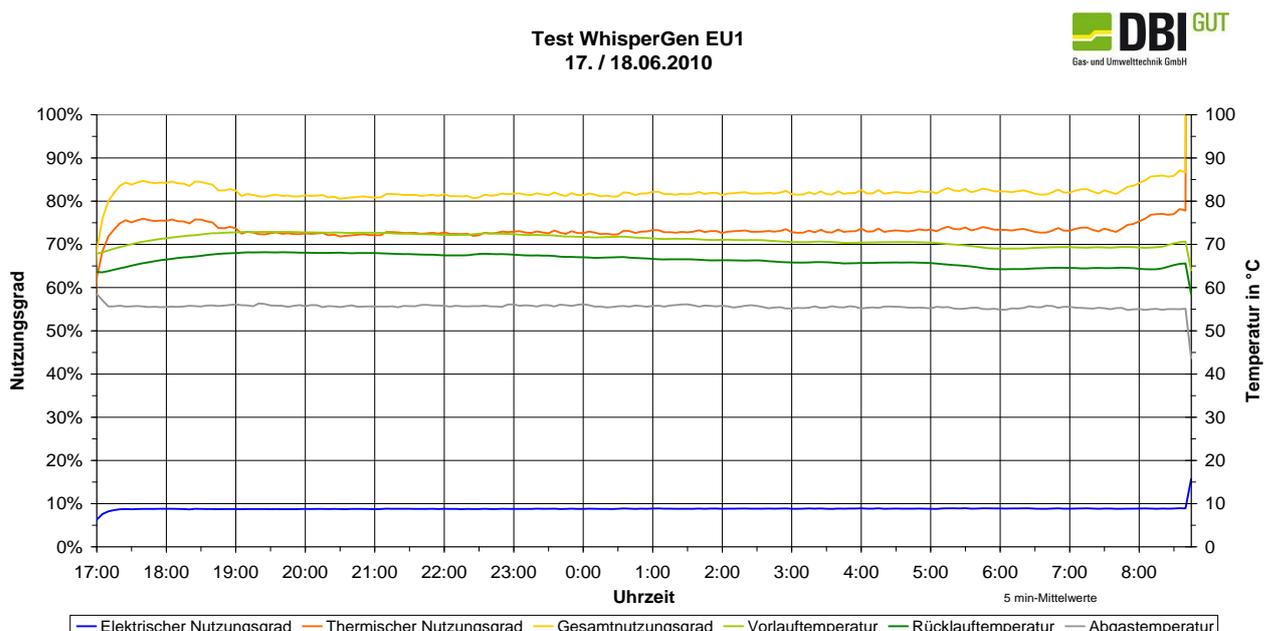
Während des Gerätetests wurde der WhisperGen in allen möglich Betriebsarten (KWK-Betrieb, KWK + Zusatzbrenner, nur Zusatzbrenner) bei unterschiedlichen Rücklauftemperaturen des Heizkreises betrieben. Da das Gerät nicht modulierend arbeiten kann, wurden stationäre und intermittierende (mit unterschiedlicher Taktlänge) Betriebszustände realisiert, um einen möglichst praxisnahen Betrieb zu simulieren. Zwischenzeitlich erfolgten durch den Gerätehersteller die Installation eines Updates der Systemsoftware und eine Optimierung der Brennereinstellungen. Dabei wurde die Brennerleistung um ca. 10 % verringert.

Im Rahmen der Auswertung des Testbetriebes wurden sowohl das allgemeine Betriebsverhalten, als auch der stationäre und der intermittierende Betrieb des Gerätes beurteilt. Die Abbildung 67 zeigt beispielhaft den Nutzungsgradverlauf während einer stationären Betriebsphase.

Eine Zusammenfassung der ermittelten Kennziffern und der jeweiligen Betriebsbedingungen sind in der

Tabelle 18 für Betriebszustände des Gerätes bei alter und neuer Brennereinstellung zusammengestellt. In der

Tabelle 18 wird sichtbar, dass die veränderte Brennereinstellung neben der Verringerung der mittleren Stromeinspeisung, zu einer Verschlechterung der Nutzungsgrade geführt hat. Für den Betriebszustand 1 ist der Vergleich wegen der unterschiedlichen Rücklauftemperaturen nicht exakt möglich. Diese wirken sich aber nicht auf den elektrischen Wirkungsgrad aus.



**Abbildung 67:** Nutzungsgrade während einer stationären Betriebsphase

**Tabelle 18:** Energie- und Betriebskennziffern in ausgewählten Betriebszuständen

	Betriebszustand 1 (nur KWK-Block)		Betriebszustand 2 (KWK-Block + Zusatzbrenner)		Betriebszustand 3 (nur Zusatzbrenner)
	alt	neu	alt	neu	neu
Brennereinstellung					
Laufzeit in h:min	23:00	18:50	5:50	4:00	22:40
mittlere Rücklauf­temperatur in °C	50,8	63,3	47,0	47,6	42,1
mittlere Stromeinspeisung $\bar{P}$ in W	912	723	887	739	0
elektrischer Nutzungsgrad netto $\bar{\eta}_{el}$	0,09	0,08	0,07	0,06	0
thermischer Nutzungsgrad $\bar{\eta}_{th}$	0,85	0,81	0,89	0,84	0,85
Gesamtnutzungsgrad $\bar{\eta}_{ges}$	0,94	0,89	0,96	0,90	0,85
Stromkennzahl $\sigma_{Nt}$	0,11	0,10	0,07	0,07	0

Bei dem getesteten WhisperGen handelt es sich, laut Aussage des Herstellers, um ein etwas älteres Gerät. Inzwischen wurden laut Hersteller einige Systemkomponenten verbessert, so dass die vom Hersteller angegeben technischen Daten eingehalten werden können.

Abschließende Bewertung des Gerätes:

Thermischer Nutzungsgrad:	durchschnittlich gut (Herstellerangaben von > 85 % werden nur unter optimalen Betriebsbedingungen erreicht)
Elektrischer Nutzungsgrad:	durchschnittlich gut (Herstellerangaben von 10 - 11 % werden nur unter optimalen Betriebsbedingungen erreicht)
Abgasverluste:	sehr gut
Abgasemissionen: CO	sehr gut
NO <sub>x</sub>	sehr gut (nach Brennereinstellung)
Schallemissionen:	gut (standortabhängig)

Verfügbarkeit: gut (Quittierung von Betriebsstörungen bzw. Neustart des Gerätes (Trennung vom Stromnetz) war mehrfach nötig)

#### 4.1.3.5 Prüfstandstest EPS 4 (WÄTAS)

Im Rahmen eines Prüfstandsversuches erfolgten Messungen an einer WÄTAS-Energy Power Station. Dabei wurde die Anlage in 5 verschiedenen Leistungsstufen bei 2 verschiedenen Rücklauftemperaturen (30 °C; 45 °C) betrieben. In jeder Leistungsstufe erfolgte ein mindestens 30-minütiger Betrieb, um eine stationäre Betriebsweise der WÄTAS-Energy Power Station gewährleisten zu können. Über die installierte Messwerterfassung wurden die relevanten Messdaten alle 10 Sekunden erfasst und die benötigten Leistungen und Kennziffern (Nutzungsgrade, Stromkennzahl) berechnet.

Die aus den Prüfstandsversuchen ermittelten Gesamtnutzungsgrade und Stromkennzahlen (Nettowerte) sind in der Abbildung 68 zusammenfassend dargestellt. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass bei dem Betrieb des Gerätes mit Nennleistung die höchste Stromkennzahl erreicht wird. Der Gesamtnutzungsgrad ist bei der niedrigsten Rücklauftemperatur (30 °C) allgemein am höchsten und erreicht ebenfalls bei der höchsten Leistungsstufe den höchsten Wert.

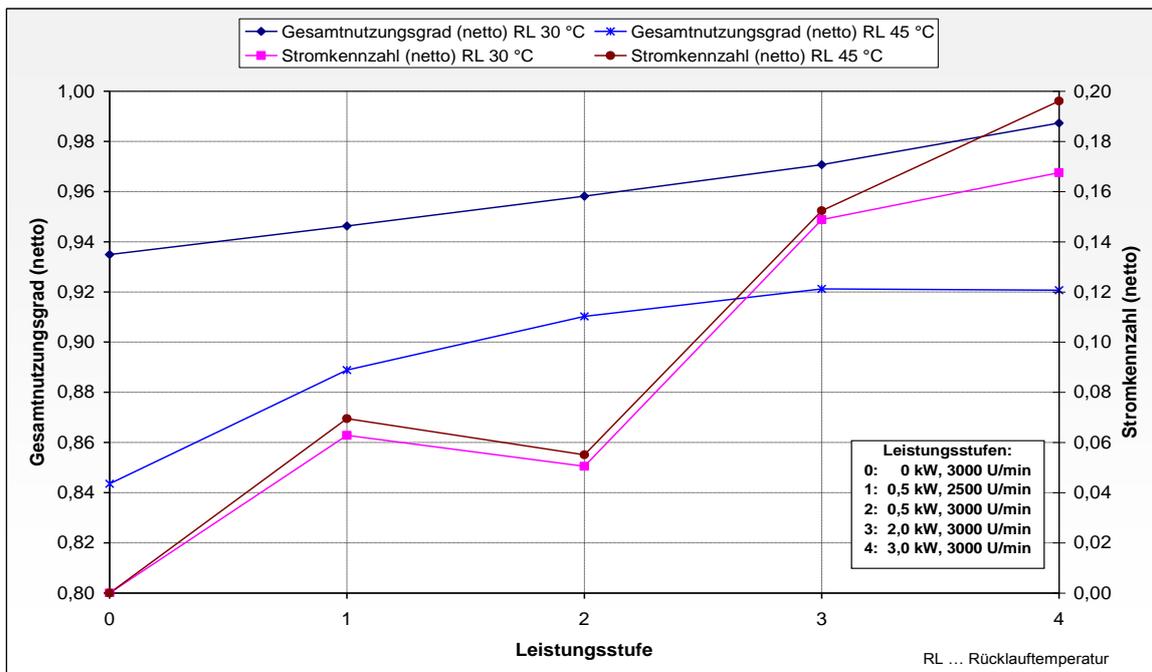


Abbildung 68: Kenngrößen der EPS 4 bei 2 unterschiedlichen Rücklauftemperaturen

## 4.2 Aktueller Dauertest Bluegen SOFC-Brennstoffzelle am GWI

Mit sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden von z. T. über 60 % stellt das SOFC-Brennstoffzellenmodul „BlueGen“ der Firma CFCL eine hoch innovative Technologie zur gleichzeitigen Bereitstellung von Wärme und Strom dar. Bei einer elektrischen Leistung von rund 500 W im Nennlastbetrieb eignet sich die Anlage insbesondere in Gebäuden mit mittleren Heizlasten und kann nahezu das ganze Jahr ohne Unterbrechung betrieben werden um somit einen Teil der anfallenden Wärmebedarfe zu decken. Der in diesem Betrieb gleichzeitig anfallende elektrische Strom wird vorzugsweise im Haus genutzt. Mit einer elektrischen Leistung von ca. 1500 W wird die Grundlast des Strombedarfs im Ein- bis Zweifamilienhaushalt durch die sehr hohen Laufzeiten nahezu vollständig gedeckt.

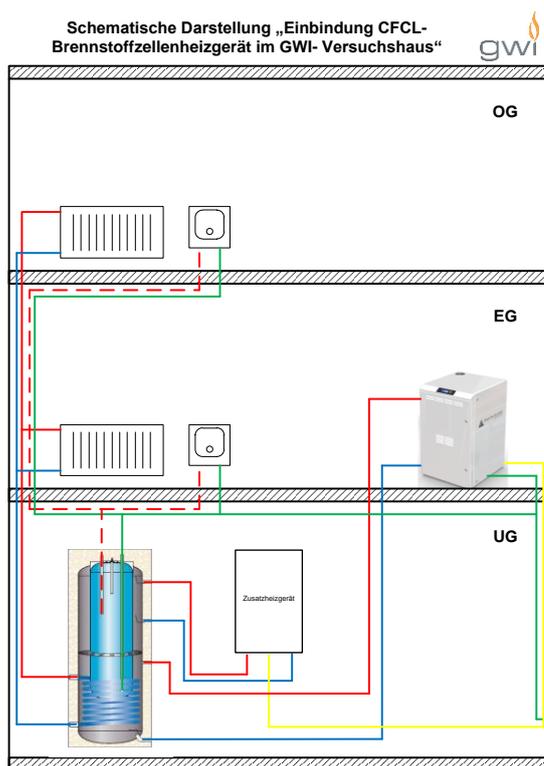
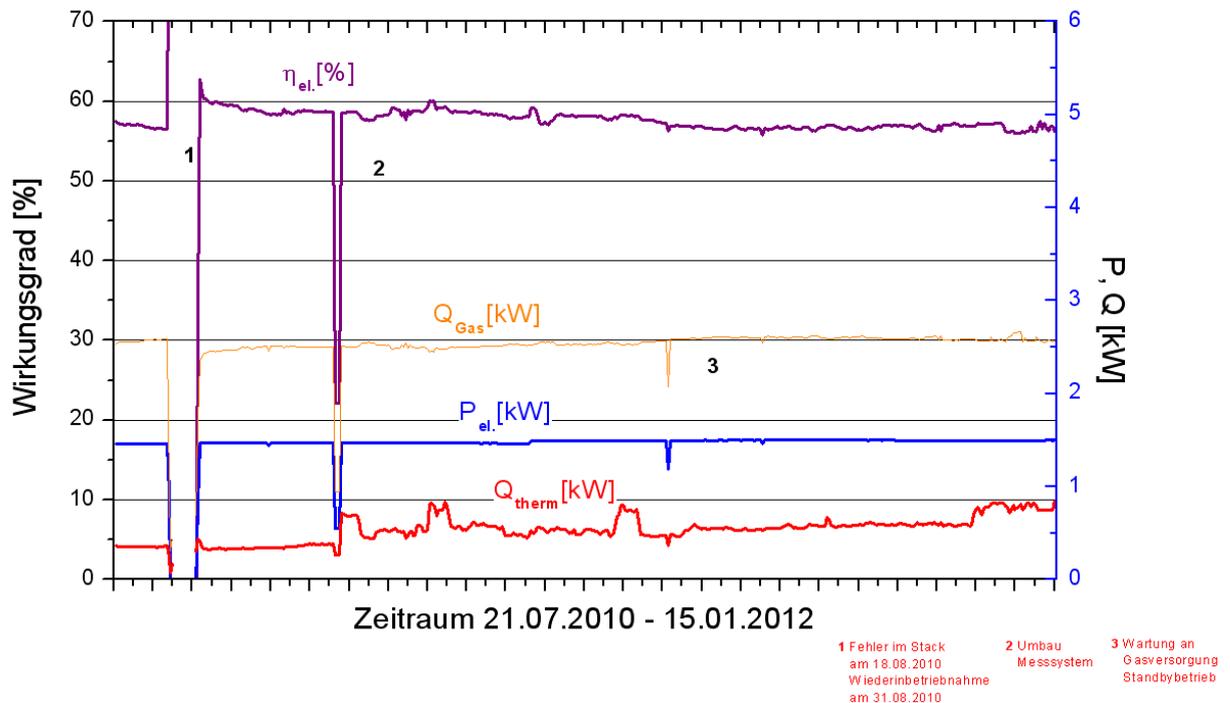


Abbildung 69: Brennstoffzelleninstallation im GWI-Versuchshaus

### Kenndaten Brennstoffzelle CFCL



**Abbildung 70:** Brennstoffzellenbetrieb im GWI-Versuchshaus

In Abbildung 70 sind die Leistungsdaten sowie der elektrische Wirkungsgrad über den Betriebszeitraum der SOFC-Brennstoffzelle im GWI-Versuchshaus dargestellt. Deutlich ist am Punkt 1 der aufgetretene Stackfehler zu erkennen. Hervorgerufen wurde dieser durch zwei Ereignisse. Bei einer routinemäßigen Kontrolle des Gasversorgungssystems wird das GWI für kurze Zeit vom Erdgasnetz getrennt. Zur Vermeidung einer ungewollten Abschaltung des Brennstoffzellenmoduls wurde eine redundante Versorgung mit Flaschengas im Versuchshaus vorgesehen. Bei Umschaltung von Leitungsgas auf Flaschengas wurde noch vorhandene Luft in den Brennstoffzellenstapel gedrückt, was zu einem spontanen absinken der Zellstapelspannung führte. Die von CFCL aufgenommenen Daten zeigen allerdings, dass der Stapel dieses Ereignis zunächst ohne Schaden überstanden hat. Durch eine Oxidation, hervorgerufen durch die zugeführte Luft, im Prereformer hat dieser jedoch möglicherweise Schaden genommen. Zur endgültigen ungewollten Abschaltung der Anlage führte am selben Tag die Unterbrechung der internen Kommunikation zum Subsystem, was ein unkontrolliertes Abkühlen der Anlage zur Folge hatte. Der undichte Zellstapel, sowie das „Gennex“-Modul mit dem Prereformer wurden daraufhin ausgetauscht und die Anlage wieder in Betrieb genommen. Im weiteren Verlauf der Messungen

konnten keine erneuten Defekte beobachtet werden, die Anlage wird seitdem problemlos betrieben.

Das zweite erkennbare Absinken der Leistungsdaten ist durch einen Messgeräteumbau und der Integration eines Pufferspeichers sowie eines Zusatzheizgerätes in das Gesamtsystem zu erklären. Während dieses Umbaus wurde die Brennstoffzelle in Nennlastpunkt weiter betrieben.

Der dritte Punkt zeigt eine erneut routinemäßige Wartung der Gasversorgung am GWI. Um einen weiteren Ausfall zu vermeiden wurde in Abstimmung mit CFCL die Anlage in den Standby-Betrieb versetzt um den Wechsel von Leitungsgas auf Flaschengas für die Anlage schonender vollziehen zu können. Nach der Wartung konnte das Brennstoffzellengerät wieder problemlos in den Nennlastbetrieb überführt werden.

Hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades ist eine zu erwartende Degradation zu erkennen. Diese beträgt etwa 2 % pro Jahr und liegt damit etwas über dem kommerziellen Ziel von CFCL.

## 4.3 Messprogramme Laboruntersuchungen

Die Vermessung der Mikro-KWK-Geräte erfolgte in Abstimmung zwischen den Instituten und dem Auftraggeber hinsichtlich eines Wirkungsgradkennfeldes und einer dynamischen Nutzungsgradmessung.

Während das Wirkungsgradkennfeld jeweils für ein Temperaturpaar konventionell über stationäre Messungen ermittelt werden kann, wurde zur Nutzungsgradbestimmung die neu erarbeitete und im November 2011 als Endfassung veröffentlichte DIN 4709, „Bestimmung des Normnutzungsgrades für Mikro-KWK-Geräte bis 70 kW Nennwärmebelastung“ [DIN 4709] als Referenz genutzt.

### 4.3.1 Normnutzungsgradmessungen nach DIN 4709

Mit zunehmender Marktdurchdringung von Mikro-KWK-Anlagen ist es von großer Bedeutung, einen repräsentativen, empirisch ermittelten Vergleichswert zur Effizienz solcher Anlagen angeben zu können. Private Nutzer, Architekten, Planer, Energieberater und nicht zuletzt das beratende und ausführende Handwerk bekommen mit diesem Wert eine fundierte Größe zur Beratung und Vorauswahl an die Hand.

Neben den reinen Wirkungsgraden von Heizgeräten, die stationär unter besten Bedingungen gemessen werden und keinen relevanten Praxisbezug aufweisen, konnten für konventionelle Heizgeräte (Brennwert, Niedertemperatur) mit Hilfe der DIN 4702-8 sog. Normnutzungsgrade ermittelt werden. Hierzu werden fünf Teillastwirkungsgrade stationär am Prüfstand gemessen und über eine Formel zu einem Normnutzungsgrad berechnet. Diese fünf Lastpunkte sollen den gesamten Lastbereich abdecken, den ein Wärmeerzeuger in einem Jahr durchläuft.

Für konventionelle, monovalent betriebene Heizgeräte konnte diese Herangehensweise als hinreichend genau und einfach zu beherrschende Prüfmethodik genutzt werden. Eine Überprüfung von z. T. bivalent arbeitenden innovativen Mikro-KWK-Systemen, die in vielen Fällen auch nur als System vertrieben werden, nach dieser Messmethode ist, wie nachfolgend beschrieben, nicht sinnvoll. Ein optimaler Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen im häuslichen Sektor ist in der Regel nur mit einem Puffer- bzw. Kombispeicher möglich. Zudem wird in den meisten Fällen zur Deckung von Spitzenlasten, insbesondere bei der Trinkwarmwasserbereitung, ein Zusatzheizgerät in Form einer Brennwertanlage eingesetzt. In stationären Messungen zur Nutzungsgradbestimmung würden Speichereffekte sowie komplexe Regelalgorithmen zur optimalen Betriebsweise komplett unberücksichtigt bleiben, obwohl diese einen wesentlichen Anteil zur Effizienz-

steigerung des Systems beitragen. Als weiterer Kritikpunkt ist die nicht Beachtung von Stillstandsverlusten in der DIN 4702-8 zu erwähnen. Die Berücksichtigung solcher Verlust ist gerade bei Mikro-KWK-System von entscheidender Bedeutung. Je nach KWK-Technologie (Ottomotor, Stirlingmotor, PEMFC-Brennstoffzelle, SOFC-Brennstoffzelle) benötigen diese z. T. eine nicht unerhebliche Zeitspanne um den Nennlastpunkt und damit die volle Leistungsfähigkeit bei hoher Effizienz zu erreichen. Auffallend ist zudem, dass bei der Normnutzungsgradermittlung nach DIN 4702-8 keine komplette energetische Bilanzierung durchgeführt wird. Die benötigte elektrische Energie für periphere Bauteile wie Umwälzpumpen, Regelung oder Gebläse bleibt vollständig unberücksichtigt.

Die genannten Kritiken und Einschränkung zur Nutzung alter Normen zur Normnutzungsgradbestimmung von innovativen Mikro-KWK-Systemen zeigen die Notwendigkeit einer neuen Prüfvorschrift, die sowohl die technologiespezifischen Eigenschaften hinreichend abbildet als auch einen Bezug zur Realität aufweist. Aus diesem Grund wurde beim DIN ein Arbeitskreis damit beauftragt eine neue Norm zur Ermittlung von Normnutzungsgraden für Mikro-KWK-Systeme zu erstellen. Ergebnis dieser Arbeit ist die abgestimmte und seit November 2011 gültige DIN 4709 „Bestimmung des Normnutzungsgrades für Mikro-KWK-Geräte bis 70 kW Nennwärmebelastung“

Mit der DIN 4709 ist eine Prüfnorm erhältlich die im Gegensatz zur bisherigen Ermittlung von Normnutzungsgraden für Heizgeräte keine stationären Messung vorsieht, sondern ein abzufahrendes 24 h-Lastprofil definiert. Neben einem stärkeren Bezug zur Realität war die Möglichkeit der Betrachtung eines Gesamtsystems mit Speicher und Zusatzheizgerät als auch die Messung einer einzelnen KWK-Einheit das ausschlaggebende Kriterium für die Erstellung einer Prüfnorm mit dynamischem Lastprofil. Durch die Definition eines Gesamtsystems zur Messung ist die Technologieoffenheit der Norm direkt ersichtlich. Als weiteren großen Vorteil der Prüfvorschrift ist die Gesamtbilanzierung aller Energieströme zu sehen. Neben der zugeführten chemisch gebundenen Energie im Brennstoff werden die dem System entnommene sowie die bezogenen als auch die erzeugte elektrische Energie ermittelt und bewertet. Bei der rechnerischen Zusammenführung der gemessenen Energien wird neben den rein energetischen Bewertungen bei der Ermittlung des Gesamtnormnutzungsgrades der erzeugte elektrische Strom mit einem Faktor versehen, um der Tatsache der höherwertigen Energieform von Strom gegenüber Wärme gerecht zu werden. Das Ergebnis ist ein Normnutzungsgrad, der sämtliche Betriebsbedingungen die in einem Heizsystem anliegen können, berücksichtigt und einen guten Vergleichswert von

KWK-Anlagen untereinander als auch einen Vergleichswert zu konventioneller Technik bietet.

Ohne auf eine tiefgehende Detailbetrachtung der in der DIN 4709 definierten Anforderungen einzugehen, ist in Abbildung 71 das in der Norm hinterlegte abzufahrende Prüfprofil dargestellt. Die jeweils einzustellenden Leistungen werden als relative Leistungen zur Herstellerseitig angegebenen Gesamtleistung des KWK-Systems angegeben. Die Fläche unter dem Prüfprofilverlauf stellt hierbei die vom KWK-System bereitzustellende thermische Energie dar.

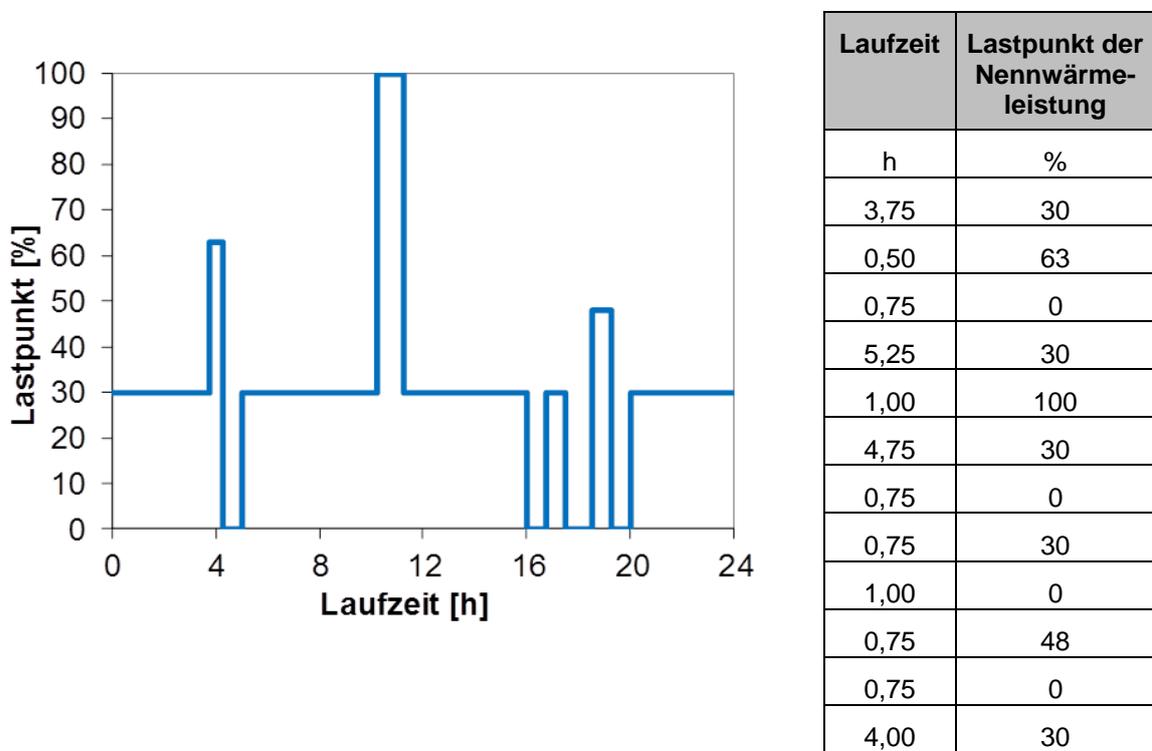


Abbildung 71: Prüfprofil nach DIN 4709

### 4.3.2 Wirkungsgradmessungen

In der Heizungstechnik wird der Wirkungsgrad üblicherweise als Quotient aus abgegebener Wärme zur benötigten chemisch gebundenen Energie eines Brennstoffes angegeben. Bei KWK-Anlagen erweitert sich diese Definition um den Nutzen des erzeugten elektrischen Stroms zum Quotienten aus erzeugtem elektrischen Strom und die bei der Umwandlung anfallende nutzbare Wärme zur benötigten chemisch gebundenen Energie zu:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\dot{Q}_{\text{th}} + P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{B,ges}}} 100\% \quad (12)$$

Die chemisch gebundene Energie sowie die nutzbare Wärme werden in der Regel analog zur konventionellen Heizungstechnik erfasst. Der erzeugte elektrische Strom einer Mikro-KWK-Anlage wird am Geräteausgang gemessen. Dies führt dazu, dass interne Verbraucher, die direkt über den erzeugten Strom versorgt werden, einen negativen Einfluss auf die Größe des ermittelten Wirkungsgrades darstellen. Insbesondere bei Anlagen, die ohne Pufferspeicher betrieben werden können und eine Heizkreispumpe zur Überwindung der Druckverluste im Heizungsnetz als integralen Bestandteil der Mikro-KWK-Anlage aufweisen, sind die sog. parasitären Verluste nicht vernachlässigbar. Neben der unterschiedlichen Wertigkeit der bei der KWK nutzbaren Energien, elektrischer Strom und Wärme, ist der bei der Bilanzierung zum Wirkungsgrad bei konventionellen Heiztechniken nicht berücksichtigte benötigte elektrische Strom ein weiteres Hindernis zum direkten Vergleich.

Bei den nachfolgenden Messergebnissen wurde die elektrische Pumpenleistung der Heizkreispumpe, sofern sie integraler Bestandteil der Anlage und über diese mit elektrischen Strom versorgt wurde, herausgerechnet. Im Gegensatz dazu wurden Pumpen zur Speicherbeladung und zur Kühlung der KWK-Einheiten sowie die weiteren internen Verbraucher bei der Wirkungsgradermittlung mit bilanziert.

Das unter den drei beteiligten Instituten abgestimmte Prüfprogramm sieht eine Wirkungsgradermittlung für maximal fünf Punkte je Mikro-KWK-Anlage vor. Die vermessenen Punkte sind in Tabelle 19 dargestellt.

**Tabelle 19:** Messprogramm Wirkungsgradmessungen

<b>Prüfpunkte Wirkungsgradmessungen</b>	
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung</b>
1	Kleinste einstellbare Leistung der KWK-Einheit
2	Arithmetisches Mittel aus kleinster einstellbarer Leistung und maximale Leistung der KWK-Einheit
3	Maximale Leistung der KWK-Einheit, Zusatzheizgerät aus
4	Maximale Leistung der KWK-Einheit plus arithmetisches Mittel aus kleinster einstellbarer Leistung und maximaler Leistung des Zusatzheizgerätes
5	Maximale Leistung der KWK-Einheit plus maximaler Leistung des Zusatzheizgerätes

Je nach Anlagenkonfiguration kann es sein, dass nur einer bzw. weniger als die angegebenen fünf Punkte vermessen wurden. Bei ottomotorisch betriebenen KWK-Anlagen, die ausschließlich mit einem Puffer- bzw. Kombispeicher betrieben werden und je nach Auslegung ein externes Zusatzheizgerät benötigen, wurde bspw. nur der Lastpunkt 3 bei nicht modulierenden Geräten, bzw. die Lastpunkte 1,2 und 3 bei modulierenden Geräten vermessen. Bei Anlagen mit einem integrierten Zusatzheizgerät, wie es bei den Stirling-Anlagen die Regel ist, wurden, je nach Einstellmöglichkeit, alle 5 Punkte vermessen.

### **4.3.3 Primärenergieeinsparung**

Aus den ermittelten Wirkungsgraden können wesentliche Kenndaten zu den Mikro-KWK-Anlagen hergeleitet werden. Unter anderem ist die Primärenergieeinsparung gemäß „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“ [KWKR] eine wichtige Kenngröße zur Einführung und Förderung von Mikro-KWK-Anlagen am deutschen Markt.

Zur Berechnung der Primärenergieeinsparung wird die im Anhang III der Richtlinie definierte Gleichung zugrunde gelegt:

$$PEE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{KWKW \eta}{Ref W \eta} + \frac{KWKE \eta}{(Ref E \eta + Korr_{Tempmitt}) Korr_{NetzV}}} \right) 100\% \quad (13)$$

Der in Gleichung (1) enthaltene Korrekturfaktor  $Korr_{Tempmitt}$  errechnet sich gemäß Richtlinie zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates [KWKW] mit folgender Gleichung:

$$Korr_{Tempmitt} = \frac{0,1\%}{K} (15K - \vartheta_{Tempmitt}) \quad (14)$$

Als Jahresmitteltemperatur wurde nach Rücksprache mit dem BAFA<sup>12</sup> ein Wert von 8,0 °C in Anlehnung an DIN 4710 [3] eingesetzt. Daraus ergibt sich eine Temperaturabhängige Korrektur von 0,7 %.

Der elektrische Wirkungsgradreferenzwert  $REF E \eta$  ist ein Tabellenwert aus [2] und gibt den elektrischen Wirkungsgrad einer Referenztechnologie zur reinen Stromgenerierung an. Für das Jahr 2010<sup>13</sup> ist dies ein Wert von 52,5 %, was vermuten lässt, dass als Referenzobjekt ein GuD-Kraftwerk gewählt wurde.

Als weiterer Korrekturfaktor  $Korr_{NetzV}$  wird der Einfluss von KWK-Anlagen auf das elektrische Netz berücksichtigt. Dieser ist ebenfalls tabellarisch in [KWKW] zu finden. Hier wird zwischen Netzspannung sowie im Netz eingespeisten sowie vor Ort verbrauchten Strom unterschieden. Für KWK-Kleinstanlagen bei einer Netzspannung von > 0,4 kV und vollständiger Einspeisung des generierten elektrischen Stromes ins Netz ergibt sich ein Korrekturfaktor von 0,925.

Der Referenzwert für den Wärmewirkungsgrad bei getrennter Energiebereitstellung wird in [KWKW] für Erdgas mit 90 % angegeben.

---

<sup>12</sup> Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

<sup>13</sup> Es wird das Baujahr der betrachteten KWK-Anlage zu Grunde gelegt

#### 4.3.4 Primärenergiefaktor

Neben der Primärenergieeinsparung ist der Primärenergiefaktor eine weitere Größe, die insbesondere bei der Planung von Anlagen gemäß EnEV von Bedeutung ist. Die mit Hilfe der Messungen ermittelten Primärenergiefaktoren werden in Anlehnung an DIN 4701-10 wie folgt berechnet

$$f_{PE,KWK} = \frac{Q_{Br} f_{PE,Gas} - P_{el} f_{PE,Strom}}{Q_{th}} \quad (15)$$

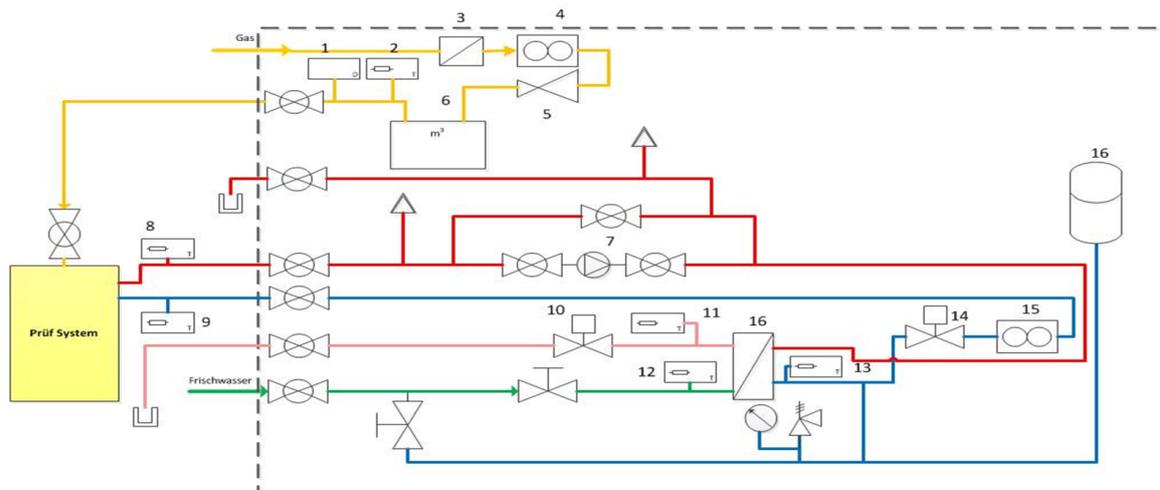
Die Angabe des Primärenergiefaktors soll als Anhaltspunkt dienen und ersetzt keine Berechnung des Primärenergiefaktors konkreter Anlagen.

## **4.4 Prüfstände**

Die Vermessung der Effizienz von Mikro-KWK-Anlagen stellt insbesondere bei der dynamischen Messung der Normnutzungsgrade nach DIN 4709 hohe Anforderungen an die eingesetzten Prüfstände. Neben der hydraulischen Verschaltung ist vor allem die intelligente Prüfsoftware unerlässlich, um alle Vorgaben der DIN 4709 erfüllen zu können. Nachfolgend werden die an den Prüfinstituten vorhandenen Prüfstände vorgestellt.

### **4.4.1 Prüfstandsbeschreibung GWI**

Für das Abfahren des Prüfprofils wurde am GWI ein Prüfstand entwickelt und aufgebaut, der die Anforderungen an die Prüfvorschrift gezielt einhalten kann. Kernelement ist neben der üblichen hydraulischen Verschaltung die computergestützte Regelung und Steuerung des Prüfstandes. Diese ist für eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse unerlässlich und sorgt für ein gezieltes Abfahren des Prüfprofils. Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen den schematischen Aufbau sowie eine Ansicht der hydraulischen Verschaltung des Prüfstandes.



1	Gasdruckmessstelle	7	Umwälzpumpe	13	Regeltemperatur
2	Gastemperatur	8	Temperatur Gerätevorlauf	14	Stellventil Volumenstrom
3	Gasfilter	9	Temperatur Geräterücklauf	15	Volumenstrom Gerät
4	Gasmassenstrom	10	Frischwasserregler	16	Wärmetauscher
5	Druckminderer	11	Temperatur Kühlwasser ein		
6	Gasvolumenstrom	12	Temperatur Kühlwasser aus		

**Abbildung 72:** Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Prüfstandes

Der Versuchsstand ist größtenteils mit Kupferrohren DN<sup>14</sup> 35 aufgebaut. Durch diese große Nennweite entstehen sehr geringe Rohrreibungsverluste in den zu messenden Leistungsbereichen. Dies ist wichtig, da zum einen der Rücklaufregler (14) und zum anderen das Volumenstrommessgerät (15) sehr hohe Strömungswiderstände aufweisen. Der Vor- und Rücklauf des Prüfsystems sind über Stahl- draht- Panzerschläuche mit dem Prüfstand verbunden. Durch die Verwendung von Panzerschläuchen ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit ein anderes Prüfgerät anzuschließen, ohne dass größere Umbaumaßnahmen nötig sind. Die relevanten Temperaturmessstellen (8 und 9), die zur thermischen Energiemessung benötigt werden, befinden sich direkt am Gerät. Hierdurch wird gewährleistet, dass keine Prüfstandsverluste die Messung verfälschen. Durch Kugelhahnabsperungen an jeder wasserdurchflossenen Leitung ist es möglich, einen Systemumbau durchzuführen, ohne dass dabei der Prüfstand vollständig entleert werden muss. In dem Versuchsstand ist zusätzlich ein weiteres Ausdehnungsgefäß (17) integriert. Dies ermöglicht, Prüfsysteme mit einem großen Heizwasservolumen anzuschließen, ohne dass es dadurch zu großen Druckschwankungen im System kommt. Durch

<sup>14</sup> Nennweite

die Installation einer leistungsstarken 3- stufigen Pumpe (7) ist es kein Problem, hohe Volumenströme im Heizungskreislauf zu fördern. Sollte jedoch die integrierte Umwälzpumpe aus dem Prüfsystem ausreichen, ist es möglich, die Pumpe (7) über einen Bypass zu umgehen. Die Temperturmessstellen (11 und 12) dienen nur zur Kontrolle des Frischwasserkreislaufes. Durch diese Temperaturerfassungen ist es möglich, geringe unerwartete Schwankungen in der Rücklaufreglung nachzuvollziehen. Das Frischwasserregelventil (10) ist so programmiert, dass es durch einen regulierten Frischwasservolumenstrom die Rücklauftemperatur auf einen eingestellten Wert konstant hält. Hierzu dient die Regeltemperatur im Rücklauf (13) als Führungsgröße. Im Heizkreislauf befindet sich des Weiteren das Volumenstrommessgerät (15). Es dient zur Erfassung des Volumenstroms für die thermische Energie. Direkt dahinter ist das Regelventil angeordnet, mit dem der von der Norm geforderte Volumenstrom eingestellt wird.



**Abbildung 73:** GWI-Prüfstand

Für die Gasleitung wurde Kupferrohr DN22 verwendet. In der Gasleitung befindet sich ein Gasfilter (3). Dieser ist am Anfang der Gasleitung angeordnet. Damit soll verhindert werden, dass die Messungen durch Schmutzpartikel oder sonstige Verunreinigen aus der Rohrleitung verfälscht werden. Danach folgt ein Gasmassenstrommessgerät (4). Hiermit wird der Brennstoffmassenstrom zur Feuerungswärmeleistungsermittlung gemessen. Da diese Bauteile einen hohen Druckverlust in der Leitung erzeugen, werden sie mit einem Druck von 100 mbar durchströmt. Danach ist ein Druckminderer angeordnet, der den Gasdruck auf einen Anschlusswert von 25 mbar einstellt. Um ein exaktes Gasvolumen über die gesamte Prüfzeit ermitteln zu können, folgt ein Balgengaszähler (6). Zur

Ermittlung des Normvolumens sind weiterhin eine Gasdruckmessstelle (1) und eine Gastemperaturmessstelle (2) integriert.

Um einen ausreichend hohen Volumenstrom im Gerätekreislauf zu gewährleisten, wird eine dreistufige Grundfos UPS 32-100 180 verwendet. Diese ermöglicht einen Volumenstrom von 22 l/min trotz des hohen Strömungswiderstandsverlustes, welche im Regelventil mit Magnetantrieb (Firma Siemens) auftreten. Dieser Volumenstrom ermöglicht es, thermische Leistungen von bis zu 30,4 kW abzufahren, sofern eine Temperaturspreizung von 20 K eingehalten wird. Die Pumpe kann genutzt werden, wenn das Prüfgerät keine eigene integrierte Pumpe bereitstellt, bzw. wenn die Leistung der geräteinternen Pumpe nicht ausreicht um die Druckverluste des Prüfstandes auszugleichen.

Die Messgenauigkeiten des eingesetzten Prüfstandes sind nachfolgend aufgeschlüsselt:

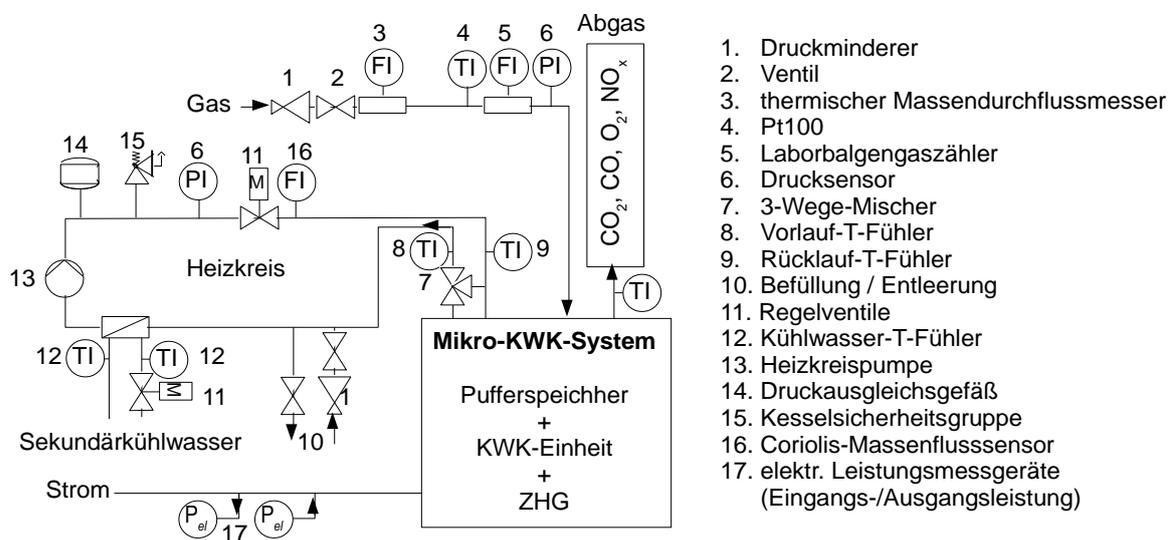
- **Temperaturen**
  - Temperaturfühler (Pt 100): Durch Kalibrierung der einzelnen Temperaturfühler liegt die absolute Messgenauigkeit bei **0,1 K**
- **Durchflüsse**
  - Wasser: Magnetisch – Induktives Durchflussmessgerät MID (Krohne IFC 090): Überprüfung der Messgenauigkeit auf externem Prüfstand ergab maximalen Messfehler von **0,07 %**
  - Gas: Thermische Massedurchflußmessung (Bronkhorst): Lt. Kalibrierzertifikat liegt beim Volumenstrom von 2,271 m<sup>3</sup>/h ein maximaler Fehler von **0,7 %** des Messwerts vor
  - Gas (zusätzlich): Balgengaszähler (Elster): Beim Durchfluss von 5,0055 m<sup>3</sup>/h liegt die maximale Abweichung bei **1,1 %**
- **Elektrische Leistung**
  - Wirkleistungsmessgerät (Müller-Ziegeler): Abgleich mit einem geeichten Messgerät der GWI-Prüfstelle. Bei einem Messwert von 1.400 W liegt die maximale Abweichung bei 5 W bzw. **0,35 %**

Über die dynamischen Messungen hinaus können mit Hilfe des Prüfstandes Wirkungsgrade und Abgasemissionen ermittelt werden.

#### 4.4.2 Prüfstandsbeschreibung EBI

Die Mikro-KWK-Systeme wurden an einem selbstentwickelten Geräteprüfstand vermessen, der in Abbildung 74 vereinfacht abgebildet ist. Unter anderem wurden die Messmimik für Trinkwarmwassermessungen und die Mimik zur Rücklaufstabilisierung mittels eines geregelten Boilers der Übersichtlichkeit wegen weggelassen. Alle relevanten Sensoren und Zähler waren an eine PC-gesteuerte Datenerfassung angeschlossen, die neben der Datenaufzeichnung u. a. auch die Steuerung des 3-Wege-Mischers (7), der Regelventile (11) oder der Heizkreispumpe (13) über eine Inhouse-Prüfstandssoftware vornehmen konnte. Durch diese Softwareanbindung konnten relativ beliebige Prüfabläufe wie das 24 h-Lastprofil nach der DIN 4709 automatisiert ablaufen.

Für die energetische Bilanzierung wurden die Gasmessung je nach Mikro-KWK-System mit einer oder zwei Gasmessstrecken durchgeführt. Für zeitlich aufgelöste Messungen erfolgte die Gasmessung mit einem thermischen Massendurchflussmesser, bei integralen Messungen kamen Laborbalkengaszähler mit Pt100-Gastemperatur- und Gasdruckmessung zum Einsatz, um Normgasdurchflüsse angeben zu können.



**Abbildung 74:** Vereinfachtes Schema des Geräteprüfstands am EBI

Die Wärmebilanzierung konzentrierte sich auf die Heizwärmebestimmung. Die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen wurden anfangs mit Thermoelementen, beim Vaillant ecoPOWER 3.0 und der Hexis Galileo 1000N, und im späteren Projekt-

verlauf mit Pt100-Fühlern DIN Klasse B 1/10 gemessen, die Umlaufmenge erfasste ein hochgenauer Coriolis-Massendurchflussmesser. Die Ströme des Heiz- und Kühlwassers konnten über schnelle elektropneumatische Regelventile mit großer Regeldynamik gesteuert werden. Die Bilanzierung der elektrischen Leistung basierte auf zwei Energiezähler (17) mit Rücklaufsperrung für den Eingangs- und Ausgangsstrom, die Impulswertigkeit betrug 1 Wh. Die Abgasemissionen wurden durch Abgasanalytoren kontinuierlich gemessen.

Aufgrund sorgfältiger Kalibrationen können folgende Messunsicherheiten angegeben werden.

**Tabelle 20:** Messunsicherheiten der Messwerte am EBI

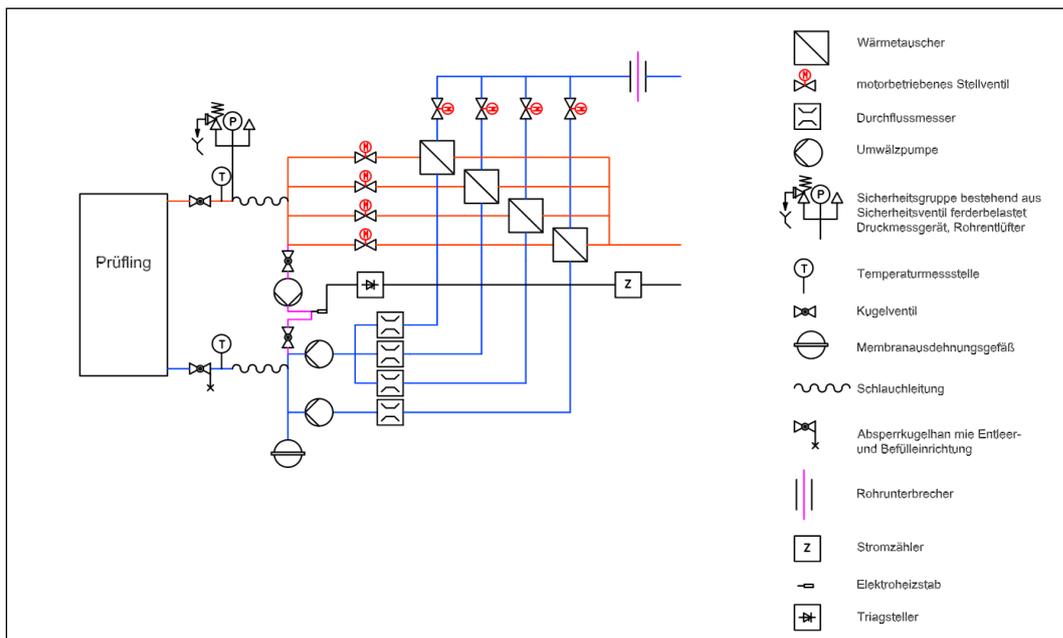
Messung	Messunsicherheit
Gasvolumenstrom	0,5 %
Vorlauf-/Rücklauf-Temperatur-Fühler:	
- Thermoelemente	0,4 K
- Pt100 DIN B 1/10	0,15 K
Heizmassenstrom	0,3 %
elektrische Energie	1,0 %
elektrische Wirkleistung	0,15 %

Als Prüfgas wurde bei allen Messungen Methan 2.5 (G20) eingesetzt. Die Untersuchungen wurden unter konstanten Umgebungsbedingungen im klimatisierten Testlabor durchgeführt.

### 4.4.3 Prüfstandsbeschreibung DBI

Der für die Messdurchführung verwendete Wirkungsgradprüfstand am DBI-Gastechnologischen Institut gGmbH Freiberg wurde gemäß [WGR92], [EN297], [EN483] für thermische Leistungen bis 120 kW zur Bestimmung von Wirkungsgraden für Heizkessel für gasförmige Brennstoffe errichtet. Die Abbildung 75 zeigt ein Schema des Prüfstandes, der mit 4 hydraulischen Kreisen ausgestattet wurde, um thermische Leistungen in 4 unterschiedlichen Leistungsbereichen gemäß den Anforderungen des Regelwerkes messen zu können.

Für die Messung der eingespeisten und bezogenen elektrischen Energie der Mikro-KWK-Anlagen wurden am Prüfstand zusätzlich hochauflösende Stromzähler installiert und auf die Datenerfassung aufgeschaltet. In Abhängigkeit vom elektrischen Anschluss der Geräte kamen sowohl 1-phasige, als auch 3-phasige Stromzähler zum Einsatz.



**Abbildung 75:** Schematische Darstellung des Wirkungsgradprüfstandes

Die Durchführung von Abgasmessungen erfolgte mit einem Abgasanalyzesystem (Typ: AO2020, Hersteller: ABB), dessen Messdaten ebenfalls auf die Datenerfassung übertragen wurden.

## 4.5 Messergebnisse GWI

Bei den am GWI vermessenen Geräten handelt es sich um den ecoPower 1.0 und ecoPower 3.0 - jeweils um ottomotorisch betriebene KWK-Systeme- und zwei Stirlingsysteme, das eVita 25s System von DeDietrich/ Remeha und dem Vitowin 300 von Viessmann. Für alle Anlagen wurden jeweils die Wirkungsgrade in den einstellbaren Messpunkten und Normnutzungsgrade nach DIN 4709 für z. T. unterschiedliche Lasteinstellungen und Pufferspeichergrößen ermittelt.

Als Prüfgas wurde bei allen Messungen zur Reproduzierbarkeit das Prüfgas G20 eingesetzt. Weiterhin gab es durch den Einsatz des immer gleichen Prüfstandes mit gleicher Messtechnik und Regelung keine Einflüsse durch wechselndes Messequipment. Die Prüfungen wurden im Labor des GWI mit konstanten Raumlufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten unterhalb der Normvorgaben durchgeführt.

Die jeweiligen Anlagen wurden nach Herstellerangaben aufgebaut.

Zur besseren Verdeutlichung der Vorgehensweise bei den Messungen von Normnutzungsgraden nach DIN 4709 am GWI, wird folgend ein detailliertes Beispiel zur Messung und Auswertung einer dynamischen Messung erläutert.

Bedingt durch die neuartige Messmethode basierend auf einer dynamischen Messung war es zunächst unerlässlich eine Vielzahl von Probemessungen durchzuführen um eine hinreichend genaue und reproduzierbare Prüfung gewährleisten zu können. Während der Probemessungen konnten identifizierte Fehlerquellen behoben und ein Erfahrungsschatz zur Beherrschung der Messmethode aufgebaut werden. Nach diesen anfänglichen Schwierigkeiten konnten die geforderten dynamischen Messungen mit hoher Genauigkeit und hinreichender Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt werden.

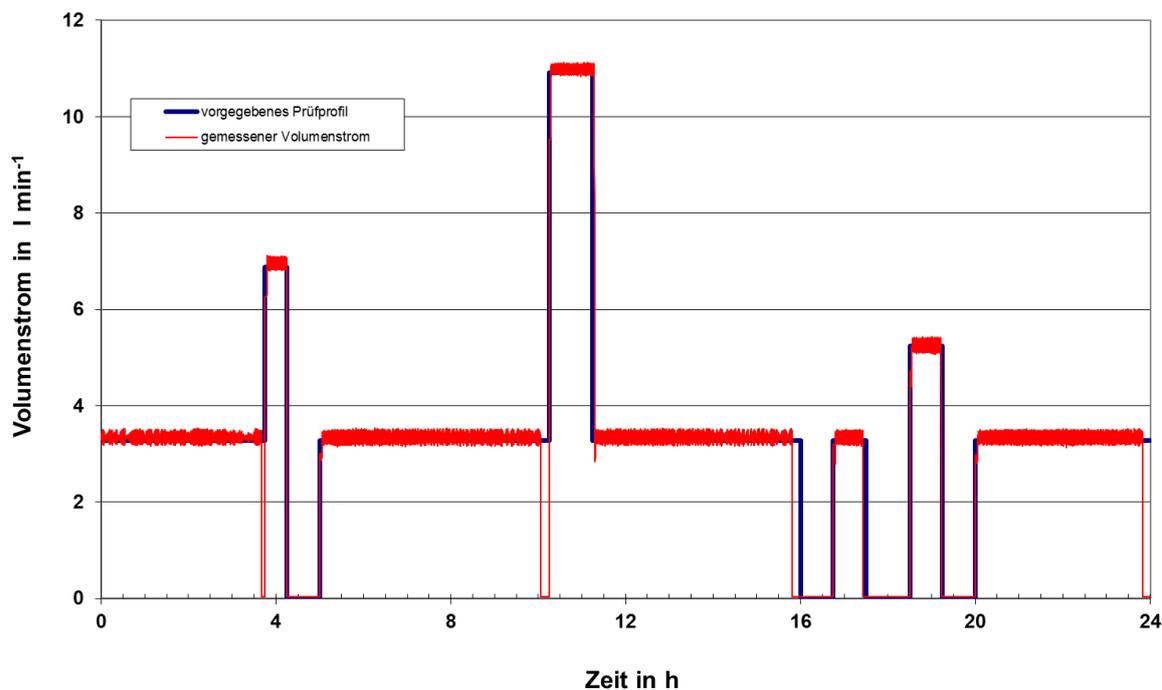
Als problematisch erwies sich die Aufrechthaltung der geforderten Vorlauf-temperatur von 50 C durch die Anlage. Diese Geräteeinstellung ist gemäß DIN 4709 vom Hersteller der Anlage vorzunehmen. Dies kann allerdings im direkten Zusammenhang mit der erst vor kurzem geschehenen Veröffentlichung der DIN 4709 gesehen werden. Der Hersteller muss genau wie die beauftragten Prüflaboratorien zunächst die neuartige Messmethodik verinnerlichen und anwenden können. Mit zunehmender Etablierung der DIN 4709 als aktuell bereits anerkannte Regel der Technik werden diese Hemmnisse ausgeräumt, so dass auch hier keine weiteren Schwierigkeiten zu erwarten sind.

Exemplarisch für die durchgeführten Messungen ist nachfolgend das Ergebnis einer Messung am System EcoPower 1.0 der Firma Vaillant aufgeführt. Bei der gemessenen Anlage handelt es sich um ein System bestehend aus einem, bei konstanter Drehzahl betriebenen, Ottomotor mit einer thermischen Leistung von 2,5 kW und einer elektrischen Leistung von 1,0 kW. Zusätzlich zur KWK-Einheit wird eine Brennwerttherme mit einer eingestellten thermischen maximal Leistung von 15,1 kW als Zusatzheizgerät genutzt. Komplettiert wird das System mit einem 300 l Kombispeicher. Aus der möglichen thermischen Maximalleistung ergibt sich gemäß DIN 4709 das in Tabelle 21 hinterlegte Prüfprofil.

**Tabelle 21:** Abzufahrendes Prüfprofil nach DIN 4709 (Beispielmessung)

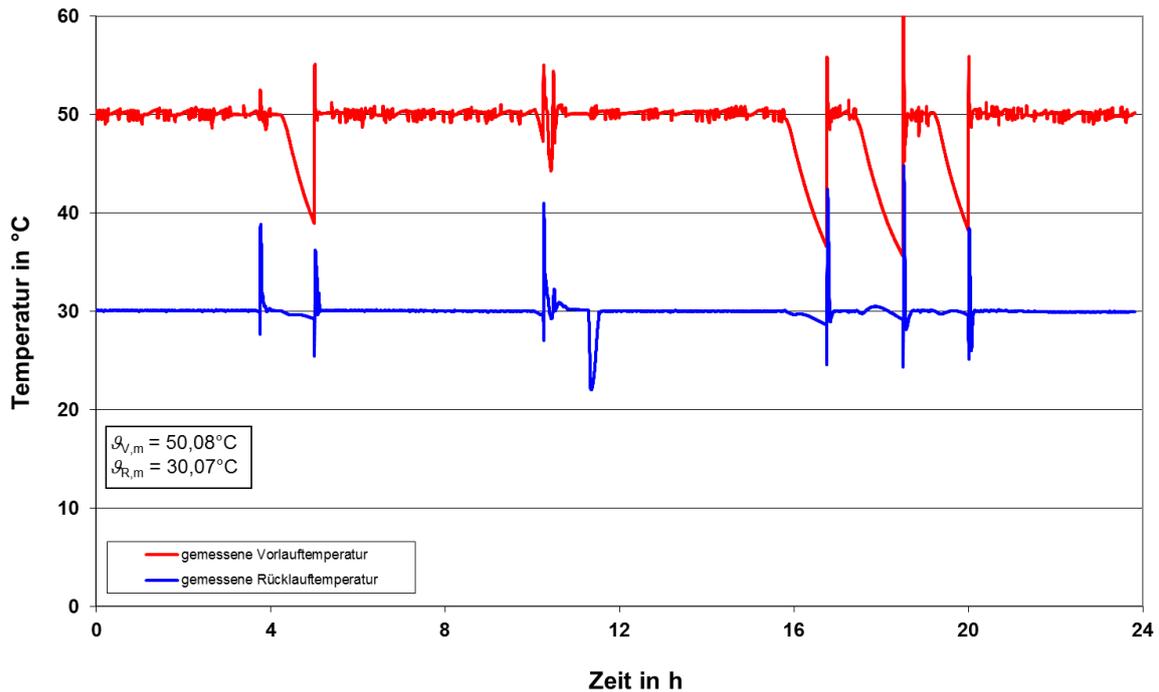
Punkt	Leistung	spez. Isobare Wärmekapazität	Massen- strom	Dichte	Volumen- strom	Vorlauf- temp.	Rücklauf- temp.	mittl. Temp.	Laufzeit		kum. Laufzeit	Energie- menge	Lastpunkt
	kJ/s								kJ/ kg K	kg/s			
1	4,53	4,186	0,054	0,992	3,3	50	30	40	3,75	13500	13500	16,9875	30
2	9,513	4,186	0,114	0,992	6,9	50	30	40	0,5	1800	15300	4,7565	63
3	0	4,186	0,000	0,992	0,0	50	30	40	0,75	2700	18000	0	0
4	4,53	4,186	0,054	0,992	3,3	50	30	40	5,25	18900	36900	23,7825	30
5	15,1	4,186	0,180	0,992	10,9	50	30	40	1	3600	40500	15,1	100
6	4,53	4,186	0,054	0,992	3,3	50	30	40	4,75	17100	57600	21,5175	30
7	0	4,186	0,000	0,992	0,0	50	30	40	0,75	2700	60300	0	0
8	4,53	4,186	0,054	0,992	3,3	50	30	40	0,75	2700	63000	3,3975	30
9	0	4,186	0,000	0,992	0,0	50	30	40	1	3600	66600	0	0
10	7,248	4,186	0,087	0,992	5,2	50	30	40	0,75	2700	69300	5,436	48
11	0	4,186	0,000	0,992	0,0	50	30	40	0,75	2700	72000	0	0
12	4,53	4,186	0,054	0,992	3,3	50	30	40	4	14400	86400	18,12	30
<b>Σ</b>									<b>24</b>			<b>109,0975</b>	

Nach DIN 4709 wird die Leistungsabforderung der jeweiligen Lastpunkte über den Heizwasservolumenstrom am Prüfstand eingestellt. Die vorab ermittelten Werte, s. Tabelle 21, werden in die Prüfstandsoftware eingegeben und während der Messung vollautomatisch unter Berücksichtigung der 30-minütigen Lastverschiebungsmöglichkeiten eingestellt. Da alle weiteren Leistungsrelevanten Werte wie Temperaturen und spezifische Wärmekapazitäten des Wassers im Prüfkreislauf konstant gehalten werden, ist es von großer Bedeutung, den nötigen Volumenstrom genau und ohne Schwingungen einzuregeln. In Abbildung 76 ist der während der Prüfung gemessene Volumenstrom im Vergleich zum vorgegebenen Prüfprofil dargestellt. Ersichtlich ist auch hierbei die sehr geringe Abweichung des geregelten Volumenstroms vom Prüfprofil. Darüber hinaus wird der Ausgleich von ggf. zu früh erreichten Energiemengen bzw. nicht erreichten Energiemengen je Prüfpunkten ersichtlich, wobei die jeweils akzeptierte Zeitspanne zum Ausgleich von 30 min in keinem Fall überschritten wird.



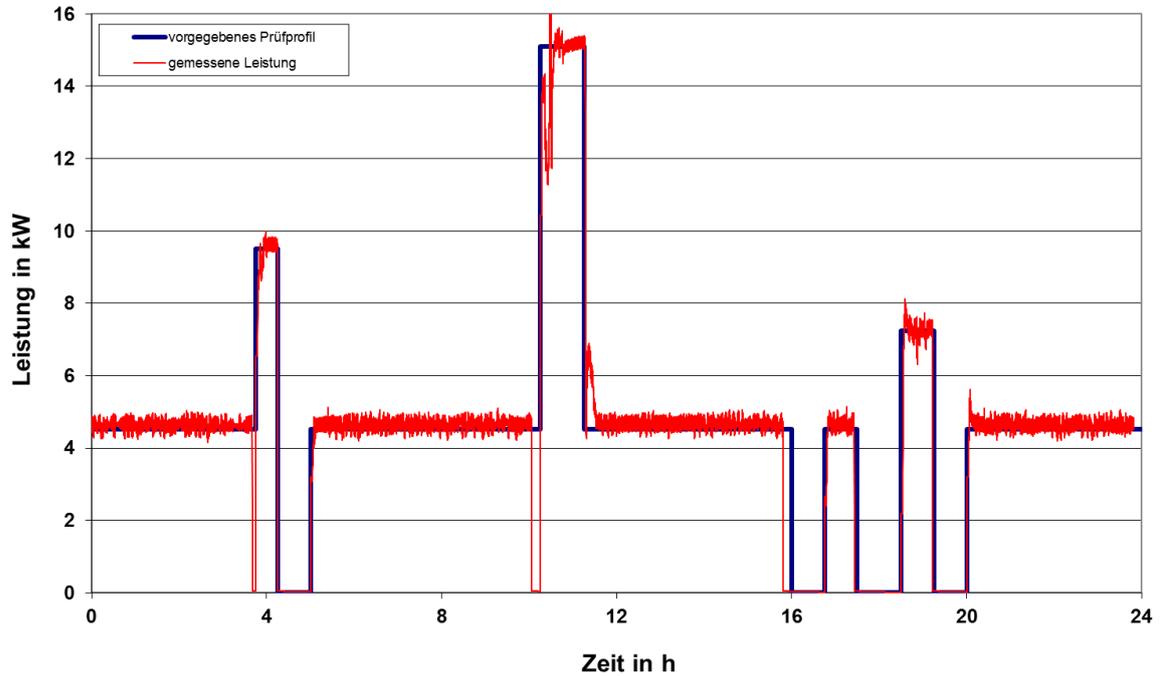
**Abbildung 76:** Während der Prüfung gemessener Volumenstrom im Vergleich zum vorgegebenen Prüfprofil nach DIN 4709 (Beispielmessung)

In Abbildung 77 sind die gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen während der Prüfprofilsmessung dargestellt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die während der Lastphasen konstant zu haltende Rücklauftemperatur nahezu keine Abweichungen von den eingestellten 30 °C aufweist. Lediglich in Lastsprüngen ist eine kurzfristige Abweichung ersichtlich sowie in Phasen ohne Wärmeanforderungen, die gemäß DIN 4709 auftreten dürfen und für die Mittelwertbildung nicht von Bedeutung sind. Auch die vom Prüfling geregelte Vorlauftemperatur weicht im Mittel von den geforderten 50 °C nur marginal ab. Die Vorgaben der DIN 4709 werden vollständig und ohne erkennbare Schwierigkeiten eingehalten. Insbesondere bei Systemen mit Pufferspeicher kann die Forderung nach einer Vorlauftemperatur von konstant 50 °C sehr einfach über einen zum Prüfstand passenden Mischer realisiert werden. Die durchgeführten Probemessungen mit verschiedenen Kombinationen und Geräten haben allerdings auch gezeigt, dass modulierende Geräte wie bspw. die meisten Stirlingmotoren auch ohne Pufferspeicher in der Lage sind, das dynamische Prüfprofil gemäß DIN 4709 normgerecht abzufahren.



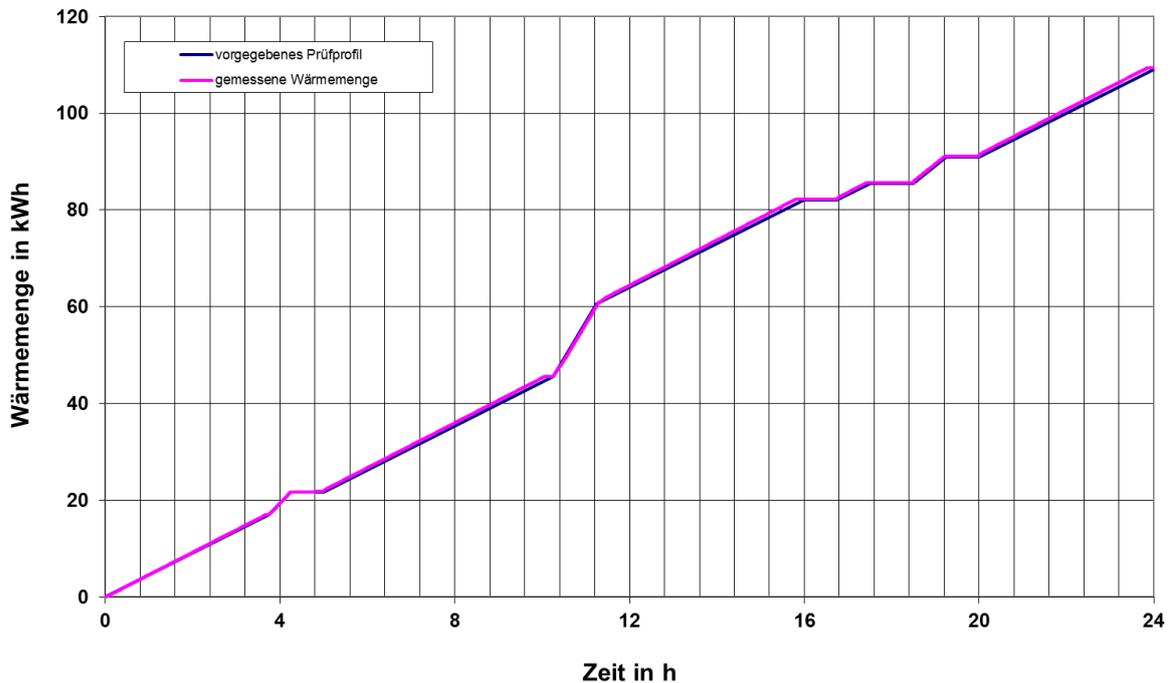
**Abbildung 77:** Während der Prüfung gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen (Beispiel-messung)

Resultierend aus den gemessenen Volumenströmen sowie der Differenz aus gemessener Vorlauftemperatur und gemessener Rücklauftemperatur wird mit der isobaren spezifischen Wärmekapazität die vom System bereitgestellte thermische Leistung ermittelt. Diese ist in Abbildung 78 dargestellt.



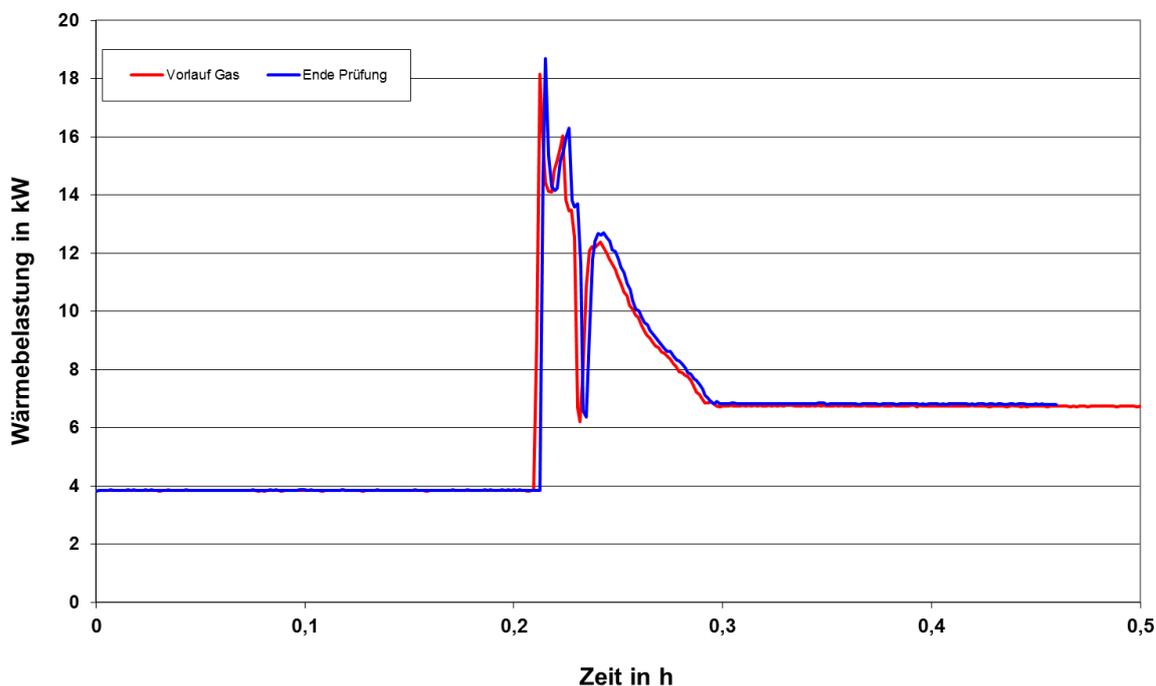
**Abbildung 78:** Während der Prüfung ermittelte Gesamtleistung des Systems (Beispielmessung)

Multipliziert mit der Laufzeit ergibt sich die kumulierte bereitgestellte thermische Arbeit. Diese ist in Abbildung 79 dargestellt. Auch hier wird zum Nachweis der korrekten Messung das vorgegebene Prüfprofil mit abgebildet. Bis auf sehr geringe Abweichungen folgt die Messung sehr genau dem vorgegebenem Prüfprofil.



**Abbildung 79:** Während der Prüfung ermittelte kumulierte Wärmemenge im Vergleich zum vorgegebenen Prüfprofil nach DIN 4709

Der Nachweis über gleichen Energieinhalt im Speicher zu Beginn der Messung und zum Ende der Messung wird erreicht, indem die Messung zu dem Zeitpunkt beendet wird, wenn der gleiche Zustand bei gemessener Vorlauftemperatur und gemessenem Brennstoffvolumenstrom erreicht ist wie zu Beginn der Messung. In Abbildung 80 wird dies deutlich. Gezeigt wird die aus dem Brennstoffvolumenstrom resultierende Wärmebelastung des Systems zu Beginn der Messung und zum Ende der Messung. Beide Kurven liegen nahezu übereinander und es ist nur eine marginale Abweichung untereinander erkennbar.

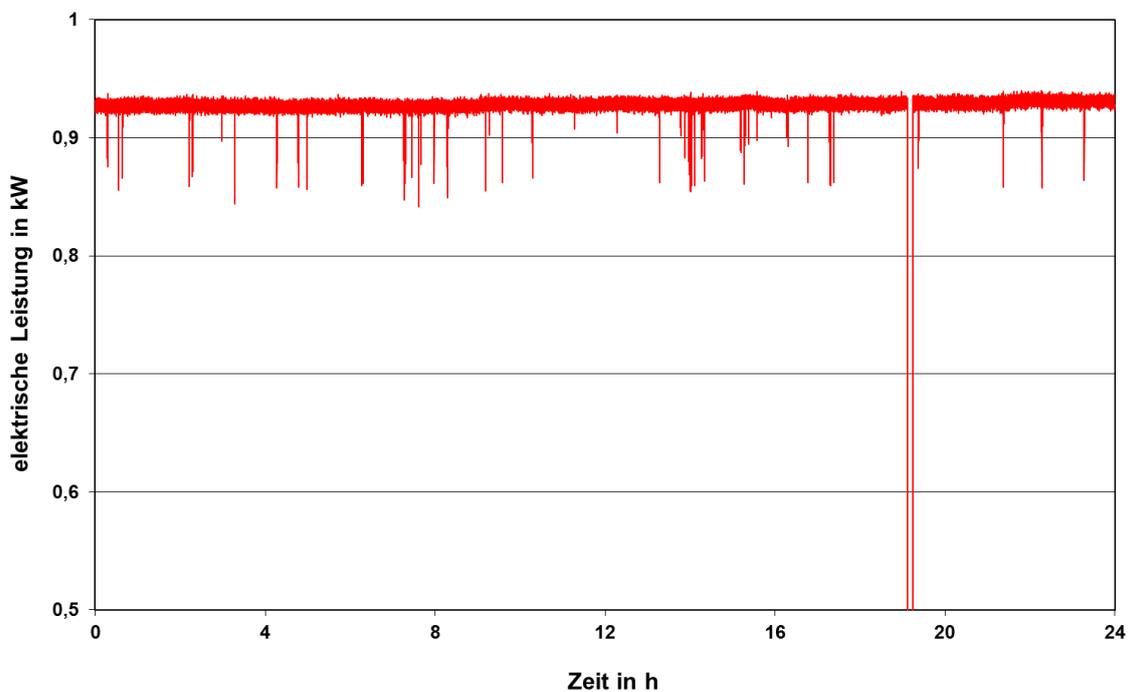


**Abbildung 80:** Nachweis der gleichen Energiemengen im Speicher zu Beginn und zum Ende der Messung (Beispielmessung)

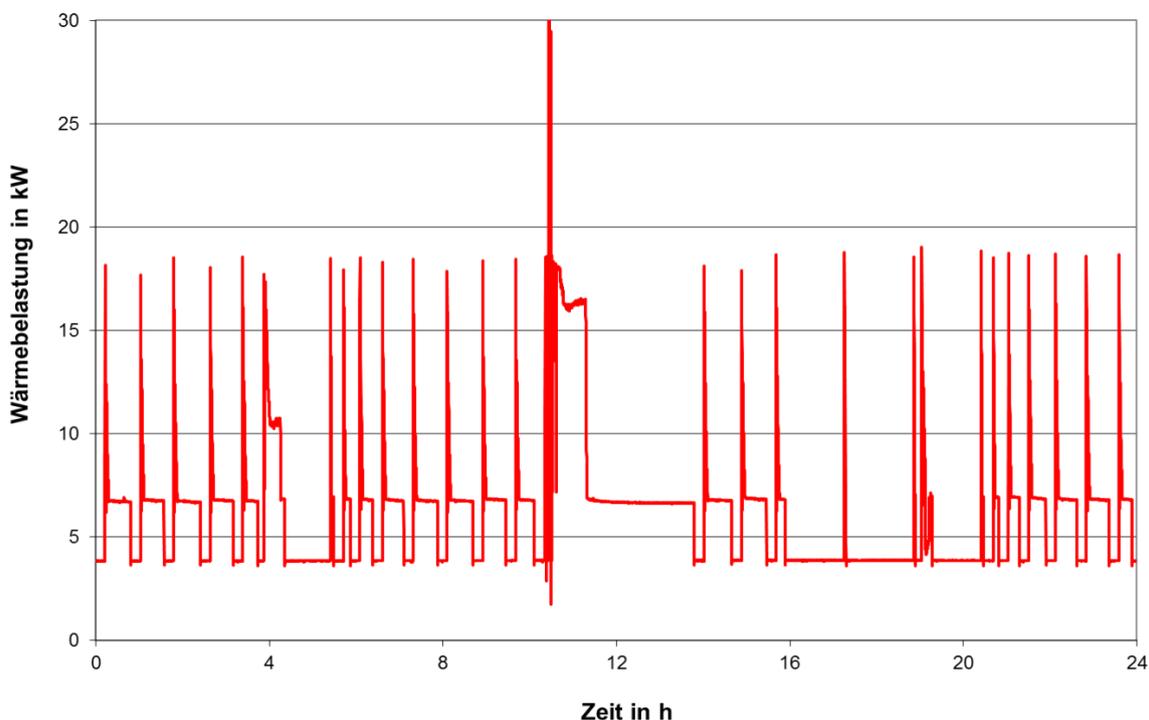
Über den Nachweis der Durchführbarkeit der Messung nach DIN 4709 und den daraus ermittelten Normnutzungsgraden ist das Verhalten des Systems von Interesse. Da bei der Berechnung des Normnutzungsgrades der erzeugte elektrische Strom mit den Primärenergiefaktoren bewertet wird, sollte während des 24h-Lastprofil möglichst viel elektrischer Strom erzeugt werden. In der Regel wird dies erreicht, wenn die KWK-Einheit des Systems während des Abfahrens des Lastprofils durchgängig im Nennlastpunkt betrieben wird. In Abbildung 81 ist der Verlauf des erzeugten elektrischen Stroms über die Laufzeit des Prüfprofils dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die KWK-Einheit, in diesem Fall der Ottomotor, während der Prüfung konstant im Nennlastpunkt betrieben wird. Lediglich für eine kurze Zeitspanne wird der Motor zur Neukalibrierung von der Systemregelung neu gestartet.

Das Verhalten des Gesamtsystems während der Prüfung ist Abbildung 82 zu entnehmen. In dieser Darstellung ist die gemessene Wärmebelastung des Gesamtsystems, also Ottomotor und Zusatzheizgerät, über die Prüfzeit aufgetragen. Aus der Grafik können dementsprechend die Taktungen der KWK-Einheit als auch das Zusatzheizgerätes entnommen werden. Weiterhin können Speicher- und Regelungseffekte bewertet und optimiert werden.

Bei den nachfolgenden am GWI vermessenen Systemen wird neben den ermittelten Normnutzungsgraden und Wirkungsgraden der Verlauf der Wärmebelastung der verschiedenen Gesamtsysteme mit variierenden eingestellten Gesamtleistungen über die Prüfzeit dargestellt.



**Abbildung 81:** Während der Prüfung gemessene elektrische Leistung (Beispielmessung)



**Abbildung 82:** Während der Prüfung gemessene Wärmebelastung des Gesamtsystems (Beispielmessung)

#### 4.5.1 Vaillant EcoPower 1.0

Das Vaillant EcoPower 1.0 Heizungskomplettsystem (getestet wurde im Rahmen dieses Projektes ein Vorseriengerät) setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Herzstück des Systems ist die Mikro-KWK-Einheit von Honda. Hierbei handelt es sich um einen Einzylinder Ottomotor mit einem Hubraum von 110 cm<sup>3</sup>. Der Motor wird bei einer konstanten Drehzahl von ca. 1950 1/min betrieben und ist nicht modulationsfähig ausgelegt. Die Wärmeabfuhr des Motors wird über das sogenannte Wärmeauskopplungsmodul gewährleistet. Dieses beinhaltet einen Wärmeübertrager, Kühlmittelbehälter, sowie Pumpen zur Systemtrennung. Über den integrierten Plattenwärmeübertrager wird die Motorabwärme dem im Komplettsystem enthaltenen Pufferspeicher mit einem Volumen von wahlweise 300 l bzw. 500 l zugeführt. Weiterhin wird über diese Systemtrennung eine konstante Rücklauftemperatur zur Motorkühlung von 65 C erreicht und damit ein optimaler Betrieb des Motors gewährleistet. Im Wärmeauskopplungsmodul ist der Systemregler integriert, welcher alle Komponenten des Gesamtsystems intelligent miteinander verbindet. Über einen Touchscreen können alle wesentlichen

Regelungsparameter vom Installateur und Betreiber der Anlage eingestellt und überwacht werden.

Eine Trinkwasserstation mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager übernimmt in Verbindung mit dem Pufferspeicher die Bereitung von Trinkwarmwasser.

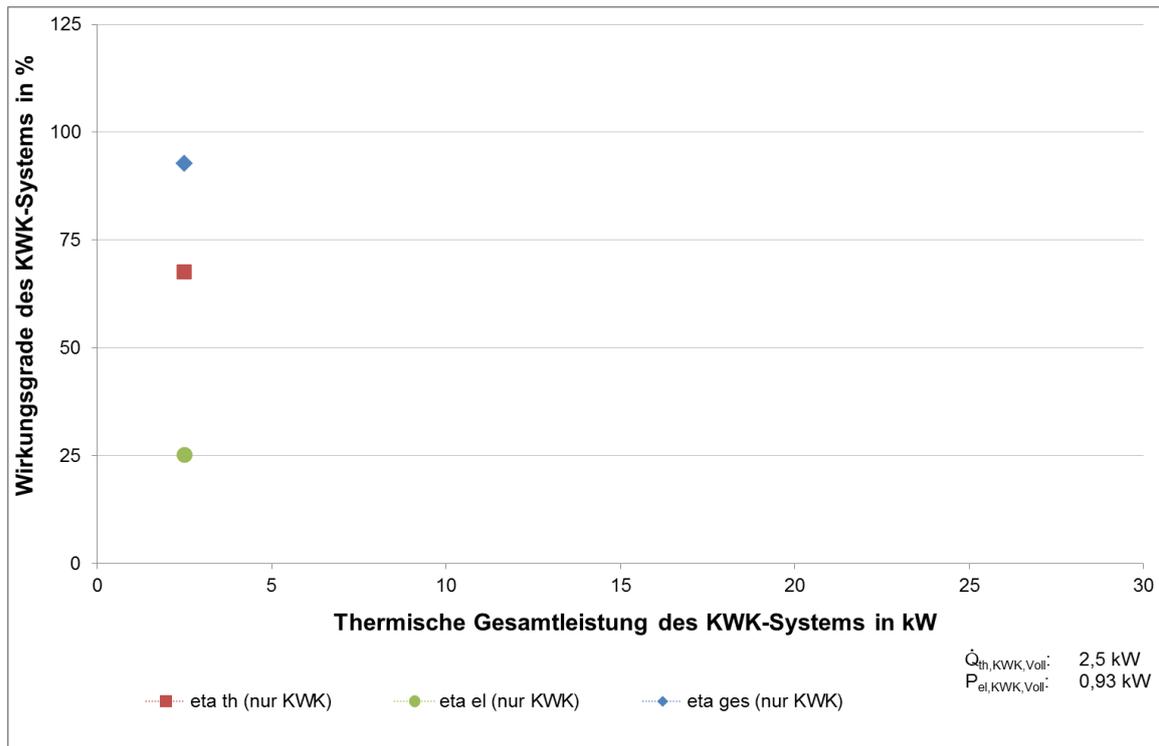
Das auf Grundlastbetrieb ausgelegte ottomotorische KWK-Modul wird im Komplettsystem durch ein Zusatzheizgerät mit Brennwertnutzung zur Abdeckung von Spitzenlasten unterstützt.

In Tabelle 22 sind neben den ermittelten Wirkungsgraden bei den angegebenen Systemtemperaturen die gemessenen Abgasemissionswerte dargestellt. Die ermittelten Wirkungsgrade der KWK-Einheit sind zusätzlich in grafischer Form in Abbildung 83 gezeigt. Der thermische Wirkungsgrad wurde mit 67,6 % etwa 2 % über den Herstellerangaben ermittelt, während der elektrische Wirkungsgrad ca. 1,2 % unter den Herstellerangaben liegt. Die Ursache für die Abweichung des elektrischen Wirkungsgrades liegt darin begründet, dass in den Messungen die vom erzeugten elektrischen Strom gespeisten Verbraucher der Wärmeauskopplungsbox (Pumpen, Systemregler...) mit bilanziert wurden. Insgesamt ist festzustellen, dass die Herstellerangaben weitestgehend eingehalten und z. T. übertroffen werden.

Bei der Ermittlung der Emissionswerte wurden über den Messzeitraum nicht abschließend erklärbare erhöhte NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen, die stark von den Herstellerangaben und vorherigen Messungen in anderen Forschungseinrichtungen abweichen. Aufgrund des Vorserienstatus des getesteten Systems wird auf eine Angabe der nicht repräsentativen Messergebnisse zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen verzichtet.

**Tabelle 22:** Kennfeldermittlung EcoPower 1.0

Wirkungsgrade "ecoPower 1.0"			
Bezeichnung		Einheit	Prüfpunkt 3
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	69,8
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	60,5
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	56,7
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	11,8
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	22,0
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	-
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{lufftfrei}}$	ppm	22,0
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{lufftfrei}}$	ppm	-
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B,Ges}}$	kW	3,7
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B,KWK}}$	kW	3,7
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	2,5
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,93
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>67,6</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>25,1</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>25,1</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>92,7</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	1	<b>0,66</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	%	<b>20,7</b>



**Abbildung 83:** Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „ecoPower 1.0“

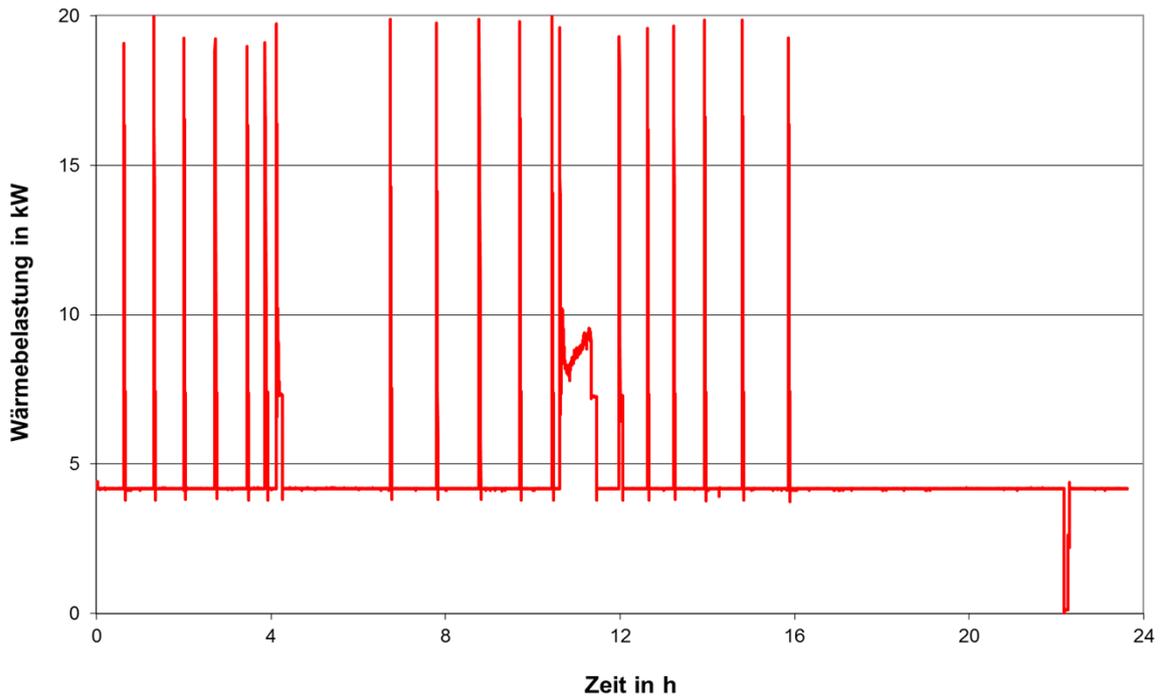
Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die Ergebnisse der Normnutzungsgradmessungen nach DIN 4709 für das System ecoPower 1.0 mit 300 l Pufferspeicher und mit 500 l Pufferspeicher für jeweils 3 unterschiedlich eingestellte Gesamtleistungen. Erwartungsgemäß ist bei beiden Pufferspeichergrößen zunächst ein Abfall des Normnutzungsgrades bei Verringerung des KWK-Anteils am Gesamtsystem ersichtlich. Während bei einer Gesamtleistung des Systems von 8,3 kW, was der kleinsten einstellbaren Leistung des Zusatzheizgerätes zuzüglich der thermischen Leistung der KWK-Einheit entspricht, mit 123,9 % der höchste Normnutzungsgrad zu verzeichnen ist, fällt dieser bei höheren Leistungen des Zusatzheizgerätes und gleichbleibender thermischer Leistung der KWK-Einheit ab. Bei unendlich großen thermischen Leistungen des Zusatzheizgerätes würde sich der Normnutzungsgrad asymptotisch an den Nutzungsgrad des reinen Zusatzheizgerätes annähern, die KWK-Einheit hätte in diesem Fall keinen relevanten Einfluss auf das Gesamtsystem.

**Tabelle 23:** Normnutzungsgradermittlung System EcoPower 1.0 mit 300 l Kombispeicher

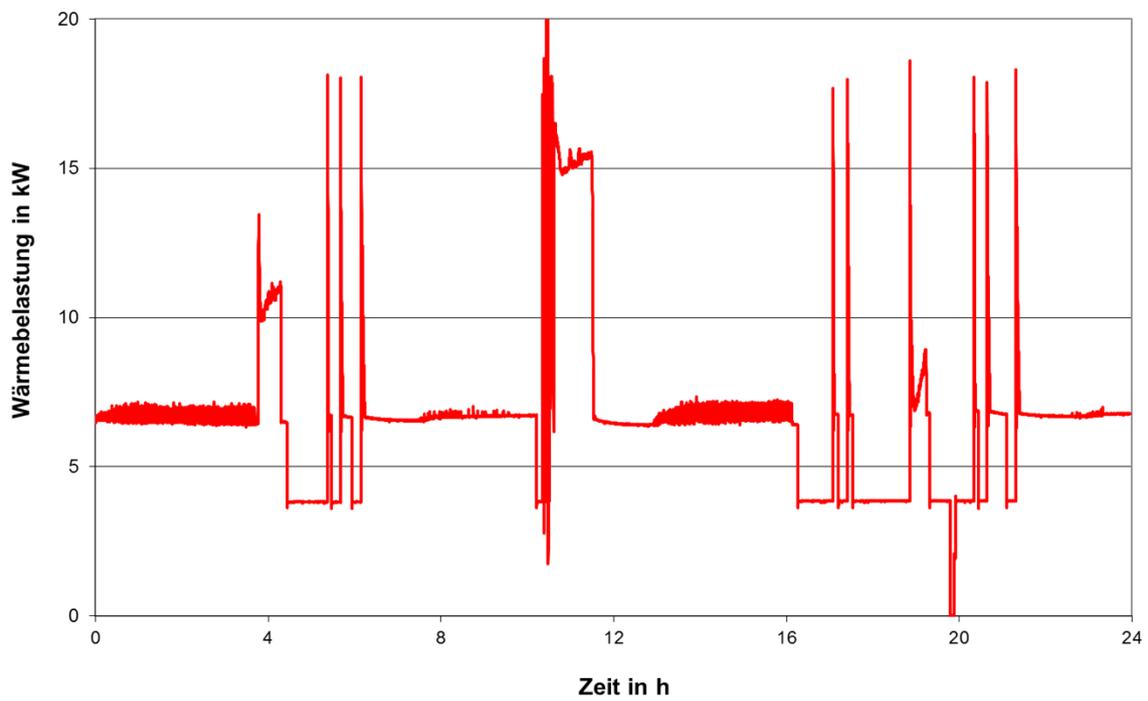
Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "ecoPower 1.0"

Bezeichnung	Einheit	Eingestellte Gesamtleistung			
		8,3	15,1	16,8	
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	300	300	300
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	49,5	50,1	50,1
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30,0	30,1	30,4
Thermische Leistung KWK	$Q_{th}$	kW	2,5	2,5	2,5
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1,0	1,0	1,0
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	30,1	16,6	14,9
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	96,4	143,6	154,4
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	60,0	109,3	119,4
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	21,8	21,9	21,9
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>62,2</b>	<b>76,1</b>	<b>77,3</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>22,6</b>	<b>15,3</b>	<b>14,2</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>123,9</b>	<b>117,7</b>	<b>116,0</b>

Der Verlauf der Wärmebelastung über die Prüfzeit ist für das System mit eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW und 300 l Pufferspeicher in Abbildung 84 und für das System mit eingestellter Gesamtleistung von 16,8 kW und 300 l Pufferspeicher in Abbildung 85 dargestellt. Der Einfluss des höheren spezifischen Speichervolumens von 36,1 l/kW am System mit eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW gegenüber einem spezifischem Speichervolumen von 17,9 l/kW bei einer eingestellten Gesamtleistung von 16,8 kW ist direkt ersichtlich. Während bei der niedrigen Gesamtleistung das Zusatzheizgerät nur für kurze Momente zusätzliche Wärme in den Puffer speichert- lediglich im 100% Lastpunkt wird das Zusatzheizgerät länger benötigt- weist dieses bei einer Gesamtleistung von 16,8 kW einen wesentlich höheren Anteil bei der Wärmebereitstellung auf. In beiden Fällen kann der Ottomotor als KWK-Einheit im Gesamtsystem während der Prüfung ohne Abschaltungen (ausgenommen einer regelmäßigen systemregelungsbedingten Abschaltung) betrieben werden.



**Abbildung 84:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 300 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW



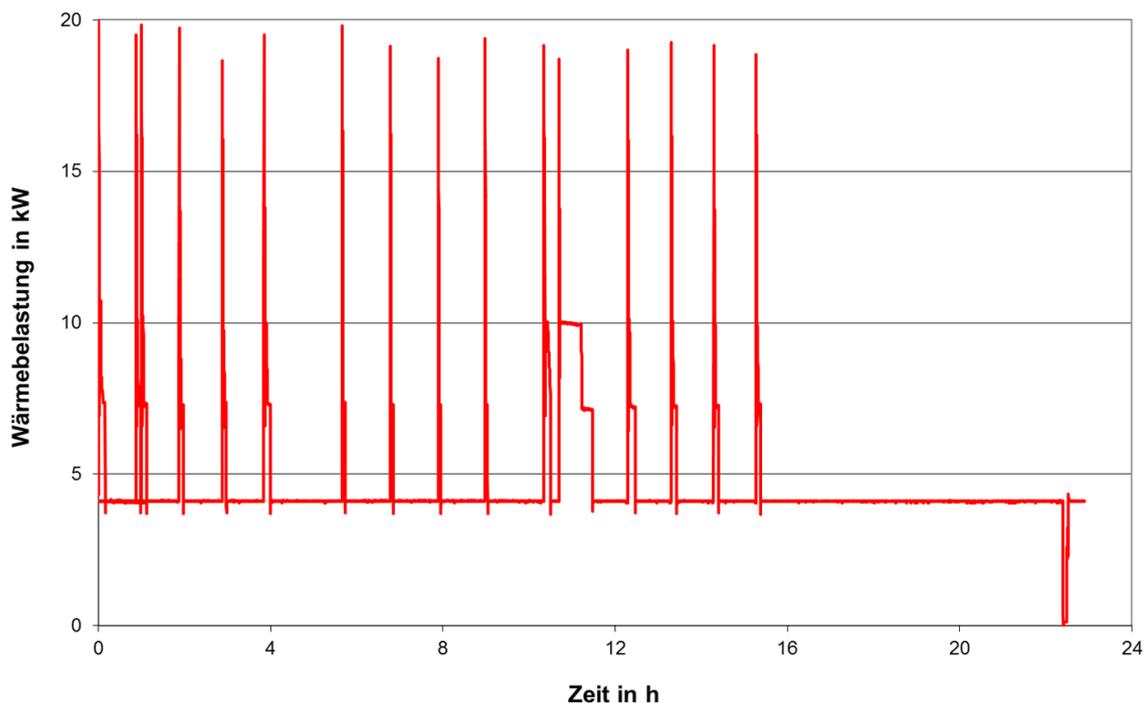
**Abbildung 85:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 300 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW

**Tabelle 24:** Normnutzungsgradermittlung System EcoPower 1.0 mit 500 l Kombispeicher

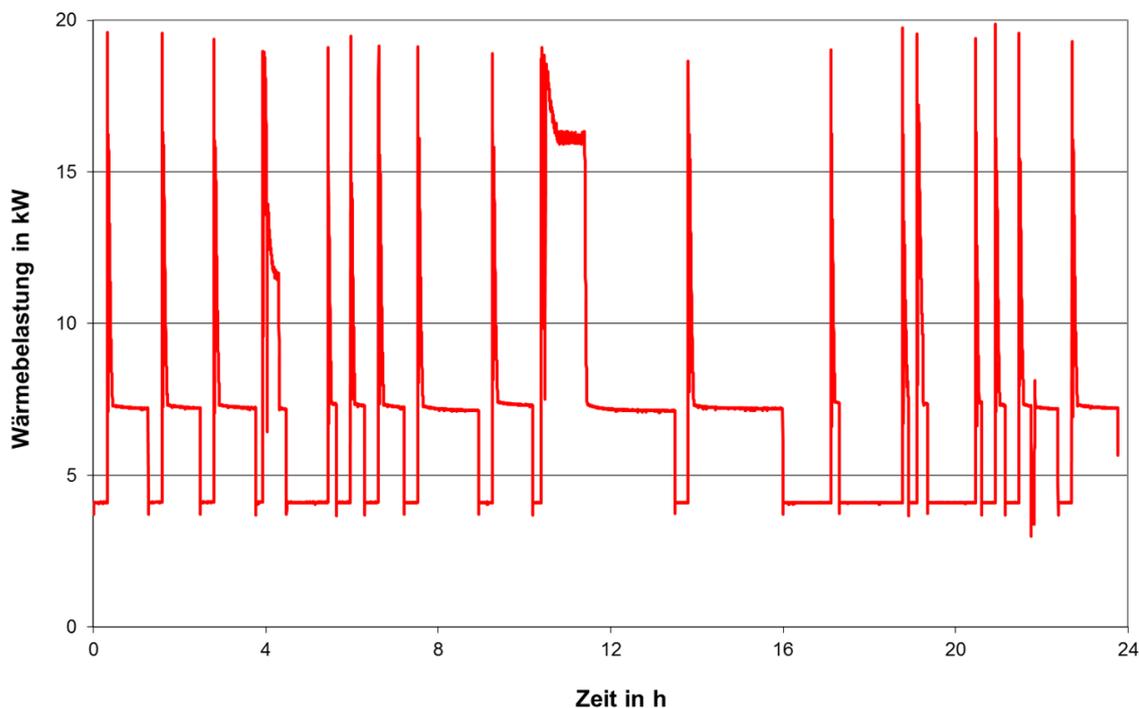
Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "ecoPower 1.0"					
Bezeichnung	Einheit	Eingestellte Gesamtleistung			
		8,3	15,1	16,5	
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	500	500	500
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	50,7	50,6	50,1
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30,2	30,3	30,5
Thermische Leistung KWK	$Q_{th}$	kW	2,5	2,5	2,5
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1,0	1,0	1,0
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	30,1	16,6	15,2
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	98,5	146,6	153,6
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	60,0	110,2	118,6
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	21,2	22,1	21,9
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>60,9</b>	<b>75,2</b>	<b>77,2</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>21,5</b>	<b>15,0</b>	<b>14,2</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>119,6</b>	<b>116,2</b>	<b>116,0</b>

Analog zur Messung des Systems mit einem 300 l Pufferspeicher, ist der Verlauf der Wärmebelastung über die Prüfzeit für das Gesamtsystem mit eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW und einem Pufferspeicher mit 500 l Speichervolumen in Abbildung 86 dargestellt. Aus Abbildung 87 kann weiterhin der Verlauf der Wärmebelastung über die Prüfzeit des Gesamtsystems mit 500 l Pufferspeicher bei eingestellter Gesamtleistung von 16,5 kW entnommen werden. Im Vergleich zur Messung des Gesamtsystems mit 300 l Pufferspeicher bei niedriger eingestellter Leistung fällt zunächst die geringfügige Abnahme der benötigten Taktungen des Zusatzheizgerätes auf. Der Verlauf ist allerdings ähnlich und weist kaum Änderungen im Vergleich zum System mit 300 l Pufferspeicher auf. Dies ändert sich bei höheren eingestellten Leistungen. Während beim System mit eingestellter Gesamtleistung von 16,8 kW und 300 l Pufferspeicher das Zusatzheizgerät für längere Zeiten im Modulationsbereich kontinuierlich Wärme bereitstellt, zeigt das Profil bei nahezu gleicher eingestellter Leistung von 16,5 kW und einem Pufferspeicher mit 500 l Speichervolumen ein eher taktendes Profil, was auf das größere Pufferspeichervolumen zurückzuführen ist. Ein wesentlicher Einfluss auf den ermittelten Normnutzungsgrad ist dabei nicht zu verzeichnen. In beiden Fällen liegt dieser bei 116 %, wobei die etwas geringer eingestellte Gesamtleistung beim System mit 500 l Pufferspeicher durch die etwas höheren Pufferspeicherverluste ausgeglichen wird.

Die Unterschiede im gemessenen Normnutzungsgrad bei einer eingestellten Gesamtleistung von 8,3 kW lassen sich nicht durch die Veränderung des Pufferspeichervolumens erklären. Hier zeigt sich, dass trotz sehr genauer und sorgfältiger Messung bereits kleinere Änderungen von Regelungsparameter einen relevanten Einfluss auf die Größenordnung des Ergebnisses haben. Auch die nicht absolut sichere Ermittlung der Energieinhalte des Pufferspeichers zu Beginn und zum Ende der Messung können zu diesen Abweichungen führen.



**Abbildung 86:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8,3 kW



**Abbildung 87:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 1.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 16,5 kW

#### 4.5.2 Vaillant EcoPower 3.0

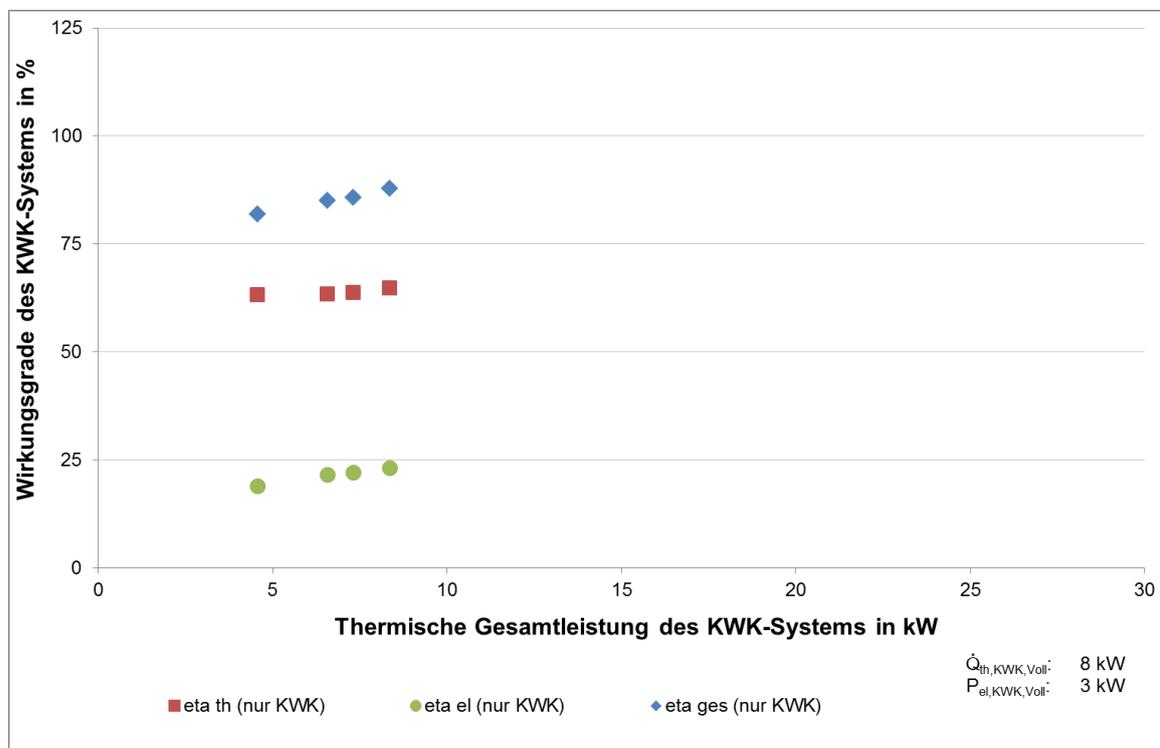
Die Mikro-KWK-Anlage ecoPower 3.0 von Vaillant wird aufgrund der höheren thermischen und elektrischen Leistung gegenüber dem ecoPower 1.0 vorzugsweise im Zwei- bis Mehrfamilienhaus sowie in Gewerbeobjekten und öffentlichen Liegenschaften eingesetzt. Im Gegensatz zum ecoPower 1.0 kann der ecoPower 3.0 als monovalenter Wärmelieferant eingesetzt werden und wird nicht zwangsweise mit einem Zusatzheizgerät vertrieben. Der höchste Nutzen wird allerdings in der Regel auch hier als Gesamtsystem mit Pufferspeicher und Zusatzheizgerät erreicht werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurde der ecoPower 3.0 als monovalente Anlage mit einem 750 l großen Pufferspeicher vermessen.

Tabelle 25 zeigt zunächst eine Übersicht der gemessenen Werte am ecoPower 3.0 sowie die ermittelten Wirkungsgrade (ohne Speicher) welche in Abbildung 88 in grafischer Form dargestellt sind. Neben der Minimallast in Punkt 1 und der Maximallast in Punkt 3 wurden in Punkt 2a und 2b zwei weitere Teillastpunkte vermessen. Der vom Hersteller angegebene Gesamtwirkungsgrad von >90 % kann nicht vollständig reproduziert werden, im Punkt 3 tritt eine Abweichung von etwa 2 %- Punkten zwischen Herstellerangabe und ermittelten Wirkungsgrad auf.

**Tabelle 25:** Kennfeldermittlung ecoPower 3.0

Wirkungsgrade "ecoPower 3.0"						
Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte				
		1	2a	2b	3	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	74,8	75,3	75,03	75,4
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	60,1	59,6	59,7	59,8
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	56,0	57,7	58,7	62,3
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	11,8	11,5	11,5	11,6
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	42	188	178	140
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	559	35	25	44
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{lufftfrei}}$	ppm	42	191	181	142
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{lufftfrei}}$	ppm	557	36	25	44
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B,Ges}}$	kW	7,2	10,38	11,49	12,9
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B,KWK}}$	kW	7,2	10,38	11,49	12,9
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	4,6	6,58	7,32	8,4
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	1,36	2,24	2,53	2,98
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>63,1</b>	<b>63,4</b>	<b>63,7</b>	<b>64,7</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>18,8</b>	<b>21,6</b>	<b>22,0</b>	<b>23,1</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>18,8</b>	<b>21,6</b>	<b>22,0</b>	<b>23,1</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>81,9</b>	<b>85,0</b>	<b>85,7</b>	<b>87,8</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	1	<b>0,97</b>	<b>0,85</b>	<b>0,83</b>	<b>0,77</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	$PEE$	%	<b>7,7</b>	<b>12,5</b>	<b>13,4</b>	<b>15,8</b>



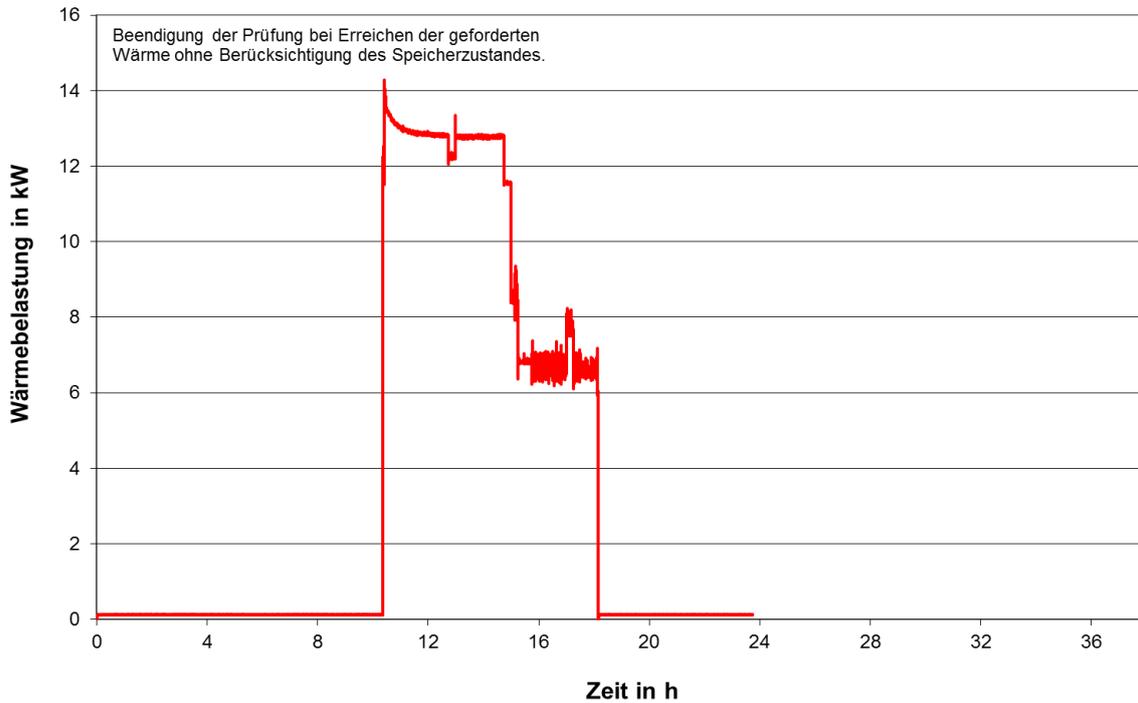
**Abbildung 88:** Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „ecoPower 3.0“

Die Vermessung des ecoPower 3.0 als monovalente Anlage hinsichtlich des Normnutzungsgrades nach DIN 4709 erwies sich als nicht abschließend normgerecht. Die Ursache hierfür liegt in der Kombination aus KWK-Einheit mit großem Pufferspeicher bei gleichzeitig geringer thermischer Leistung des Gesamtsystems. Gemäß den Vorgaben der DIN 4709 ist der 100 %- Lastpunkt so einzustellen, dass dieser der Gesamtleistung des zu prüfenden Systems entspricht. Dies führt dazu, dass dem Pufferspeicher über den Zeitraum der Prüfung im Verhältnis zur Größe nur geringfügig Wärme entnommen wird. Während des 24 h Lastprofils wird die KWK-Einheit lediglich einmal angesprochen um den Wärmeinhalt des Pufferspeichers wieder zu füllen. Die Konsequenz daraus ist ein wesentlich unterschiedlicher Wärmeinhalt im Pufferspeicher bei Erreichen der eingestellten und abzufahrenden Wärmemenge im Vergleich zum Beginn der Prüfung. Auch ein Nachfahren der erlaubten 30 min nach Ablauf der Prüfung im 30 % Lastpunkt hat hierbei keinen wesentlichen Einfluss. Wie stark dieses Verhalten den Normnutzungsgrad beeinflusst, ist aus Tabelle 26 ersichtlich. Die zweite Messung beinhaltet die Bilanzierung nach Ablauf des 24 h-Lastprofils, während die erste Messung nach Erreichen des gleichen Wärmeinhalts im Speicher wie zu Beginn der Messung beendet und bilanziert wurde. Der sehr viel höhere Normnutzungsgrad der zweiten Messung ist hierdurch einfach zu erklären. Der Speicher ist bei Beginn der Messung komplett geladen und wird während der Prüfung ein weiteres Mal geladen. Im Anschluss daran wird dem Pufferspeicher weiter Wärme entzogen die sich in der Bilanzierung als positiv erweist, da der Energieaufwand zum Laden des Pufferspeichers nicht berücksichtigt wird. Aus diesem Grund wurde bei der ersten Messung die Laufzeit des Prüfprofils so erweitert, dass die Prüfung an dem Punkt beendet wurde, wo der gleiche Energieinhalt im Speicher erreicht wurde wie zu Beginn der Messung.

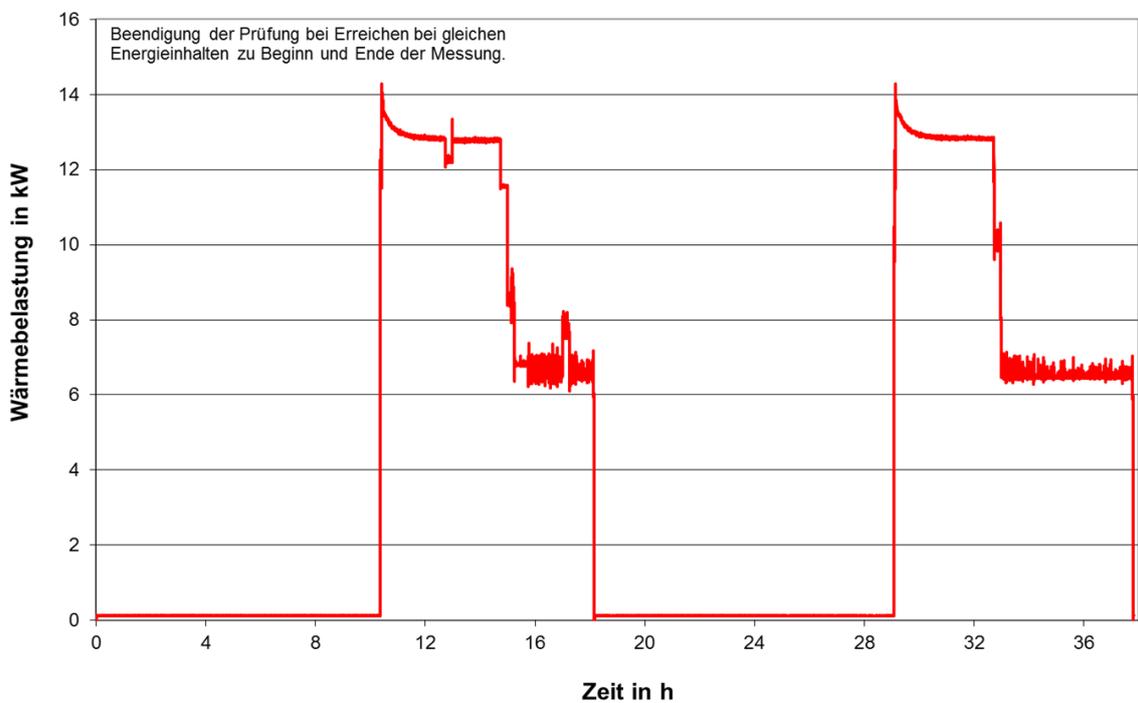
**Tabelle 26:** Normnutzungsgradermittlung System ecoPower 3.0 mit 750 l Kombispeicher

Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "ecoPower 3.0"				
Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung	
			8	8
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	750	750
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	50,1	50,1
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30,3	30,3
Thermische Leistung KWK	$Q_{th}$	kW	8,0	8,0
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	3,0	3,0
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	100,0	100,0
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	158,2	80,3
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	90,3	57,8
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	32,7	16,7
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>57,1</b>	<b>72,0</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>20,7</b>	<b>20,8</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>113,4</b>	<b>128,9</b>

Die erwähnten Schwierigkeiten bei der Messung von monovalenten KWK-Anlagen ecoPower 3.0 ohne Zusatzheizgerät sind in Abbildung 89 und Abbildung 90 dargestellt. Abbildung 89 zeigt den Verlauf der Wärmebelastung über die Prüfzeit bei Beendigung der Messung nach Erreichen der benötigten Wärmemenge. Zu erkennen ist, dass der Pufferspeicher, nachdem die Messung nach vollständigem Laden des Speichers gestartet wurde, während der Prüfung einmal nachgeladen wurde. Nach Ablauf der 24 h ist anzunehmen, dass der Speicher einen erheblich höheren Energieinhalt als zu Beginn der Messung aufweist, was eine Vergleichbarkeit nicht möglich macht. In Abbildung 90 ist der Verlauf der Wärmebelastung der gleichen Prüfung bis zum Zeitpunkt gleicher Energiemengen zu Beginn und zum Ende der Prüfung. Die Prüfung müsste hiernach auch ca. 38 h ausgedehnt werden, was weder normgerecht noch sinnvoll ist. Klar ist allerdings auch, dass eine monovalente Lösung mit einem Ottomotor für ein Einfamilienhaus mit lediglich 8 kW Heizlast nicht zu empfehlen ist. Für eine sinnvolle und aussagekräftige Bewertung nach DIN 4709 ist die Betrachtung eines Gesamtsystems mit Zusatzheizgerät unerlässlich.



**Abbildung 89:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 3.0 mit 750 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8 kW; Beendigung der Messung nach 24 h



**Abbildung 90:** Gemessene Wärmebelastung EcoPower 3.0 mit 500 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 8 kW; Beendigung der Messung bei gleichem Speicherinhalt

### 4.5.3 DeDietrich/Remeha eVita 25s

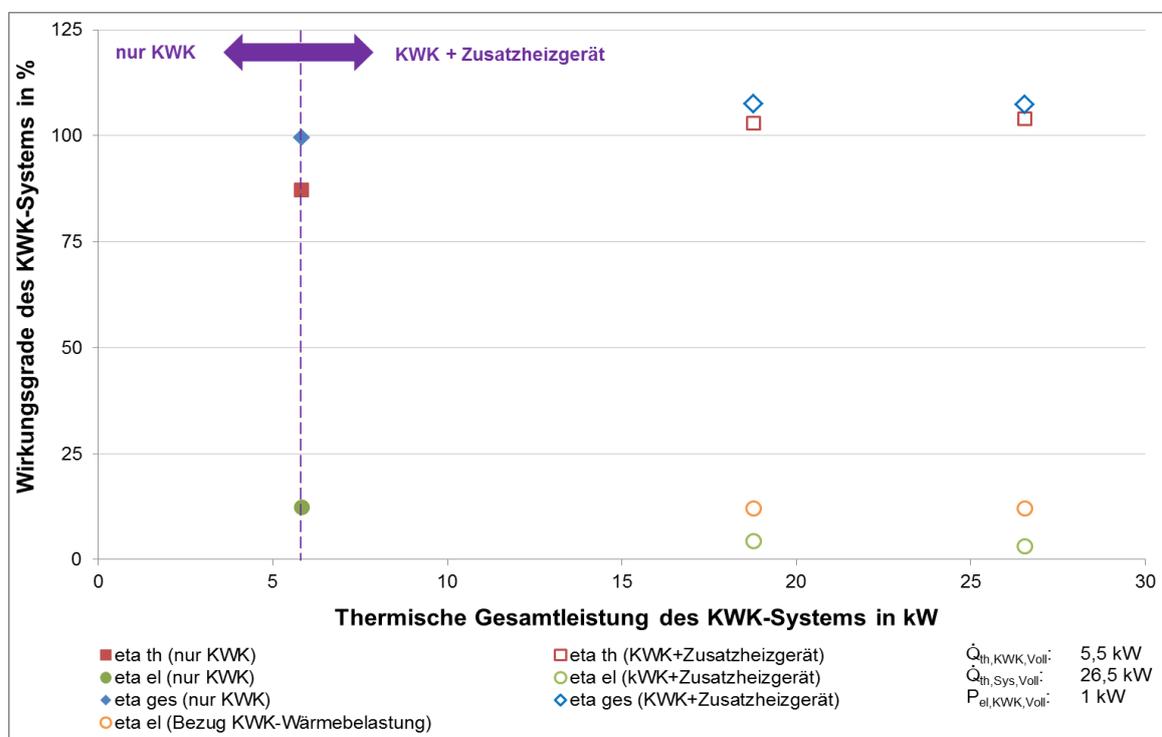
Das aus der KWK-Einheit, einem integrierten Zusatzheizgerät und einem 230 l Pufferspeicher bestehende Gesamtsystem eVita 25s von DeDietrich/Remeha basiert auf einem Einzylinder Microgen-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von max. 1 kW. Die kompakte, wandhängende Einheit aus Stirlingmotor und Zusatzheizgerät weist eine thermische Gesamtleistung von max. 26,5 kW auf.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades wurde der Prüfstand direkt an den Vor- und Rücklaufanschlüssen des Geräts angebunden. Über die Simulation der Außentemperatur mit Hilfe eines Potentiometers konnte die Vorlauftemperatur über die Heizkurve eingestellt werden. Die konstante Rücklauftemperatur wurde wie bei allen anderen Messungen vom Prüfstand bereitgestellt. Gemessen wurden die Prüfpunkte 3, 4 und 5. Eine Vermessung der Teillastpunkte der KWK-Einheit konnte aufgrund fehlender Einstellmöglichkeiten am Gerät nicht vorgenommen werden.

Die Ergebnisse zur Wirkungsgradbestimmung sind Tabelle 27 zu entnehmen und decken sich im Wesentlichen mit den Herstellerangaben. Auffällig sind die z. T. stark voneinander abweichenden Emissionswerte, insbesondere die CO-Emissionen im Volllastpunkt. In allen drei Prüfpunkten werden die Emissionsgrenzen der derzeit geltenden Normen und Richtlinien jedoch eingehalten.

**Tabelle 27:** Kennfeldermittlung eVita 25s

Wirkungsgrade "eVita 25s"					
Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte			
		3	4	5	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	50,5	50,4	50,7
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	30,1	30,3	30,1
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	46,8	38,1	35,8
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	8,4	9,2	8,6
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	25	47	113
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	24	64	39
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{lufftfrei}}$	ppm	35	60	154
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{lufftfrei}}$	ppm	33	82	53
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B,Ges}}$	kW	6,7	18,2	25,5
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B,KWK}}$	kW	6,7	6,7	6,7
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	5,8	18,8	26,5
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,83	0,82	0,81
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>87,2</b>	<b>103,1</b>	<b>104,2</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>12,4</b>	<b>4,5</b>	<b>3,2</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>12,4</b>	<b>12,2</b>	<b>12,1</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>99,5</b>	<b>107,6</b>	<b>107,4</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	1	<b>0,89</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	%	<b>18,0</b>	<b>19,1</b>	<b>18,2</b>



**Abbildung 91:** Kennfeldermittlung DeDietrich/Remeha 25s

Die in Tabelle 28 hinterlegten, ermittelten Normnutzungsgrade des KWK-Systems in Verbindung mit einem 230 l Pufferspeicher zeigen analog zu den gemessenen Werten des ecoPower 1.0 einen Abfall des Nutzungsgrades bei geringeren Anteilen der KWK-Einheit am Gesamtsystems. Anhand der erzeugten elektrischen Energiemenge ist zu erkennen, dass der Stirlingmotor in keinem der beiden Messungen über die gesamten 24 h betrieben wird. Bei höher eingestellter Gesamtleistung erhöht sich die Laufzeit der KWK-Einheit und somit auch die Menge an erzeugten elektrischen Strom. Das Verhältnis aus erzeugtem elektrischem Strom zu erzeugter Wärme nimmt bei größerer thermischer Gesamtleistung des Systems allerdings ab, was zu einem geringeren Normnutzungsgrad führt. Ausschlaggebend hierfür ist der höhere Bedarf des Zusatzheizgerätes bei großen abzufahrenden Leistungen.

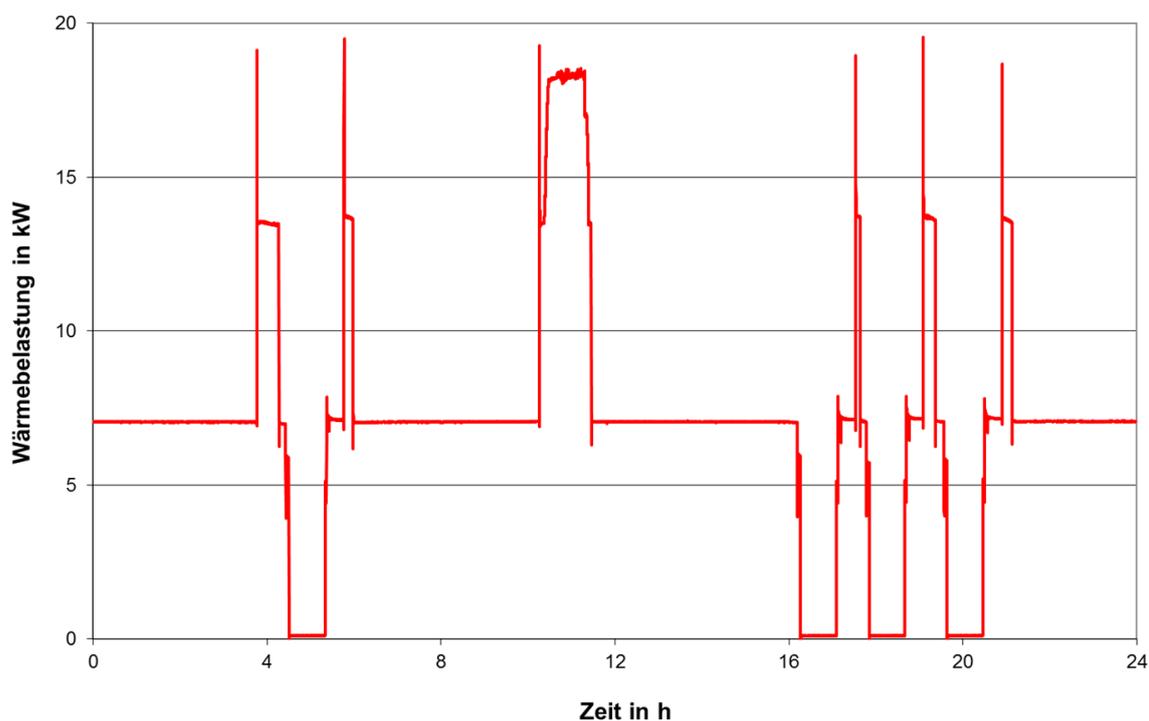
Insgesamt liegen die ermittelten Normnutzungsgrade weiterhin über den üblichen Normnutzungsgraden von Brennwertgeräten. Eine geringfügige Erhöhung des Normnutzungsgrades könnte über größere Pufferspeichervolumina und damit verbundene geringere Taktungen der KWK-Einheit erreicht werden.

**Tabelle 28:** Normnutzungsgradermittlung System eVita 25s mit 230 l Kombispeicher

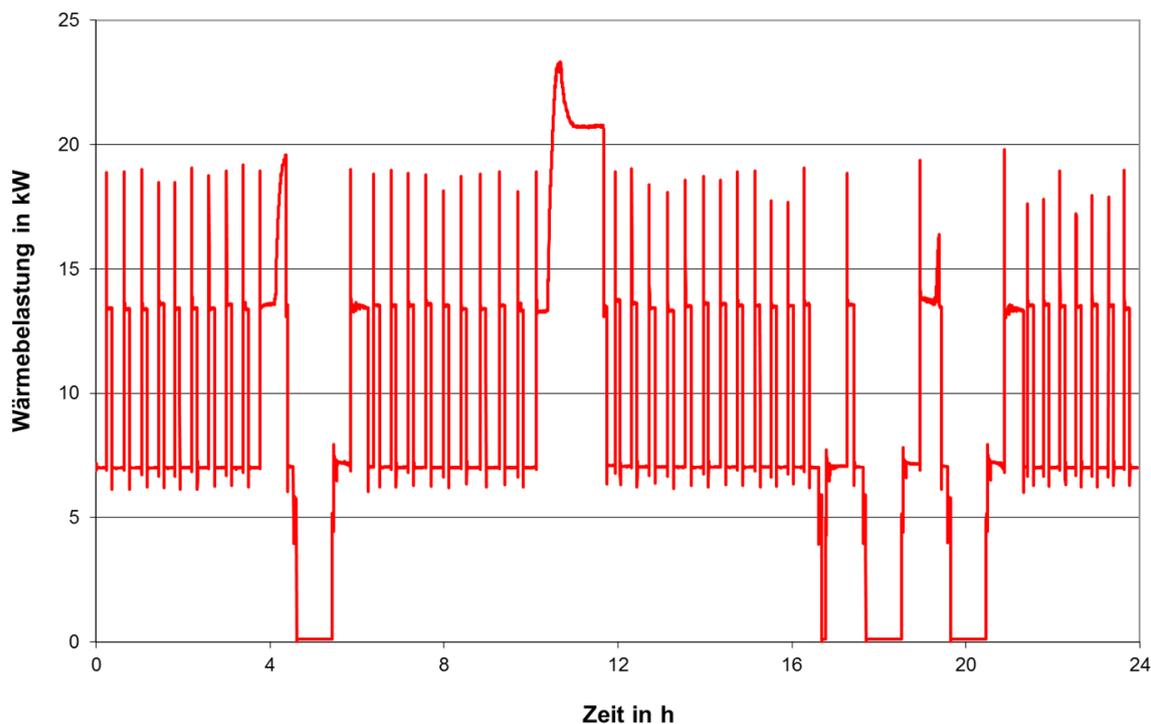
Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "eVita 25s"				
Bezeichnung	Einheit	Eingestellte Gesamtleistung		
		18,3	25,5	
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	230	230
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	49,6	50,1
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30,1	50,1
Thermische Leistung KWK	$Q_{th}$	kW	5,0	5,0
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1,0	1,0
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	27,3	19,6
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	157,7	213,4
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	131,5	185,6
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	16,5	17,3
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>83,4</b>	<b>87,0</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>10,5</b>	<b>8,1</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>111,9</b>	<b>109,1</b>

In Abbildung 92 und Abbildung 93 ist der Verlauf der Wärmebelastung über die Prüfzeit beider Messungen dargestellt. Wie zu erwarten ist bei einem spezifisch größeren Speichervolumen von 12,6 l/kW bei einer eingestellten Gesamtleistung von 18,3 kW gegenüber einem spezifischen Speichervolumen von 9,0 l/kW bei

einer eingestellten Gesamtleistung von 25,5 kW der Anteil des Zusatzheizgerätes an der Wärmebereitstellung geringer, was in einem höheren Normnutzungsgrad resultiert. Bei höherer eingestellter Gesamtleistung steigt die Laufzeit der KWK-Einheit (Stirling) leicht an. Wie bereits erwähnt können höhere Laufzeiten des Stirlingmotors ggf. durch ein größeres Pufferspeichervolumen erreicht werden. Gleichwohl kann der Vorteil eines kleinen Pufferspeichers nicht vernachlässigt werden. Insbesondere in kleineren Reihenhäusern und nicht unterkellerten Einfamilienhäusern sollte der geringere Platzbedarf eines kleinen Pufferspeichers nicht unterschätzt werden.



**Abbildung 92:** Gemessene Wärmebelastung eVita 25s mit 230 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 18,3 kW



**Abbildung 93:** Gemessene Wärmebelastung eVita 25s mit 230 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 25,5 kW

#### 4.5.4 Viessmann Vitowin 300-W

Das Vitotwin 300-W der Firma Viessmann ist ein Mikro-KWK-Gerät auf Stirlingmotorbasis. In einem kompakten Wandgeräte-Gehäuse sind sowohl die KWK-Einheit in Form eines hermetisch geschlossenen, laufruhigen und wartungsfreien Stirlingmotors als auch ein Gas-Brennwertgerät als Spitzenlastbrenner zusammengeführt. Das Vitotwin 300-W zeichnet sich zunächst durch seine sehr kompakte Bauweise aus. Als autarker Wärmeversorger werden dank des integrierten Spitzenlastbrenners keine Zusatzmodule benötigt um den Wärmebedarf eines Ein- Zweifamilienhauses zu decken. Eben diese Gebäudeklassen sind auch die Zielgruppe des Gerätes. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Modernisierung von 1-2 Familienhäusern gelegt. Die Forderung konventioneller Heizungsnetze nach einer hohen Vorlauftemperatur bei gleichzeitig möglichst geringer Rücklauftemperatur zur Kühlung des Stirlingmotors wird im Vitotwin 300-W durch einen Volumenstromsensor und einer regelbaren Pumpe realisiert. Als Gesamtsystem wird der Vitotwin 300-W wahlweise zusammen mit einem 750 l Kombispeicher (Vitocell 340-M) oder einem 400 l Pufferspeicher (Vitocell 100-E) ausgeliefert. Während der 750 l Kombispeicher bei

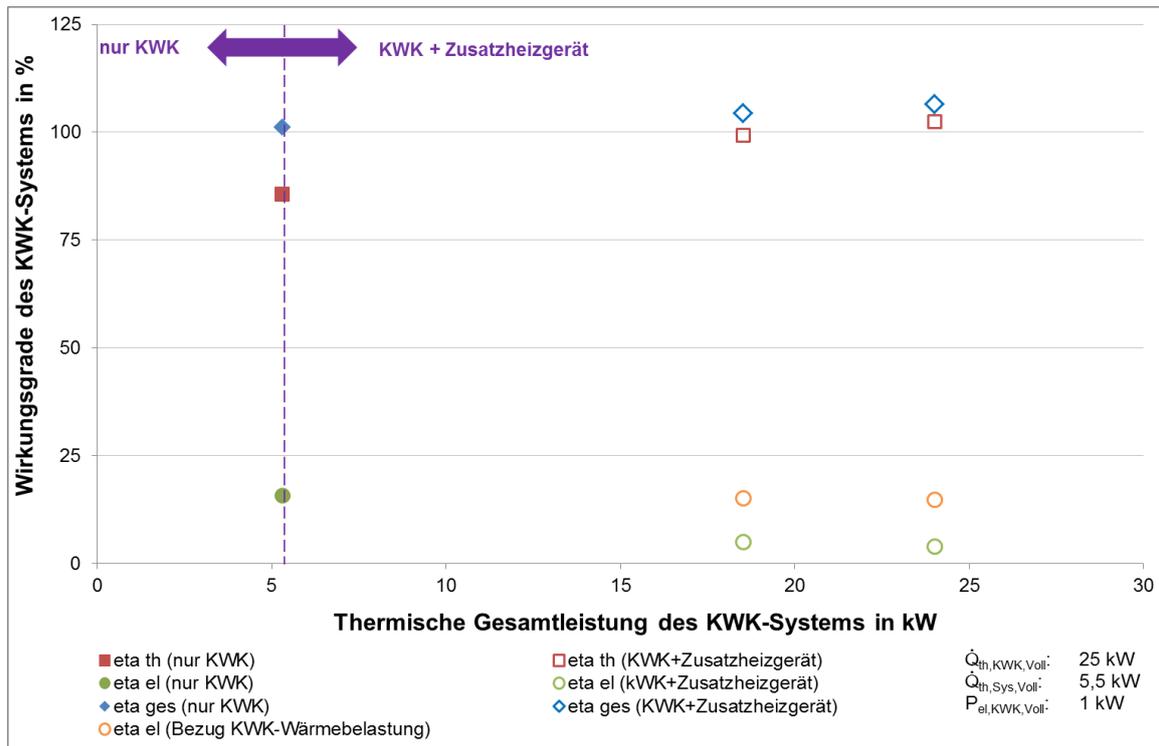
einer kompletten Heizungsanlagenmodernisierung Einsatz finden kann, eignet sich der 400 l Pufferspeicher beispielsweise bei Modernisierungen, wo auf einen bestehenden Trinkwarmwasserspeicher zurückgegriffen werden kann. Der integrierte und geeichte Stromzähler mit Rücklaufsperrung wird zur Abrechnung der KWK-Förderung genutzt und macht einen externen zweiten Stromzähler überflüssig. Lediglich der Hauptzähler muss ggf. gegen einen Zweirichtungszähler getauscht werden.

Mit einem Gewicht von ca. 120 kg ist der Vitotwin 300-W schwerer als in der Leistungsklasse vergleichbare Brennwertwandgeräte. Das Anbringen an eine ausreichend tragfähige Wand kann durch Hilfsmittel erleichtert werden und stellt auf Dauer keine Installationsproblematik dar, was die eigene Installation im GWI-Versuchshaus ebenfalls gezeigt hat.

Die in Tabelle 29 hinterlegten gemessenen Werte entsprechen im Wesentlichen denen der vom Hersteller angegebenen Werte. Abbildung 94 zeigt die Ergebnisse in grafischer Form.

**Tabelle 29:** Kennfeldermittlung Viessmann Vitotwin 300-W

Wirkungsgrade "Vitotwin 300-W"					
Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte			
		3	4	5	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	50,4	49,6	49,6
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	29,8	30,0	29,9
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	46,5	40,0	40,4
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	9,5	9,0	8,7
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	34	38	35
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	32	25	13
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{lufftfrei}}$	ppm	42	49	47
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{lufftfrei}}$	ppm	39	33	17
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B,Ges}}$	kW	6,2	18,6	23,4
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B,KWK}}$	kW	6,2	6,2	6,2
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	5,3	18,5	24,0
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,97	0,94	0,92
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>85,5</b>	<b>99,5</b>	<b>102,6</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>15,6</b>	<b>5,1</b>	<b>3,9</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>15,6</b>	<b>15,2</b>	<b>14,8</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>101,1</b>	<b>104,5</b>	<b>106,5</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	1	<b>0,81</b>	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	$PEE$	%	<b>21,1</b>	<b>17,2</b>	<b>18,0</b>



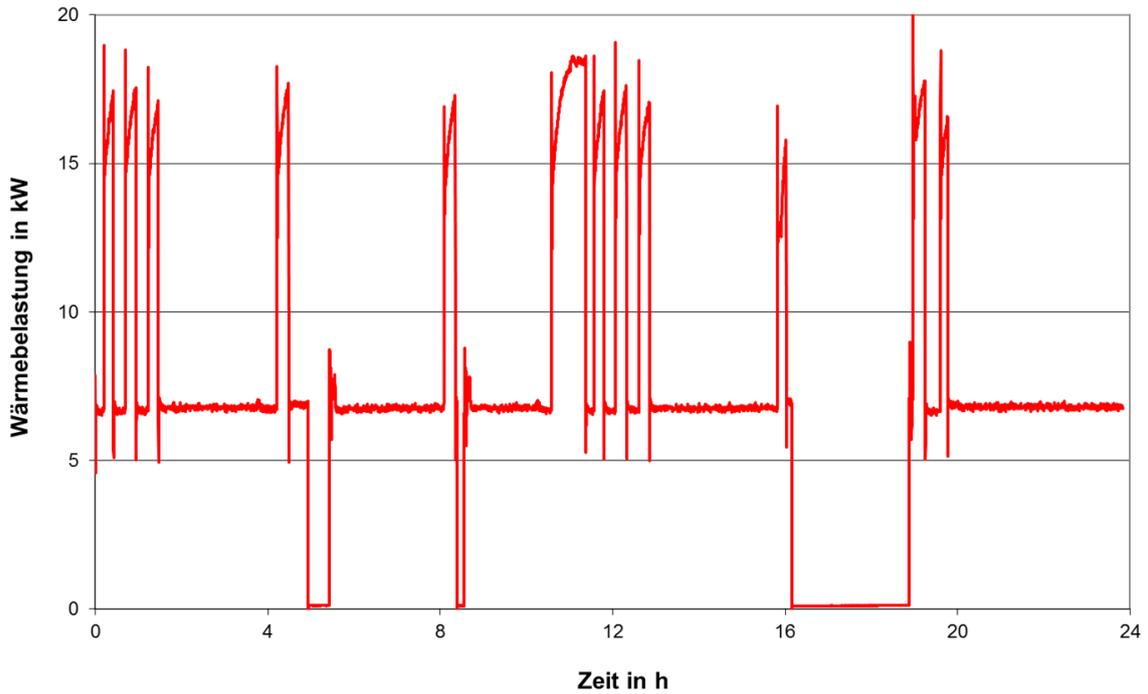
**Abbildung 94:** Kennfeldermittlung Viessmann Vitotwin 300-W

Die Normnutzungsgradmessungen am System Vitotwin 300-W wurden normgerecht mit dem arithmetischen Mittel aus größter und kleinster einstellbarer Leistung durchgeführt. Da das System zum Zeitpunkt des Vorhabens mit zwei unterschiedlichen Puffer- bzw. Kombispeichergößen erhältlich war, wurden diese beiden Systeme vermessen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 30 zu finden.

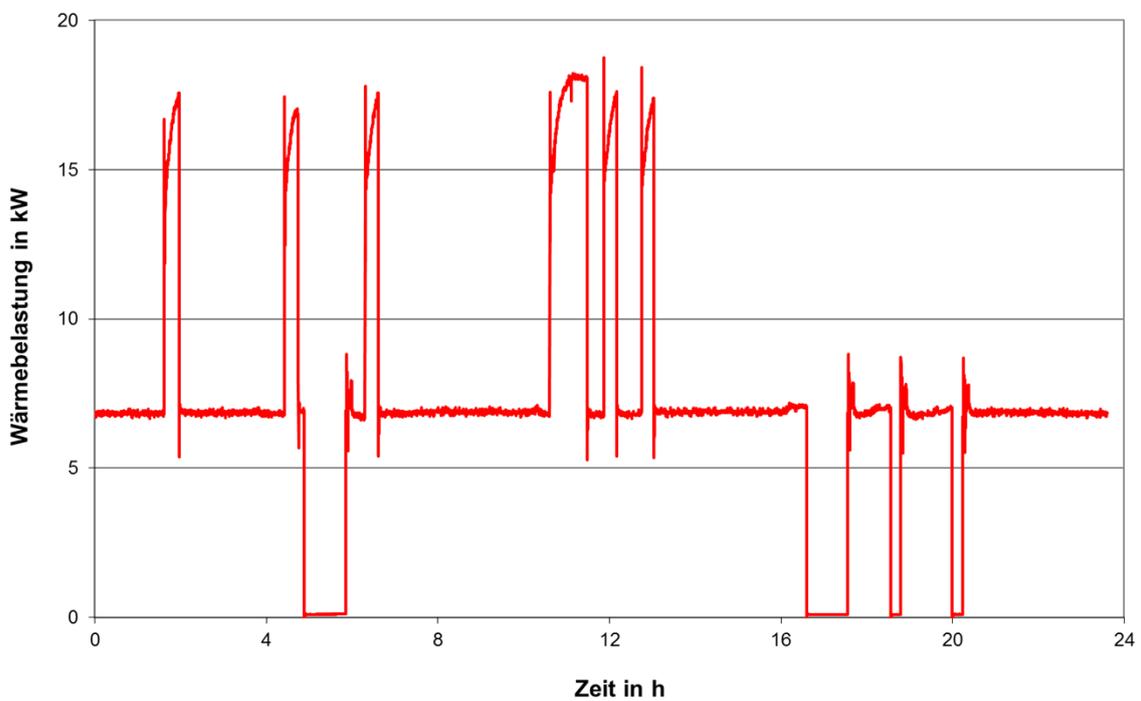
**Tabelle 30:** Normnutzungsgradermittlung System Vitotwin 300-W mit 750 l Kombispeicher und 400 l Pufferspeicher

Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "Vitotwin 300-W"				
Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung	
			19	19
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	400	700
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	50,4	50,6
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	29,9	29,8
Thermische Leistung KWK	$Q_{th}$	kW	5,5	5,5
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1,0	1,0
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	28,9	28,9
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	161,9	160,7
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	137,3	137,3
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	19,2	20,0
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>84,8</b>	<b>85,4</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>11,9</b>	<b>12,4</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>117,1</b>	<b>119,4</b>

Es wird deutlich, dass beim System Vitotwin 300-W bei gleichbleibender Leistung die Pufferspeichergröße einen Einfluss auf den Normnutzungsgrad zeigt. Zu erkennen ist dies direkt an der erzeugten elektrischen Energie während der Messung, was auf eine höhere Laufzeit der KWK-Einheit beim System mit 750 l Kombispeicher zurückzuführen ist. Zur Verdeutlich sind in Abbildung 95 und Abbildung 96 die Verläufe der Wärmebelastung während der Prüfung über die Prüfzeit aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass beim System mit 400 l Pufferspeicher der Spitzenlastbrenner erwartungsgemäß einen höheren Anteil an der Wärmebereitstellung aufweist als dies beim System mit 750 l Kombispeicher der Fall ist. Weiterhin zeigt sich die etwas höhere Laufzeit des Stirlingmotors beim System mit 750 l Kombispeicher. Allerdings ist auch hier zu betonen, dass bei der Planung und Installation eines solchen Systems nicht die nur geringfügig voneinander abweichenden Effizienzen der ausschlaggebende Faktor bei der Auswahl des Systems sein sollten. Vielmehr gilt auch hier wieder die Fragen des individuellen Platzangebotes sowie der ggf. vorhandenen Speicher zu klären.



**Abbildung 95:** Gemessene Wärmebelastung Vitotwin 300-W mit 400 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 19 kW

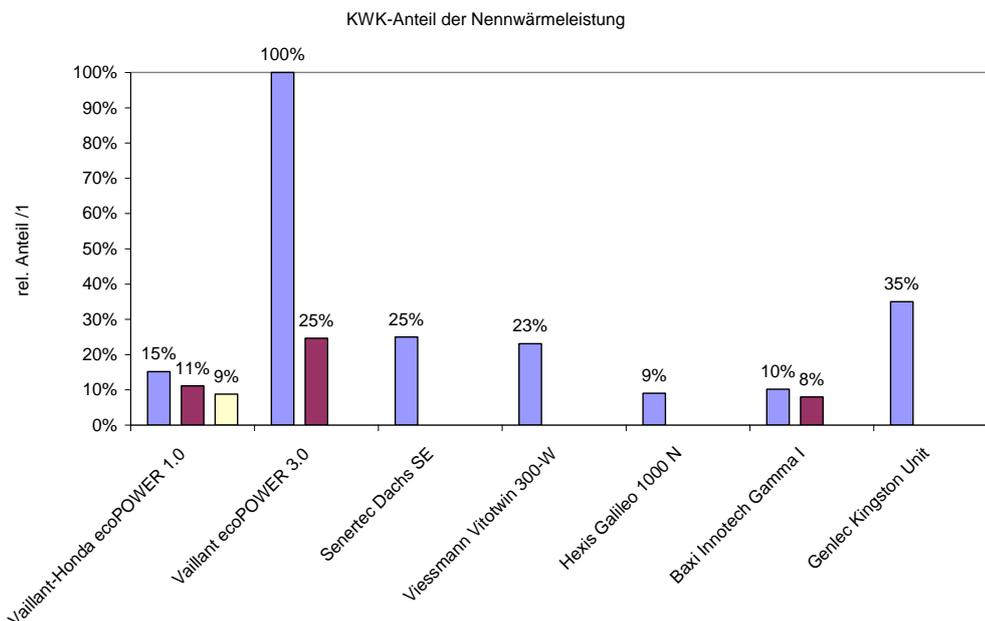


**Abbildung 96:** Gemessene Wärmebelastung Vitotwin 300-W mit 750 l Speicher und eingestellter Gesamtleistung von 19 kW

## 4.6 Messergebnisse EBI

Die getesteten Mikro-KWK-Systeme, speziell die Kombination mit dem Pufferspeicher, und die Steuerung der Systeme wurde für alle Labormessungen mit den Herstellern abgestimmt. Bei den Systemen Vaillant ecoPOWER 3.0 und Hexis Galileo 1000N kam eine PC-basierte Herstellersoftware zum Einsatz, mit der gezielt Vorlauftemperaturen für die Lastprofilaufnahmen oder Belastungen bei den Kennlinienaufnahmen eingestellt werden konnten. Im Fall des Senertec Dachs Stirling SE wurden dagegen alle Einstellungen über den integrierten Regler MSR-S vorgenommen, die Einstellungen erfolgten auch hier nach Vorgabe des Herstellers. Die PEM-Brennstoffzelle Gamma 1.0 von Baxi Innotech wurde teilweise am integrierten Regler eingestellt, über eine Online-Verbindung wurden einige Einstellungen auch durch den Hersteller vorgenommen. Als Bilanzierungsschnittstelle für die Lastprofil- und Kennlinienmessungen wurde wegen der Temperaturvorgabe 50 °C / 30 °C einheitlich der Übergang Pufferspeicher-Heizkreis in Anlehnung an die prEN 50465 definiert, auch um das gesamte System inklusive von Speicherverlusten bereits in der Kennlinienmessung abzubilden.

Die untersuchten Systeme unterschieden sich in den eingesetzten Technologien und den Wärmeleistungsanteilen der KWK-Einheiten. Diese Unterschiede im relativen Anteil der KWK-Einheiten an der Gesamtwärmeleistung verdeutlicht die Übersicht in Abbildung 97 der Mikro-KWK-Systeme, die an der Forschungsstelle im Rahmen der Laboruntersuchungen oder des Demolabors betrachtet wurden.



**Abbildung 97:** KWK-Anteil der Nennwärmebelastung

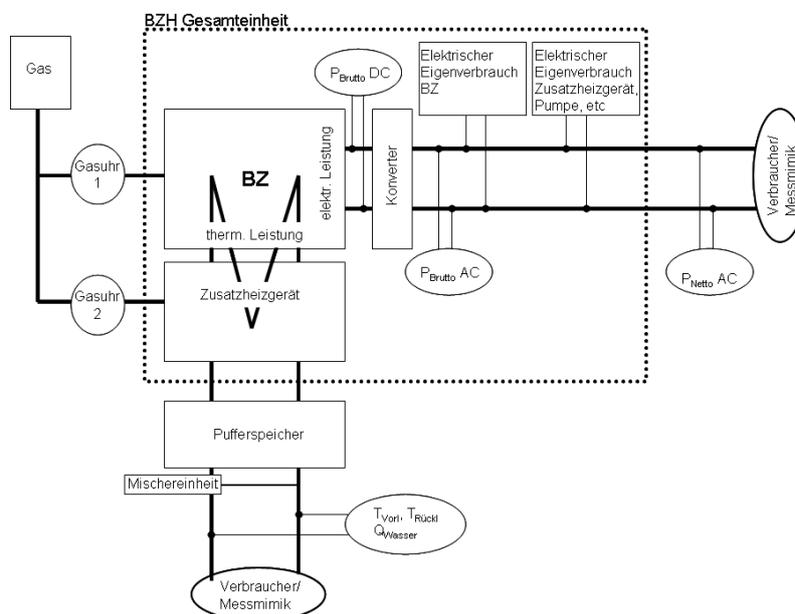
Bei mehreren Zusatzheizgerätvarianten von Seiten des Herstellers wurden diese berücksichtigt und führten zu zwei Balken oder beim Vaillant-Honda-System mit drei Zusatzheizgerätvarianten zu entsprechend drei Balken. Der Vaillant ecoPOWER 3.0 war das einzige Gerät im Testfeld ohne Zusatzheizgerät und folglich 100 % relative Nennwärmebelastung durch den Gasmotor. In einer typischen Installation würde auch dieser mit einem Zusatzheizgerät installiert werden und bei einem 24 kW Zusatzheizgerät aus dem Angebot des Herstellers fiel der relative Anteil an der Nennwärmebelastung dann auf die beispielsweise gezeigten 25 %.

Wegen der Einheitlichkeit der Messungen wurden als Nennwärmebelastung immer die tatsächliche Nennwärmebelastung eingestellt und nicht, wie in der DIN 4709 bei „einstellbaren“ Geräten gefordert, das arithmetische Mittel aus kleinster und maximaler Nennwärmeleistung. Ausgangspunkt für diese Praxis war der laut Hersteller nicht einstellbare Senertec Dachs Stirling. Diese Messungen erfolgten deshalb und wegen der Heizkreismischersteuerung durch den Prüfstand in Anlehnung an die DIN 4709.

#### 4.6.1 Hexis Galileo 1000N

Als Testsystem aus dem Brennstoffzellenprojekt „Brennstoffzellen im System Gebäude/Anlagentechnik“ DVGW G 8/01/10 wurde das SOFC-System Galileo 1000N der Firma Hexis mit einem 500 l Heizwasser-Pufferspeicher der Firma

Wikora untersucht. Wie oben vorangestellt, konnten die Einstellungen des SOFC-Systems komfortabel über ein PC-Programm vorgenommen werden. Den Messaufbau an der Galileo 1000N verdeutlicht Abbildung 98.



**Abbildung 98:** Skizze des Geräteanschlusses am Beispiel von Galileo 1000N von Hexis

### Wirkungsgradmessungen

In verschiedenen Laststufen wurde bei einer Vorlauftemperatur von 50 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C der Wirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert  $H_i$ ) ermittelt.

Die Lastpunkte waren:

1. 50 % - Nennwärmebelastung, BZ-Einheit ohne Zusatzheizgerät
2. 100 % - Nennwärmebelastung, BZ-Einheit ohne Zusatzheizgerät
3. 50 % - Nennwärmebelastung, BZ-Einheit mit Zusatzheizgerät  
(bei 100 % BZ-Betrieb),
4. 100 % - Nennwärmebelastung  
(sowohl BZ-Einheit als auch Zusatzheizgerät)

Die 50 %-Lastpunkte wurden jeweils als arithmetisches Mittel aus dem jeweiligen Minimallast- und Volllastpunkt angesetzt.

In Abbildung 99 wurden die Wirkungsgrade (elektrisch, thermisch, gesamt) für die verschiedenen Lastpunkte eingetragen, die Messwerte mit den Wirkungsgraden, Primärenergiefaktoren und Primärenergieeinsparung sind in Tabelle 31 zu finden.

Mit zunehmender Last der Brennstoffzelle stieg der Gesamtwirkungsgrad stark an und konnte – bedingt durch den Brennwertbetrieb – mit Zusatzheizgerät über 100 % steigen.

Die elektrische Leistung der Gesamteinheit zeigte den höchsten Wert bei Lastpunkt 2. Es wurde nur der Eigenverbrauch der Brennstoffzelle abgezogen.

Bei den Lastpunkten 3 und 4 wurde der Zusatzheizer zugeschaltet, der selbst einen elektrischen Eigenverbrauch hatte. Diese reduzierte zwangsläufig die elektrische Leistung des Gesamtgerätes. Deshalb sank auch der elektrische Wirkungsgrad in den Lastpunkten 3 und 4.

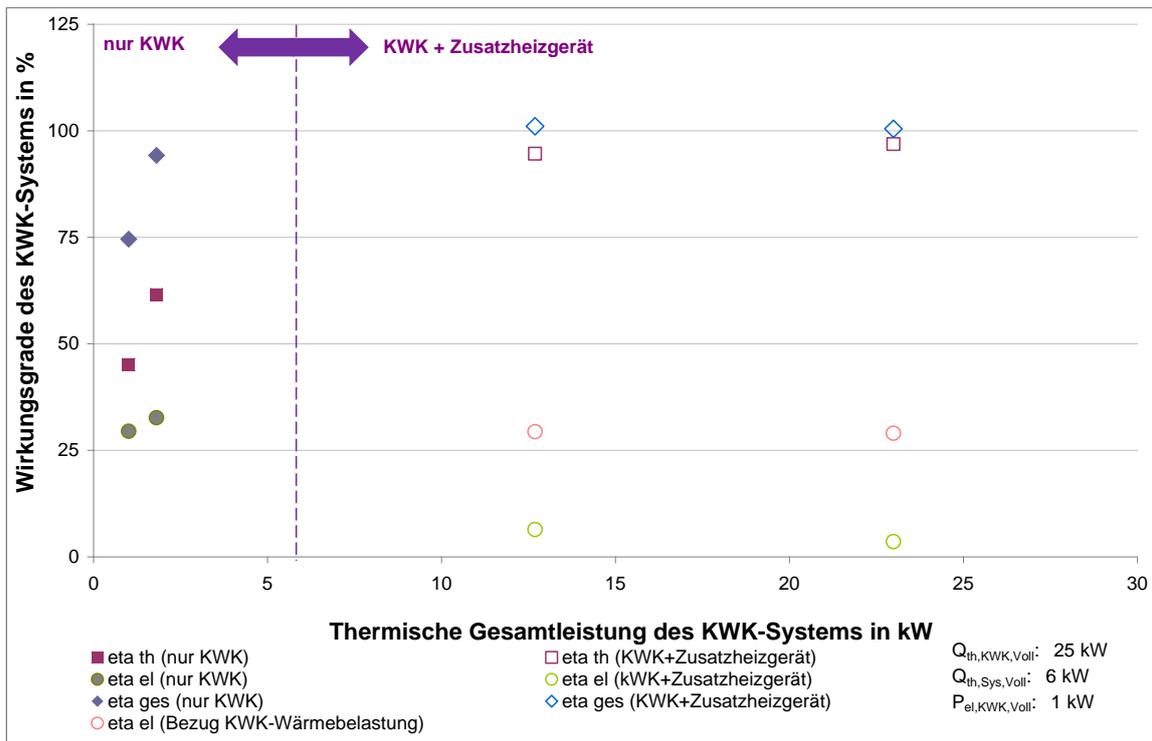


Abbildung 99: Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade „Galileo 1000N“

Tabelle 31: Kennfeldermittlung Galileo 1000N

Wirkungsgrade "Galileo 1000N"

Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte				
		1	2	3	4	
Vorlauftemperatur	$t_{vor}$	°C	49,8	49,7	49,7	50
Rücklauftemperatur	$T_{rück}$	°C	30,3	29,7	29,2	29,5
Abgastemperatur	$t_{Abgas}$	°C	31,4	31,1	39,4	55,3
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{CO_2,mess}$	%	4	4	7,5	8,4
CO gemessen	$r_{CO,mess}$	ppm	30	20	39	70
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{NO_x,mess}$	ppm	0	0	22	28
CO luftfrei	$r_{CO,luftfrei}$	ppm	88	59	62	99
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{NO_x,luftfrei}$	ppm	1	1	35	40
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{B,Ges}$	kW	2,2	2,9	13,4	23,7
Wärmebelastung KWK	$Q_{B,KWK}$	kW	2,2	2,9	2,9	2,9
Thermische Leistung	$Q_{th}$	kW	1,0	1,8	12,7	23,0
Elektrische Leistung	$P_{el}$	kW	0,7	1,0	0,9	0,9
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{th}$	%	<b>45,1</b>	<b>61,6</b>	<b>94,6</b>	<b>96,9</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{el,Ges}$	%	<b>29,5</b>	<b>32,7</b>	<b>6,4</b>	<b>3,6</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{el,KWK}$	%	<b>29,5</b>	<b>32,7</b>	<b>29,4</b>	<b>29,0</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{ges}$	%	<b>74,6</b>	<b>94,2</b>	<b>101,0</b>	<b>100,5</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{PE,KWK}$	1	<b>0,74</b>	<b>0,41</b>	<b>0,99</b>	<b>1,04</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	$PEE$	%	<b>9,1</b>	<b>25,8</b>	<b>15,4</b>	<b>13,0</b>

## Normnutzungsgradmessungen

In Anlehnung an DIN 4709 wurde der Normnutzungsgrad mittels eines 24-Stunden-Referenzlastprofils ermittelt. Bei konstanten Vorlauf- und Rücklauf-temperaturen von 50 °C bzw. 30 °C wurden der Heizwasserdurchfluss und damit die geforderte Heizleistung anhand des Lastprofils verändert.

Der Normnutzungsgrad wurde wie in Kapitel 4.3.1 erläutert ermittelt

Die Messwerte und der ermittelte Normnutzungsgrad sind in Tabelle 32 Normnutzungsgradermittlung System Galileo 1000N mit 500 l Pufferspeicher eingetragen. Durch die Bewertung mit Primärenergiefaktoren fiel der Normnutzungsgrad deutlich höher als der maximale Wirkungsgrad bei Lastpunkt 3 aus.

**Tabelle 32:** Normnutzungsgradermittlung System Galileo 1000N mit 500 l Pufferspeicher

Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "Galileo 1000N"

Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung 23
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	500
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	49
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30
Thermische Leistung KWK	$\dot{Q}_{th}$	kW	23
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	11
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	190
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	167
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	21
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>87,9</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>10,8</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>117,3</b>

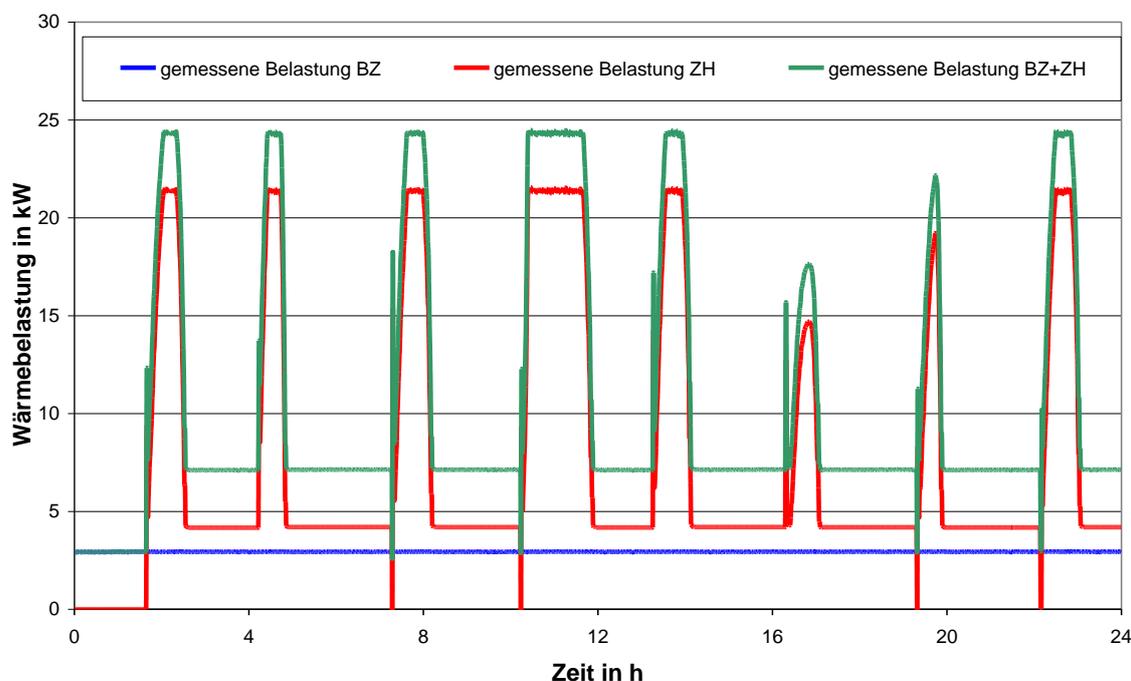
Die Brennstoffzelle lief während des 24-Stundenprofils durchgängig unter Volllast. Die elektrische Leistung (abzüglich des Eigenverbrauchs) lag abgesehen von kleinen Schwankungen nach unten bei ca. 0,85 kW analog zu Lastpunkt 4 bei den Wirkungsgradmessungen.

Die thermische Leistung folgte dem vorgegebenen Lastprofil. Direkt nach den Nulldurchgängen war die thermische Leistung kurzfristig erhöht. Der Puffer-

speicher wurde während des Nulldurchgangs geladen und die Mischereinheit mit Steuerung musste die erforderliche Temperatur erst einregeln.

Abbildung 100 zeigt, dass die Brennstoffzelle während der Messung unter Volllast lief. Die gemessene Belastung der Brennstoffzelle lag bei relativ konstant 3 kW (Volllast).

Bei Bedarf wurde der Zusatzheizer zugeschaltet. Die Belastungskurve des Zusatzheizers folgte bedingt durch den Pufferspeicher nicht unmittelbar dem Lastprofil. Bei geringer Anforderung wurde der Zusatzheizer auf kleine Leistung moduliert, sobald eine Wärmeanforderung auftrat, die nicht allein durch BZ und Pufferspeicher gedeckt werden konnte, stieg die Belastung des Zusatzheizgeräts abrupt auf Maximallast an.



**Abbildung 100:** Belastungsmessung des BZH Galileo 1000N während des 24-Stundenprofils der Normnutzungsgradmessung nach 4709

#### 4.6.2 Vaillant ecoPOWER 3.0

Das Mikro-KWK-System umfasste den ecoPOWER 3.0, eine 3-Wegemischer-einheit für den Pufferkreis (BHKW-Pufferspeicher), einen 500 l Heizwasserpufferspeicher der Fa. Wikora, eine 3-Wegemischereinheit für den Heizkreis zur Steuerung der Vorlauftemperatur bei Abfahren eines Lastprofils. Dieses System wurde ohne Zusatzheizgerät geliefert und betrieben, eine typische Installation würde wie bereits erwähnt ein Zusatzheizgerät vorsehen.

Die Ergebnisse der Kennfeldmessungen und der Normnutzungsgradbestimmung in Anlehnung an DIN 4709 wurden in den folgenden Tabellen und der Abbildung 101 zusammengefasst. In Tabelle 33 wurden insgesamt drei statisch gemessene Kennlinienpunkte von der Minimallast, einer mittleren Teillast und der Volllast zusammengefasst. Bei der Volllast wies das System den insgesamt höchsten elektrischen und Gesamtwirkungsgrad auf, der elektrische Wirkungsgrad sank bei Teillast etwas und bei Minimallast deutlicher ab. Insgesamt betrug die Abnahme von Volllast zu Minimallast in der elektrischen Effizienz weniger als 20 % und zeigte einen gut nutzbaren Modulationsbereich von 50 - 100 % des mit einem Synchrongenerator ausgestatteten ecoPOWER 3.0, der dementsprechend seltener takten muss. Des Weiteren fielen die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen von knapp über 12 Vol-% auf, die über dem theoretisch möglichen Wert für das Prüfgas G20 (Methan 2.5) lagen. Mögliche Ursachen könnten das Mitverbrennen von Motorenöl oder wahrscheinlicher eine interne CO<sub>2</sub>-Rezirkulation (EGR) sein. Die Primärenergieeinsparung übertraf bei Volllast (Prüfpunkt 3) die Anforderungen von 10 % an hocheffiziente KWK-Systeme nach der Richtlinie 2004/8/EG mit den harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerten aus dem Amtsblatt 2007/74/EG [KWKW], [KWKR] für den Fall vollständiger Einspeisung von Strom.

**Tabelle 33:** Kennfeldermittlung Vaillant ecoPOWER 3.0 nach dem Pufferspeicher

Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte			
		1	2	3	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	51,0	50,9	50,7
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	29,0	30,9	30,8
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	57,0	59,9	63,1
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2, \text{mess}}$	%	12,1	12,2	12,2
CO gemessen	$r_{\text{CO}, \text{mess}}$	ppm	104	76	146
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x, \text{mess}}$	ppm	28	82	26
CO luftfrei	$r_{\text{CO}, \text{luftfrei}}$	ppm	100	73	141
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x, \text{luftfrei}}$	ppm	27	80	25
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B}, \text{Ges}}$	kW	6,3	9,1	12,6
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B}, \text{KWK}}$	kW	6,3	9,1	12,6
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	4,0	5,6	7,9
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	1,2	2,0	2,9
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>64,3</b>	<b>61,9</b>	<b>63,1</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el}, \text{Ges}}$	%	<b>19,0</b>	<b>22,6</b>	<b>23,3</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el}, \text{KWK}}$	%	<b>19,0</b>	<b>22,6</b>	<b>23,3</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>83,3</b>	<b>84,5</b>	<b>86,4</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE}, \text{KWK}}$	1	<b>0,94</b>	<b>0,83</b>	<b>0,78</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	$PEE$	%	<b>9,1</b>	<b>12,8</b>	<b>14,9</b>

Da es als erstes Mikro-KWK-System für die Laboruntersuchungen in diesem Projekt zur Verfügung stand, wurden beim Messen des Lastprofils nach der ebenfalls neuen Prüfnorm DIN 4709 folgende Erfahrungen gemacht:

Die Steuerung der Mischer erfolgte bei den ersten Messungen durch den ecoPOWER 3.0, wobei beim Messen des Lastprofils nach DIN 4709:2010 remanente Schwingungen um bis zu  $\pm 15$  °C bei der Vorlauftemperatur von 50 °C des Heizkreises nach Phasen keiner Wärmeanforderung auftraten. Der Volumenstrom im Heizkreis wurde während der Phasen ohne Wärmeanforderung auf 0 m<sup>3</sup>/h reduziert, an den Temperaturverläufen der Vorlauf- und Rücklauffühler war erwartungsgemäß Wärmediffusion erkennbar. Beim Anfahren der Umwälzpumpe für Nennwärmebelastungen von 30 % bzw. 48 % traten dann die erwähnten periodischen Temperaturschwingungen auf. Dieses Problem wurde von der Prüfstelle durch eine Ansteuerung des Heizkreismischers über die Prüfstandssoftware mit angepasstem Regler gelöst. Alternativ könnte ein kleiner

dimensionierter Mischer mit niedrigeren  $K_{vs}$ -Werten bereits eine Verbesserung bewirken.

**Tabelle 34:** Normnutzungsgradermittlung des Vaillant ecoPOWER 3.0 mit 500 l Pufferspeicher

Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung 7,9
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	500
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	49,7
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	29,0
Thermische Leistung KWK	$\dot{Q}_{th}$	kW	7,9
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	2,9
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	100,0
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	136,5
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	61,3
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	28,0
<hr/>			
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>44,9</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>20,5</b>
<b>Gesamtnormnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>100,8</b>

Die Ergebnisse für die Messung des Normnutzungsgrads für Heizzwecke wurden in Tabelle 34 und neben den Wirkungsgraden in der Abbildung 101 zusammengefasst. Der Gesamtnormnutzungsgrad ohne primärenergetische Bewertung berechnete sich zu 65,4 %, durch die primärenergetische Bewertung nach der DIN 4709 ergab sich eine Erhöhung auf 100,8 %. Die Ursachen für diese relativ niedrigen Werte beim Gesamt-Normnutzungsgrad gegenüber den anderen Systemen lagen in dem hohen 100 % Anteil des Gasmotors bei der Wärmeerzeugung und der Natur des Zapfprofils. Über die 24 h wurde dem System eine mittlere Nennwärmeleistung von 30,1 % nach der DIN 4709 abgefordert, die im Fall dieses Systems ohne Zusatzheizgerät Teillast- und Taktbetrieb nach sich zog. Das System passte sich an die wechselnden Wärmeanforderungen mit dem 500 l-Wärmespeicher und über die Belastung an, die Ausnutzung des Modulationsbereichs und Taktbetrieb war erforderlich, wie es die Abbildung 102 zeigt. Insgesamt zeigte der Gesamtnormnutzungsgrad ohne primärenergetische Bewertung von 65,4 % eine sehr eingeschränkte Eignung der Messmethodik in

diesem Fall auf, die eine deutlich über die Messunsicherheit hinausgehende Bilanzierungslücke der Energie aufzeigt.

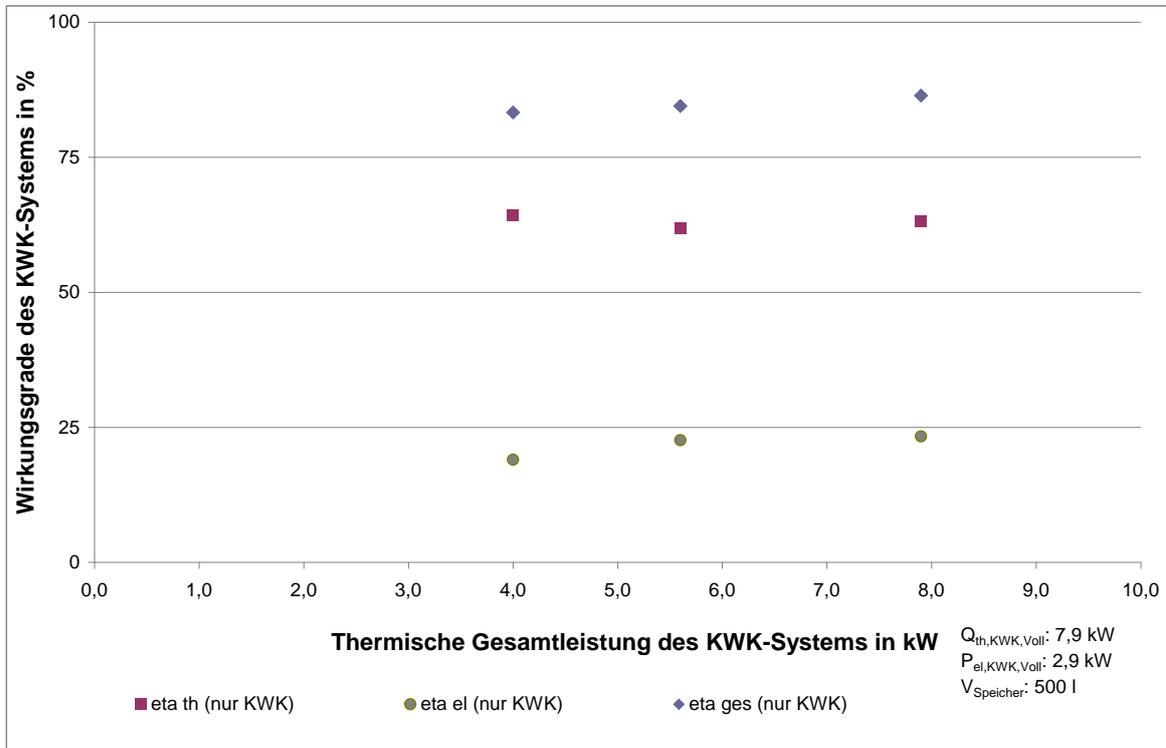
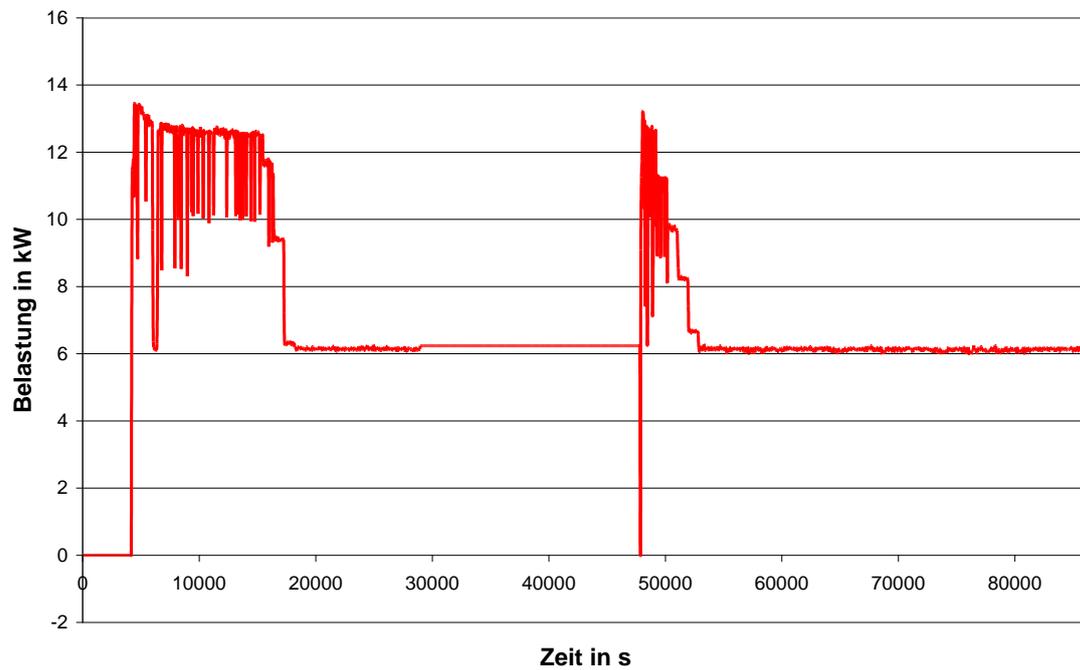


Abbildung 101: Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465



**Abbildung 102:** Verlauf der Belastung beim ecoPOWER 3.0 während des Lastprofils in Anlehnung an DIN 4709

### 4.6.3 Senertec Dachs Stirling SE

Der Senertec Dachs Stirling SE wurde vom Hersteller auf mehreren Paletten geliefert und durch das Prüflabor nach schriftlicher Anleitung aufgebaut. Das System hat einen integrierten 530 l Kombispeicher und wurde mit der vom Prüfstand gesteuerten Mischereinheit heizkreisseitig an den Prüfstand angeschlossen. Der Wärmespeicher ist als Schichtenspeicher mit internen Rohrwendeln aufgebaut und trennt hydraulisch das Heizgerät vom Heizkreis. Alle Einstellungen am Heizgerät erfolgten durch die integrierte Steuerungseinheit MSR-S in Absprache mit Senertec. Gemäß der Information von Senertec wurde das Gerät als nicht einstellbares System mit zwei Lastpunkten 100 % Stirling ohne Zusatzheizgerät und 100 % Stirling mit 100 % Zusatzheizgerät vermessen.

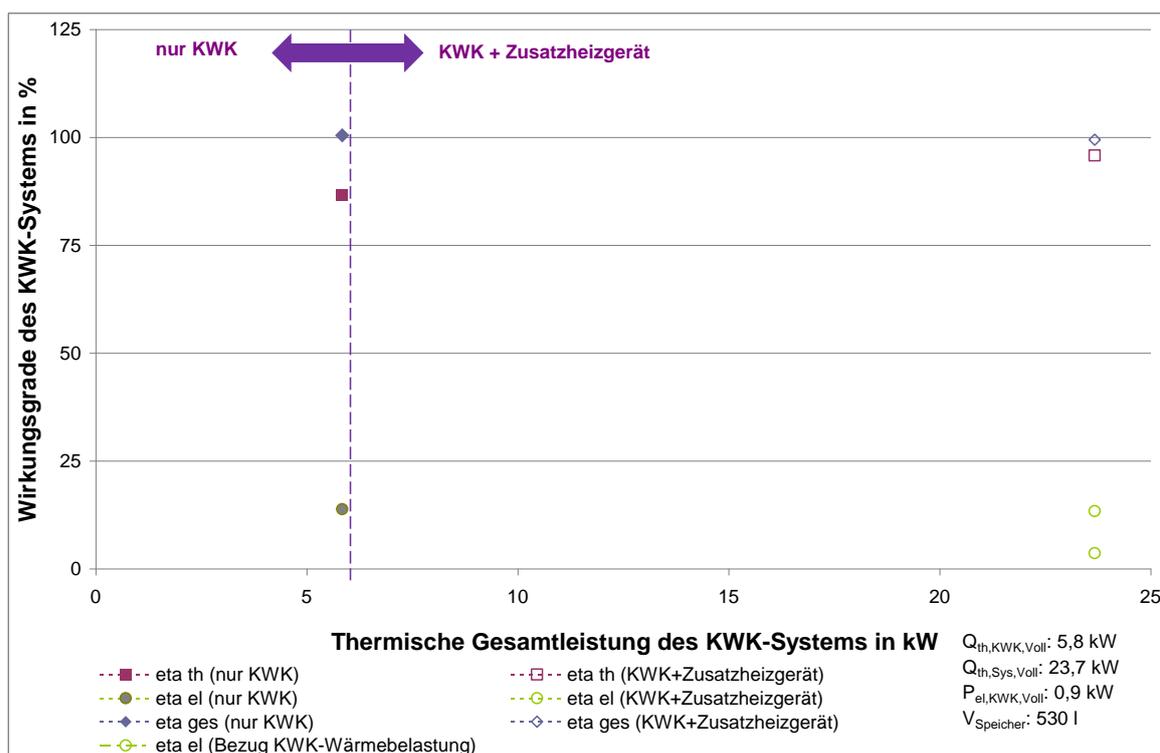
Die Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen sind in Tabelle 35 und in Abbildung 103 aufgeführt und decken sich trotz der Messung zwischen Pufferspeicher und Heizkreis gut mit den Herstellerangaben. Für beide Lastpunkte konnte nachgewiesen werden, dass der Senertec Dachs Stirling die Hocheffizienzanforderung erfüllt.

**Tabelle 35:** Kennfeldermittlung Senertec Dachs Stirling SE nach dem Pufferspeicher

Wirkungsgrade "Senertec Dachs Stirling SE"

Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte		
		1	2	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	49,3	50,2
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	29,6	29,5
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	47,7	49,0
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2, \text{mess}}$	%	8,4	8,8
CO gemessen	$r_{\text{CO}, \text{mess}}$	ppm	19,9	56,7
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x, \text{mess}}$	ppm	16,1	21,7
CO luftfrei	$r_{\text{CO}, \text{luftfrei}}$	ppm	28	76
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x, \text{luftfrei}}$	ppm	23	29
Wärmebelastung Gesamtsystem	$Q_{\text{B}, \text{Ges}}$	kW	6,74	24,7
Wärmebelastung KWK	$Q_{\text{B}, \text{KWK}}$	kW	6,74	6,74
Thermische Leistung	$Q_{\text{th}}$	kW	5,84	23,67
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,933	0,903
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>86,6</b>	<b>95,8</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el}, \text{Ges}}$	%	<b>13,8</b>	<b>3,7</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el}, \text{KWK}}$	%	<b>13,8</b>	<b>13,4</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>100,5</b>	<b>99,5</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE}, \text{KWK}}$	<b>1</b>	<b>0,85</b>	<b>1,05</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	%	<b>19,6</b>	<b>12,2</b>

Zur Normnutzungsgradmessung wurde eine Heizkurve nach Herstellervorgabe eingestellt, da eine direkte Regelung nach der Vorlauftemperatur nicht vorgesehen war. Bei Wiederholung der Messungen ließen sich die Normnutzungsgrade auf ca. 1,5 % reproduzieren, in Tabelle 35 ist das bessere zweite Messergebnis dargestellt.



**Abbildung 103:** Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465

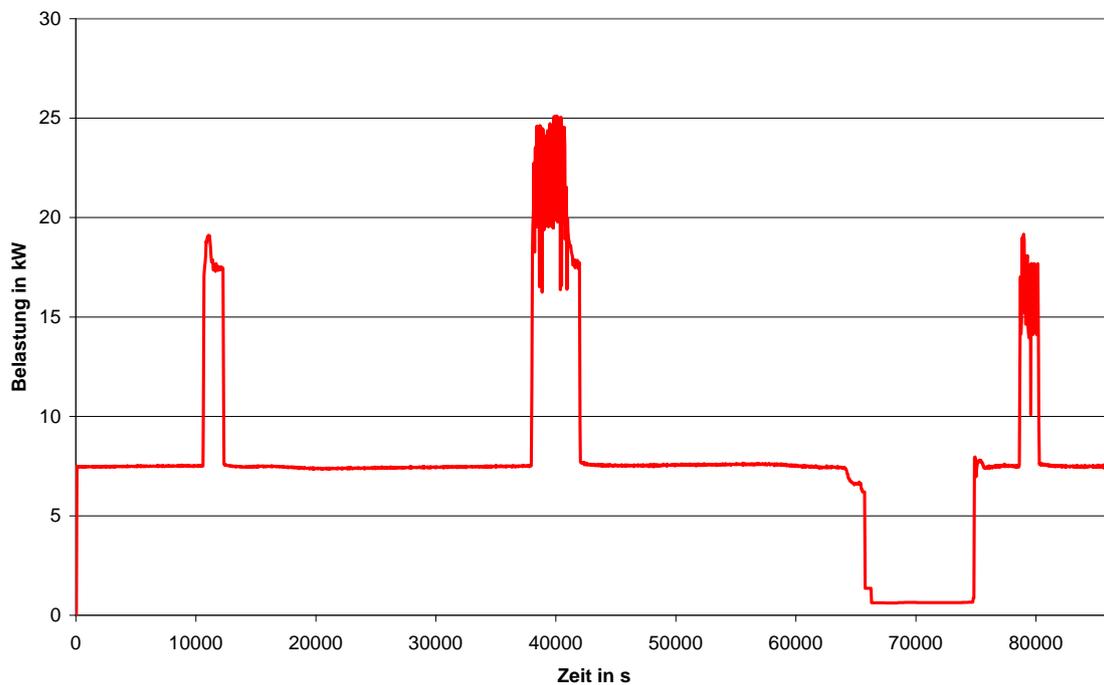
Bei genauerer Betrachtung der aufgezeichneten Daten u.a. in Abbildung 104 fällt auf, dass das Lastprofil für den Senertec Dachs Stirling SE eine Laufzeit der Stirling-Einheit von ca. 88 % nach sich zieht. Linear hochgerechnet auf eine 6-monatige Heizperiode bedeutete dies eine Laufzeit von 3860 h und eine Wärmemenge von über 25.000 kWh. Im Diagramm in Abbildung 104 über die Belastung zeigte das System auch die Fähigkeit zu modulieren<sup>15</sup>, da neben den Belastungsniveaus von ca. 7 kW der Stirling-Einheit, der Gesamtbelastung von 23,7 kW ein weiteres Niveau bei ca. 18 kW auftrat.

<sup>15</sup> Diese Modulation war aber lt. Hersteller nicht einstellbar. Evtl. wird die Einstellbarkeit im Regler bzw. in einer Vorbereitung befindlichen PC-Software nachgepflegt.

**Tabelle 36:** Normnutzungsgradermittlung des Senertec Dachs Stirling SE

Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "Senertec Dachs Stirling SE"

Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung 23,7
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	530
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	50,2
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	29,5
Thermische Leistung KWK	$\dot{Q}_{th}$	kW	5,84
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	0,93
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	24,6
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	185,5
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	160,9
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	19,3
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>86,7</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>10,4</b>
<b>Gesamtnormnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>115,1</b>



**Abbildung 104:** Verlauf der Belastung während des Lastprofils nach der DIN 4709

#### **4.6.4 Baxi Innotech Gamma 1.0**

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die PEM-Brennstoffzelle als letztes System von der Forschungsstelle vermessen. Das System bestand aus der Baxi Innotech Gamma 1.0 mit integriertem Zusatzheizgerät mit einer thermischen Leistung von maximal 17,8 kW, angeschlossen war es an einen 700 l-Kombispeicher des Herstellers. Die hydraulische Verschaltung erfolgte nach Vorgabe des Herstellers. Die Heizwasserschaltung lief dabei immer durch das Zusatzheizgerät, das die interne Heizkreispumpe regelte und sich nicht standardmäßig deaktivieren ließ. Als Besonderheit war die Steuerung aus Einstellungen vor Ort und den Ferneingriffen über eine Drahtlos-Internet-Verbindung. Zur Kennlinienmessung nur der Brennstoffzelleneinheit wurde in Absprache mit dem Hersteller das Zusatzheizgerät durch Lösen einer Steckverbindung deaktiviert (so konnte das Ausbleiben des Brenners im Zusatzheizgerät zu 100 % sichergestellt werden). Für normkonforme Messungen nach der prEN 50465 sollte der Hersteller hier eine Ausschaltfunktion über den Regler oder als Schalter vorsehen.

Das Baxi Innotech Brennstoffzellenheizgerät befand sich während der Untersuchungen noch in der Feldtestphase, die Angabe zur Markteinführung wurde in 2011 auf 2014 terminiert. Wegen dem großen Speicher wurden aus Zeitgründen keine Teillastmessungen im reinen Brennstoffzellenbetrieb gefahren, da hier der zeitliche Aufwand zur Einstellung stationärer Bedingungen unverhältnismäßig groß wurde.

Qualitativ zeigte sich bei den Versuchen, dass auch im unteren Teillastbereich bei ca. 1 kW thermischer Leistung noch eine elektrische Leistung von 300 - 400 W vorlag. Für alle Prüfpunkte wurde die Hocheffizienzanforderung erfüllt.

**Tabelle 37:** Kennfeldermittlung Baxi Innotech Gamma 1.0 nach dem Pufferspeicher

Wirkungsgrade "Baxi Innotech Gamma 1.0"

Bezeichnung	Einheit	Prüfpunkte			
		1	2	3	
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	50,1	50,3	50,3
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	31,7	30,0	30,5
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	47,1	42,0	46,0
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	7,3	8,1	8,5
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	7	6	16
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	2	10	19
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{luftfrei}}$	ppm	10	8	23
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{luftfrei}}$	ppm	3	14	26
Wärmebelastung Gesamtsystem	$\dot{Q}_{\text{B,Ges}}$	kW	3,3	10,5	17,8
Wärmebelastung KWK	$\dot{Q}_{\text{B,KWK}}$	kW	3,3	3,3	3,4
Thermische Leistung	$\dot{Q}_{\text{th}}$	kW	1,7	9,7	17,5
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	1,00	0,92	0,88
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>52,7</b>	<b>92,7</b>	<b>98,5</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>30,6</b>	<b>8,8</b>	<b>5,0</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>30,6</b>	<b>27,6</b>	<b>26,1</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>83,3</b>	<b>101,5</b>	<b>103,5</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	<b>1</b>	<b>0,58</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	%	<b>17,2</b>	<b>17,2</b>	<b>16,4</b>

Auch hier deckten sich die Wirkungsgradmessungen, siehe Tabelle 37 und Abbildung 105, relativ gut mit den Herstellerangaben bis auf die thermische Leistung bei reinem KWK-Betrieb, die selbst bei mehreren Messungen etwas geringer als erwartet ausfiel. Ursache hierfür konnten trotz guter thermischer Isolierung vor allem Wärmeverluste über den Kombispeicher, die längere Rohrleitung zu und durch den deaktivierten Zusatzheizkörper sein, da nicht direkt am Ausgang der Brennstoffzelleneinheit gemessen wurde. Auf sehr niedrigem Niveau bewegten sich die Emissionswerte von CO und NO<sub>x</sub> im Brennstoffzellenbetrieb,

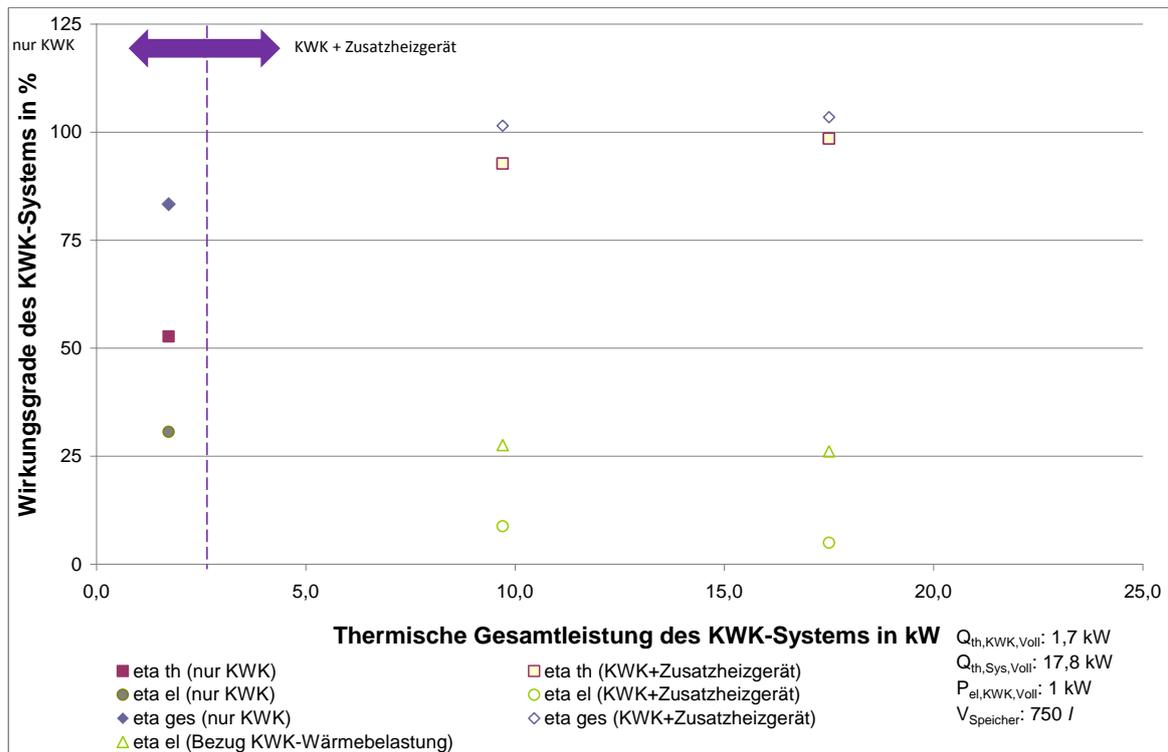
die unter den dem Brennwertkessel vergleichbarem Stirling lagen und deutlich die Emissionswerte des Gas-Ottomotors unterschritten. Der elektrische Wirkungsgrad von 30,6 % lag etwas unter den Herstellerangaben von 32 %<sup>16</sup> und konnte durch die lange Standzeit der Brennstoffzelle vor Beginn der Messungen und unterschiedliche Messpunkte, z. B. ohne bzw. mit internen Verbrauchern oder vor/nach der Umwandlung in netzkornformen Strom, bedingt sein.

**Tabelle 38:** Normnutzungsgradermittlung der Baxi Innotech Gamma 1.0 mit 700 l Kombispeicher

Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "Baxi Innotech Gamma 1.0"

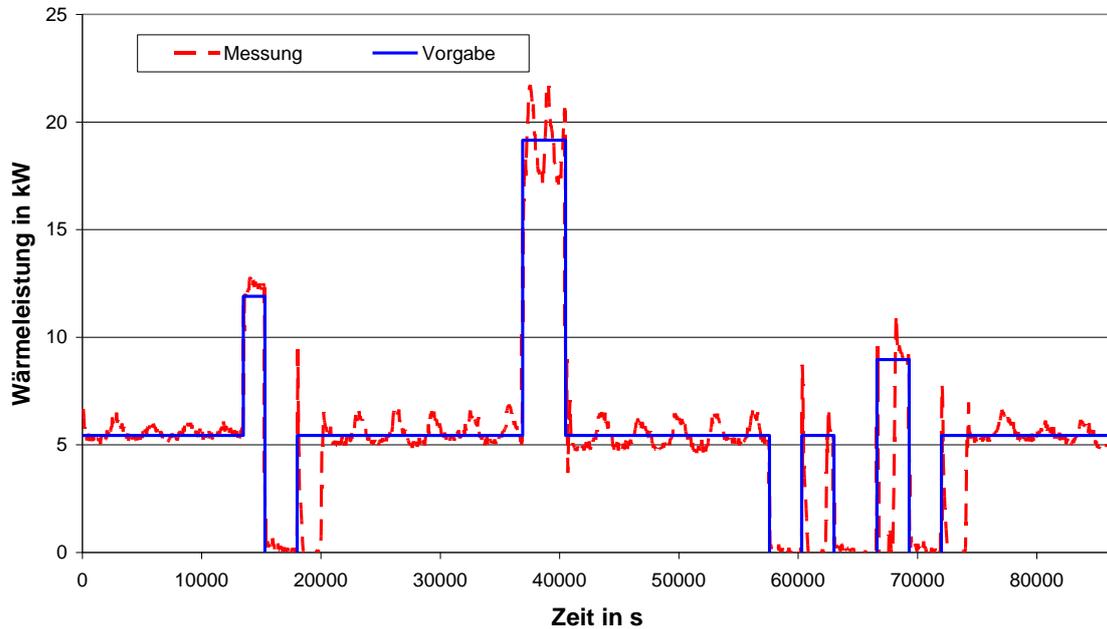
Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung 17,8
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	750
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	49,5
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	30,4
Thermische Leistung KWK	$\dot{Q}_{th}$	kW	1,7
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	9,6
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	177,5
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	133
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	23,4
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>74,9</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>13,2</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>110,8</b>

<sup>16</sup> Borchers, D.; *Mikro-KWK der Zukunft – Entwicklungsstand des PEM Brennstoffzellenheizgerätes Gamma 1.0*; DBI Fachforum Leipzig 2011, (34 % nach Gehlert, G.; *Zukunftsweisende KWK Technologie für Haushalte*; TGA Symposium Köln 2010)

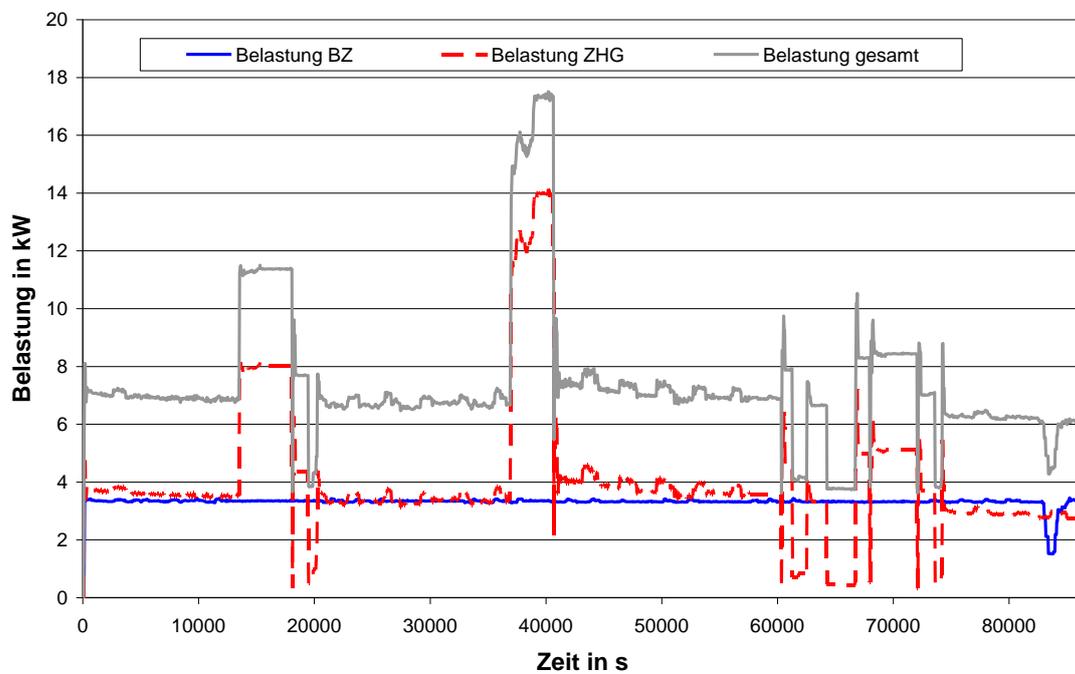


**Abbildung 105:** Wirkungsgrade in Anlehnung an prEN 50465

Die Messung des Normnutzungsgrades in Anlehnung an die DIN 4709 gestaltete sich zeitaufwändig und zeigte qualitativ ähnliche Messwertverläufe wie bei der Messung des Senertec Dachs Stirling SE. Die Oszillationen der thermischen Leistung in Abbildung 106 waren etwas ausgeprägter als bei der Vermessung des Stirlings, grundsätzlich war aber auch die Durchführbarkeit der Messungen nach der DIN 4709 mit mehreren Versuchen gegeben. Die Brennstoffzelle lief fast ununterbrochen auf Vollast, die kurzzeitige Belastungsabnahme bei ca. 83.000 s in Abbildung 107 rührte von einem Selbsttest der Brennstoffzelle, der alle 24 h automatisch durchgeführt wurde. Der Normnutzungsgrad lag bei ungefähr 111 %.



**Abbildung 106:** Verlauf der thermischen Leistung während des Lastprofils in Anlehnung nach DIN 4709



**Abbildung 107:** Verlauf der Belastung während des Lastprofils in Anlehnung an DIN 4709

## 4.7 Messergebnisse DBI

Im Rahmen des Projektes wurden am DBI ein ottomotorisch betriebenes KWK-System, das microBHKW L 4.12 der Fa. Kirsch GmbH, zwei Stirlingsysteme, der WhisperGen der Fa. Efficient Home Energy S.L. (EHE) und das eVita 25s der Fa. Remeha, sowie das SOFC-Brennstoffzellensystem BlueGen der Fa. Ceramic Fuel Cells GmbH vermessen. Alle vier Geräte wurden monovalent betrieben. An allen Systemen wurden Kennfeldmessungen an den einstellbaren Arbeitspunkten der Geräte durchgeführt. Die Ermittlung von Normnutzungsgraden in Anlehnung an die DIN 4709 erfolgte durch Abfahren des Prüfprofils beim WhisperGen. Beim BlueGen-Brennstoffzellensystem konnte auf Grund der sehr geringen thermischen Leistung des Gerätes (< 1 kW in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung und der Rücklauftemperatur des hydraulischen Kreises) keine Ermittlung des Normnutzungsgrades gemäß der DIN 4709 erfolgen.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem der aufwendige Prüfstandversuch zur Ermittlung des Normnutzungsgrades simuliert werden soll. Das Ziel bestand darin, die Ergebnisse der Modellierung anhand der Lastprofilmessung an einem Gerät zu validieren und danach auf andere KWK-Geräte anwenden zu können.

### 4.7.1 Berechnungsmodell gemäß DIN 4709

Neben der Verringerung des Prüfaufwandes bestand das Ziel der Entwicklung eines Berechnungsmodells darin, die bei der Messung auftretenden Fehlerquellen zu minimieren.

#### 4.7.1.1 Modellentwicklung

Für das Berechnungsmodell wurden die Randbedingungen aus DIN 4709 übernommen. Um eine möglichst realistische Simulation durchführen zu können, müssen von dem zu vermessenden KWK-Gerät das Kennlinienfeld sowie das dynamische Verhalten gemessen bzw. ermittelt werden.

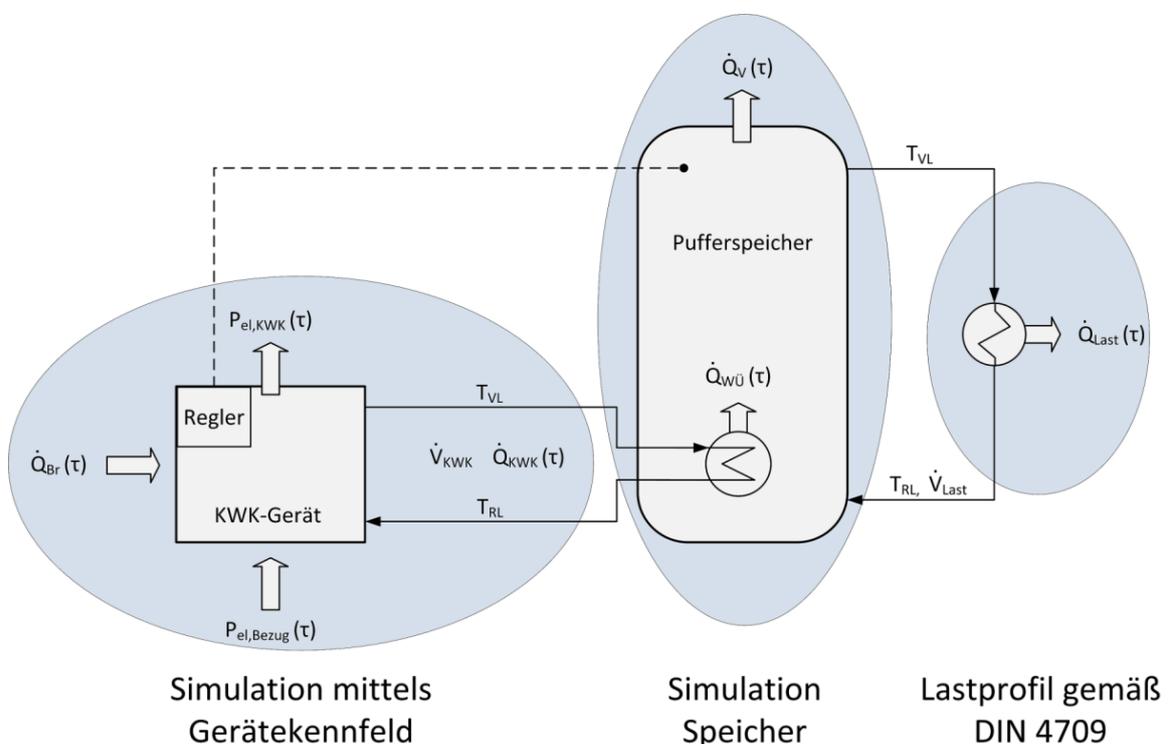
Dazu müssen folgende Messungen am Gerät durchgeführt werden:

- Start- und Stoppverhalten,
- Lastwechsel

- Messung der Wärmebelastung, Strombezug /-einspeisung, Wärmeleistung
- Dauer bis zu stationären Betriebsbedingungen
- Regelungsverhalten des KWK-Gerätes (Ein-, Ausschaltpunkte)
- Vermessung des stationären Betriebes (Kennfeldmessung)

Des Weiteren muss bei Verwendung eines Pufferspeichers die dazugehörige Geometrie in das Berechnungsmodell implementiert werden. Das Lastprofil wird dann gemäß der DIN 4709 aus dem Pufferspeicher gezogen.

Um den Pufferspeicher in einer Simulation abbilden zu können, wurden zunächst Vereinfachungen getroffen. Die Berechnung beruht auf einem eindimensionalen Temperaturfeld, der Pufferspeicher ist daher in gleich große horizontale Elemente aufgeteilt. Bei der Modellbildung wurde berücksichtigt, dass zwei unterschiedliche Transportmechanismen (Stofftransport und Wärmetransport) vorliegen. Durch die Zusammenführung der Daten aus der Messung des KWK-Gerätes und der Simulation können die Taktraten des Gerätes und die Normnutzungsgrade berechnet werden. Die Abbildung 108 zeigt einen Überblick über das Berechnungsmodell und die benötigten Messdaten.

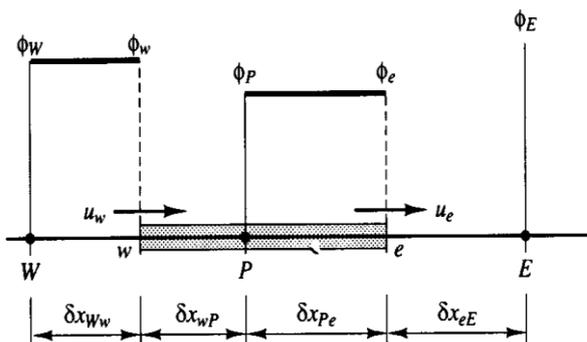


**Abbildung 108:** Überblick der einzufügenden Daten in das Berechnungsmodell

Zur Modellierung des Pufferspeichers wurde folgende allgemeine Differentialgleichung (DGL) verwendet:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Speicherterm}} + \underbrace{\text{div}(\rho u \phi)}_{\text{Konvektionstern}} = \underbrace{\text{div}(\Gamma \text{grad}\phi)}_{\text{Diffusionstern}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Quellstern}} \quad [4.1]$$

Um die Differentialgleichung zu diskretisieren, wird die Finite-Volumen-Methode genutzt. Das Berechnungsgebiet wird dabei so in mehrere Volumenelemente geteilt, dass jeder Punkt eines zuvor generierten Gitters von einem Volumenelement, auch Kontrollvolumen genannt, umgeben wird. Die Bezeichnung der nebeneinander liegenden Gitterpunkte erfolgt dabei anhand der Kompassnotation. Somit ist P der betrachtete Punkt welcher zwischen dem West- (W) und dem Ost-Nachbarpunkt (E) liegt. Die Bezeichnungen w und e beschreiben die West- und Ost-Begrenzungen (Wände) des Kontrollvolumens [s. Abbildung 109].



**Abbildung 109:** Eindimensionale Finite-Volumen-Methode nach Upwind-Schema

Die Differentialgleichung 4.1 wird nun über das Kontrollvolumen (KV) und über das Zeitintervall integriert. Dabei erfolgt aus den gegebenen Temperaturwerten  $\phi = T$  zur Zeit  $t$  die Berechnung der gesuchten Temperaturwerte zum Zeitschritt  $t + \Delta t$  (s. DGL [4.2]).

$$\int_{KV} \left( \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dt \right) dV + \int_t^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_A n(\rho u \phi) dA \right) dt = \int_t^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_A n(\Gamma \text{grad}\phi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{KV} S_\phi dv dt \quad [4.2]$$

Das entwickelte Modell soll zunächst an den konkreten Versuchsaufbau des WhisperGen angepasst werden. Dazu werden vom Pufferspeicher und vom KWK-Gerät die erforderliche Geometrie, Stoff- und Regelungsbedingungen benötigt. Für den konkreten Einsatzfall wurden folgende Daten verwendet:

### **Geometrie Parameter des Pufferspeichers (PS)**

$l=1,85$ m	Höhe des PS
$d=0,79$ m	Durchmesser des PS
$length\_T\_o=0,369$ m	Abstand Einlauf zu oberen Temperatur-Sensor
$length\_T\_u=0,969$ m	Abstand Einlauf zu unteren Temperatur-Sensor

### **Thermodynamische Stoffparameter (Wasser)**

Die Stoffparameter werden als konstant angenommen, da sie sich im Temperaturbereich des Pufferspeichers nur geringfügig ändern. Es werden Stoffparameter bei einer Temperatur von 66 C verwendet.

$\rho = 980$ kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$c_p = 4186$ J/(kg*K)	Wärmekapazität
$k = 0,66$ W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit

### **Randbedingungen**

$V\_ = 500$ l/h	Volumenstrom KWK-Gerät in Pufferspeicher
$T_A = 66,0$ °C	Einlauftemperatur in Pufferspeicher
$T\_aus = 56$ °C	Ausschaltpunkt KWK-Gerät $T\_unten$
$T\_ein = 50$ °C	Einschaltpunkt KWK-Gerät $T\_oben$

Die Durchströmgeschwindigkeit  $u$  des Heizwassers (KWK) durch den Pufferspeicher wurde wie folgt berechnet:

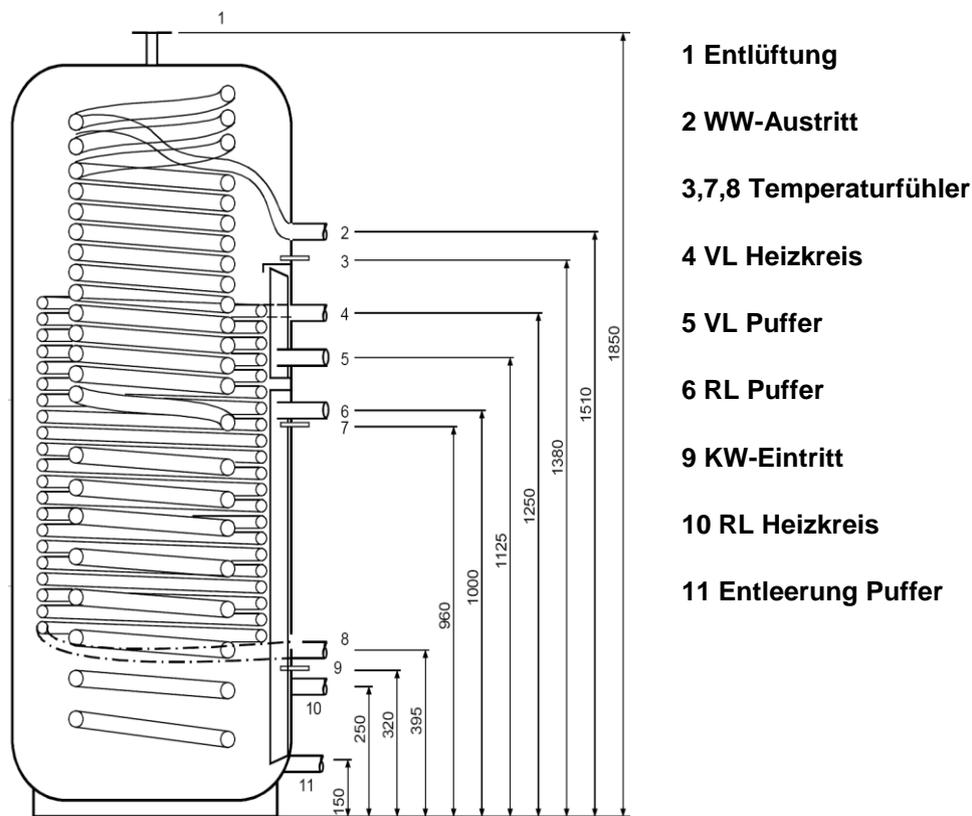
$$u = \frac{Vdot}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,25\pi \cdot d^2} \quad [4.3]$$

**Numerische Parameter**

$n_x = 300.000$  Knotenanzahl

$dt = 10\text{ s}$  Zeitschrittweite

Ein Schnittbild des verwendeten Kombispeichers zeigt die Abbildung 110.



**Abbildung 110:** Schnittansicht Kombispeicher

Für die Berechnung des Pufferspeichers wird, wie bereits erwähnt, der eindimensionale Fall angenommen. Damit ergibt sich das vergleichsweise einfache Modell der idealen instationären Pfropfenströmung mit Konvektion und Diffusion. Der Konvektions- und Diffusionsterm wird nach dem Upwind-Schema diskretisiert. Die Zeitabhängigkeit wird vollständig implizit gelöst, wodurch bei

jeglichen Zeitschritten eine gute Konvergenz gewährleistet ist. Es ergibt sich die DGL [4.4], wobei S für die Wärmeauskopplung steht.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + S \quad [4.4]$$

Hieraus kann die Diskretisierungsgleichung für die einzelnen Knoten in verallgemeinerter Form (s. DGL [4.5]) ermittelt werden.

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_e\phi_e + a_p^0\phi_p^0 + S_u \quad [4.5]$$

mit

$$a_p = a_w + a_e + a_p^0 + (F_e - F_w) - S_p$$

$$a_p^0 = \frac{\rho\Delta x}{\Delta t}$$

In der Tabelle 39 sind die Koeffizienten und in der Tabelle 40 die Konvektions- und Diffusionskoeffizienten der DGL [4.5] aufgelistet.

**Tabelle 39:** Koeffizienten der Differentialgleichung

Knoten	$a_w$	$a_e$	$S_p$	$S_u$
erster	0	$D_e + \frac{D_A}{3}$	$-\left(\frac{8}{3}D_A + F_A\right)$	$\left(\frac{8}{3}D_A + F_A\right)\phi_A + \frac{1}{8}F_e(\phi_p - 3\phi_e)$
zweiter	$D_w + F_w$	$D_e$	0	$\frac{1}{8}F_w(3\phi_p - \phi_w)$ $+ \frac{1}{8}F_e(\phi_w + 2\phi_p - 3\phi_e)$
Feld 1	$D_w + F_w$	$D_e$	0	$\frac{1}{8}F_w(3\phi_p - 2\phi_w - \phi_{ww})$ $+ \frac{1}{8}F_e(\phi_w + 2\phi_p - 3\phi_e)$
Feld 2	$D_w + F_w$	$D_e$	0	$\frac{1}{8}F_w(3\phi_p - 2\phi_w - \phi_{ww})$ $+ \frac{1}{8}F_e(\phi_w + 2\phi_p - 3\phi_e) + Source$
letzter	$D_w + F_w$	0	0	$\frac{1}{8}F_w(3\phi_p - 2\phi_w - \phi_{ww})$

**Tabelle 40:** Konvektions- und Diffusionskoeffizienten

<i>Face</i>	<i>w</i>	<i>e</i>
<i>F</i>	$(\rho u)_w$	$(\rho u)_e$
<i>D</i>	$\frac{k_w}{c_P \cdot \Delta x_{WP}}$	$\frac{k_e}{c_P \cdot \Delta x_{PE}}$

Um das Lastprofil gemäß DIN 4709 in die Modellierung einbinden zu können, müssen 2 Felder innerhalb der Wärmeübertrager berechnet werden. Das in Tabelle 39 bezeichnete Feld 1 beschreibt dabei die Koeffizienten, wenn kein Lastprofil und das Feld 2 wenn ein Lastprofil aus dem Pufferspeicher gezogen wird. Dabei steht „Source“ für das angepasste Zeitprofil für den WhisperGen nach Tabelle 41 [DIN 4709].

**Tabelle 41:** Lastpunkte nach DIN 4709 für Mikro-KWK-Gerät

Lastpunkt	Laufzeit [h]	Anteil [%]	Lastpunkt der Nennwärmeleistung [kW]	Heizwasser- volumenstrom [l/h]	Wärmemenge [kWh]
1	3,75	30	3,60	155,34	13,50
2	0,5	63	7,56	326,21	3,78
3	0,75	0	0	0	0
4	5,25	30	3,60	155,34	18,90
5	1	100	12,00	517,80	12,00
6	4,75	30	3,60	155,34	17,10
7	0,75	0	0	0	0
8	0,75	30	3,60	155,34	2,70
9	1	0	0	0	0
10	0,75	48	5,76	248,54	4,32
11	0,75	0	0	0	0
12	4	30	3,60	155,34	14,40

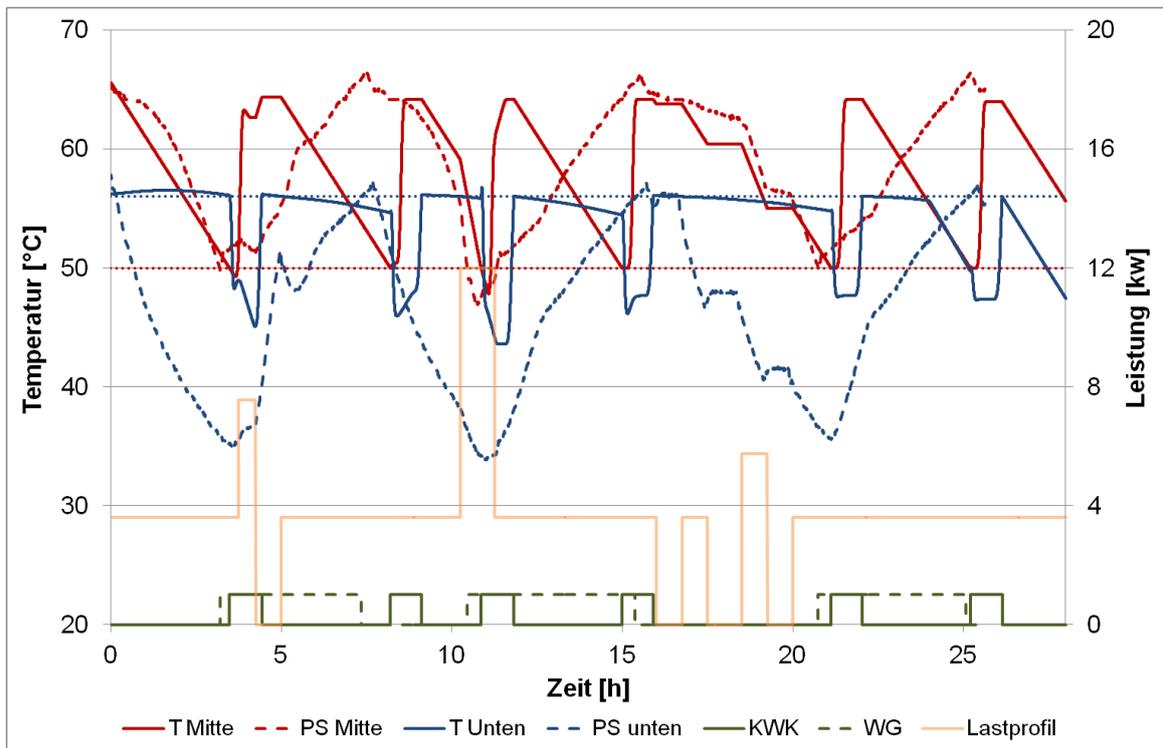
Das allgemein verwendete Formelzeichen  $\phi$  beschreibt im Berechnungsmodell die Temperatur T an dem jeweiligen Ort. Die Koeffizienten der Diskretisierungsgleichung müssen aufgrund des taktenden KWK-Gerätes zweimal berechnet werden. Einmal für den Fall, dass das KWK-Gerät aus ist und somit die

Durchströmgeschwindigkeit durch den Pufferspeicher gleich null ist und für den anderen Fall, dass die Geschwindigkeit größer null und damit das KWK-Gerät eingeschaltet ist. Als weitere Vereinfachung wird angenommen, dass die Eintrittstemperatur in den Speicher immer 66 °C beträgt, welche auch anliegt, wenn das KWK-Gerät ausgeschaltet ist. Diese Annahme wurde getroffen, da sich die Temperatur oberhalb des Einlaufes in den Wärmespeicher durch fehlende Wärmeabnahme nur im geringen Maße verändert und sich an diesem Ort ein Warmwasserreservoir für die nicht benutzte Warmwasseraufbereitung befindet (s. Abbildung 110). Die Ein- und Ausschaltpunkte der Regelung des WhisperGen wurden ebenfalls in das Modell integriert.

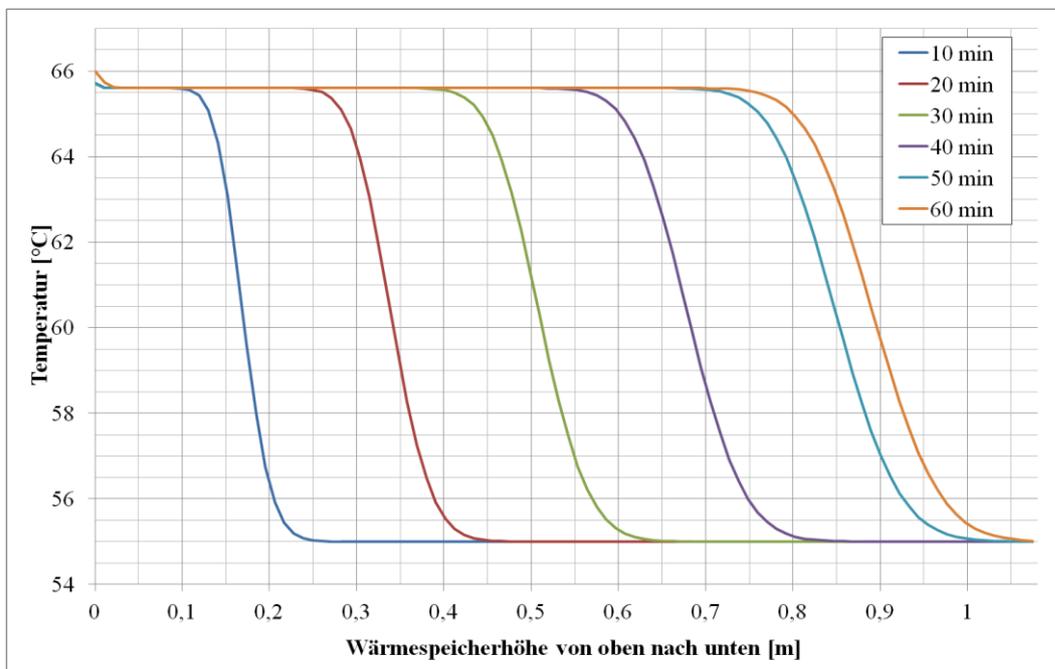
Die aufgestellten Randbedingungen und Gleichungen für das Modell wurden mit der Software Matlab entwickelt und berechnet.

#### **4.7.1.2 Vergleich der Simulation mit den Messungen am Prüfstand**

In der Abbildung 111 sind die ersten Ergebnisse der Simulation dargestellt. Es ist gelungen, das dargestellte Modell der idealen Pfropfenströmung in einem Berechnungsmodell abzubilden. Die Pfropfenströmung bewirkt allerdings einen steilen Temperaturgradienten im Modell des Wärmespeichers, welcher durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die hohe Wärmekapazität des Wassers verstärkt wird. Dies ist in Abbildung 112 daran zu erkennen, dass sich bei eingeschaltetem KWK-Gerät eine Warmwasserschicht durch den Speicher schiebt und dabei große Temperaturgradienten auftreten. Im Vergleich zur realen Messung nach DIN 4709 stimmten die berechneten Gradienten im Modell nicht überein (s. Abbildung 111).



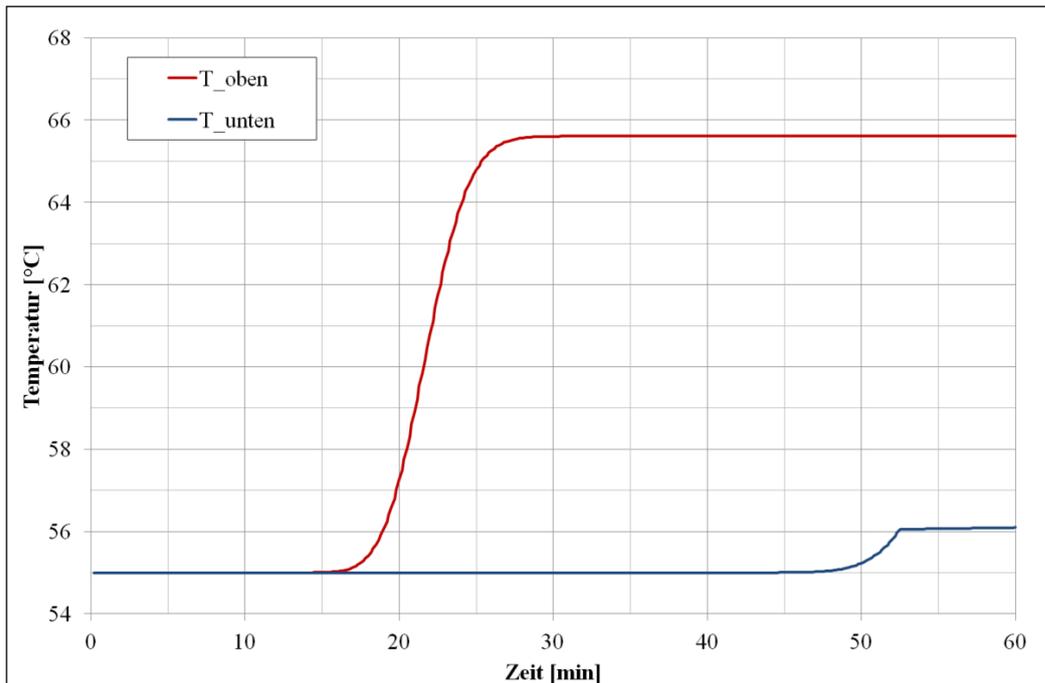
**Abbildung 111:** Vergleich Simulation (durchgezogene Linien) und Messung des WhisperGen (gestrichelte Linien)



**Abbildung 112:** Temperaturprofil bei Beladung des Speichers nach unterschiedlichen Zeitschritten

Das reale Profil zeigt einen geringeren Temperaturgradienten, wodurch man auf ein radiales Temperaturprofil im Pufferspeicher schließen kann, welches nicht der idealen Pfropfenströmung entspricht. Im realen Pufferspeicher kommt es zu Rückvermischungen, welche den mittleren Temperaturgradienten flacher ausfallen lassen. Des Weiteren wurde für das Berechnungsmodell als Vereinfachung angenommen, dass aus jedem Volumensegment auf der Höhe des Wärmeübertragers die gleiche spezifische Wärmeleistung des aktuellen Lastprofils herausgezogen wird. Dies hatte allerdings zur Folge, dass die Temperaturdifferenz zwischen durchströmten Fluid des Wärmeübertragers und des Pufferspeichers nicht betrachtet wurde. Dadurch musste in der Modellierung des Lastprofils ein Anpassungsparameter implementiert werden, um gleiche Entladezeiten des Pufferspeichers im Vergleich zur Messung zu erhalten. Damit konnte jedoch nur die Temperaturführung der oberen Messung beeinflusst werden. Aufgrund des fehlenden Temperaturgradienten zwischen Wärmeübertrager und Pufferspeicher wird nicht wie in der Realität, bei einem voll durchgeladenen Speicher, im unteren Bereich eine höhere Wärmeleistung durch den größeren Temperaturunterschied entnommen. Dies ist bei der unteren Puffertemperatur zu erkennen, die nur sehr langsam und wesentlich geringer abfällt als es der Realität entspricht. Zur Entfernung dieses Fehlers müsste bei einer weiteren Entwicklung der Simulation der Lastprofilerm (time\_sourceWT\_24h) an den Temperaturgradienten zwischen Pufferspeicher und Wärmeübertrager gekoppelt werden. Dazu muss eine Wärmetransportgleichung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser im Pufferspeicher und dem des Wärmeübertragers entwickelt werden. Zusätzlich ist es notwendig, eine gekoppelte Gegenstrom-Wärmeübertragung mit integrierter Volumenstromregelung im Wärmeübertrager zu realisieren.

Da die Aufheizung des Pufferspeichers und der vorgegebene Abtransport der Wärmemenge funktioniert, kann ein Vergleich des Modells mit der Messung durchgeführt werden (s. Abbildung 111 und Abbildung 113). Die Regelung des KWK-Gerätes konnte in das Modell gut implementiert werden, was in Abbildung 111 zu erkennen ist. Hier ist zum Anfang der Messung das KWK-Gerät (grüne Linie) ausgeschaltet, wobei gleichzeitig Wärme aus dem Pufferspeicher gezogen wird. Dabei fällt die Temperatur im Pufferspeicher bis die Einschalttemperatur in der Mitte des Pufferspeichers von 50°C (rote gestrichelte horizontale Linie) erreicht wird. Anschließend wird der Speicher wieder aufgeladen bis sich die Ausschalttemperatur von 56°C (blaue gestrichelte horizontale Linie) im unteren Speicherbereich eingestellt hat. Mit der Lösung des beschriebenen Temperaturgradientenproblems kann ein realitätsnahes Modell geliefert werden, wodurch auf umfangreiche Messungen nach DIN 4709 verzichtet werden kann.



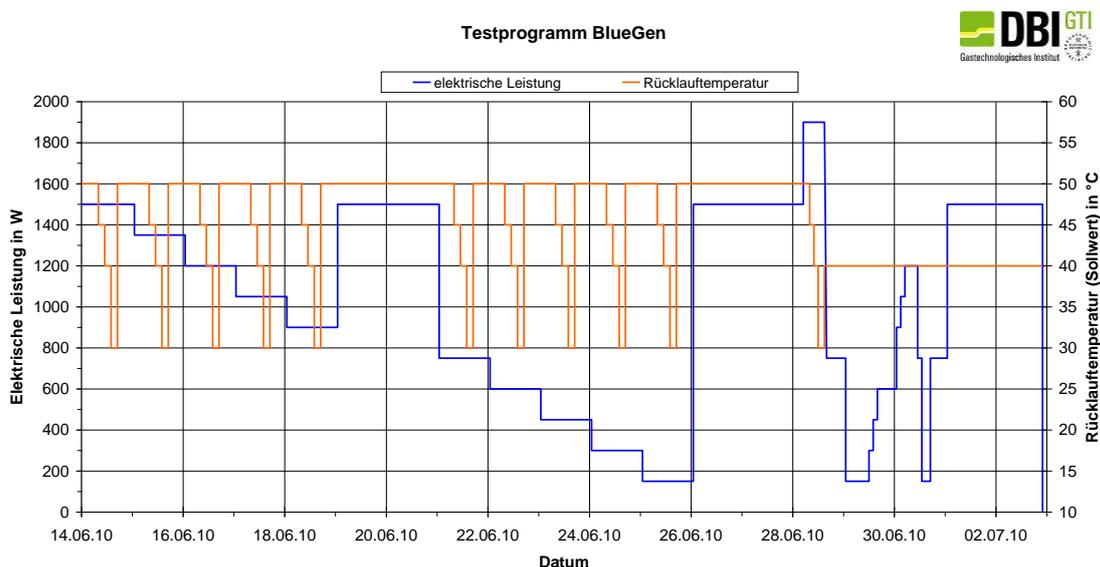
**Abbildung 113:** Aufladen des Pufferspeichers mit einer Initialisierungstemperatur von 55°C

Aufgrund der im derzeitigen Modell bestehenden Abweichungen zu realen Messergebnissen wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Es ist eine Weiterentwicklung des Modells in einem weiterführenden Projekt notwendig. Ebenfalls sollte angestrebt werden, die Simulationsrechnung derart zu vereinfachen, dass die Modellierung mit einer Tabellenkalkulation wie z.B. Excel durchgeführt werden kann.

#### 4.7.2 CFCL-BlueGen

Beim BlueGen handelt es sich um ein SOFC-Brennstoffzellensystem, das eine elektrische Leistung von bis zu 2 kW aufweist. Die derzeit als Feldtestanlagen betriebenen Geräte arbeiten mit einer maximalen elektrischen Leistung von 1,5 kW bei einem elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 %. Auf Grund des hohen elektrischen Wirkungsgrades des SOFC-Systems beträgt die abgegebene thermische Leistung kleiner als 1 kW. Zur Durchführung von Laboruntersuchungen wurde vor Beginn mit dem Hersteller ein Versuchsprogramm abgestimmt. Diese Vorgehensweise wurde notwendig, da die Einstellung der elektrischen Leistung des Gerätes per Fernwartung durch den Hersteller vorgenommen wurde. In diesem Zeitraum wurde das in der Abbildung 114 dargestellte Versuchsprogramm

absolviert. Dabei arbeitete das Gerät in jeder elektrischen Leistungsstufe bei 3 unterschiedlichen Rücklauftemperaturen.



**Abbildung 114:** Versuchsprogramm der Labormessungen am BlueGen

Die in den verschiedenen elektrischen Leistungsstufen ermittelten Wirkungsgrade (elektrisch, thermisch, gesamt) im Bereich von 300 W bis 1500 W sind in 20%-Schritten in der Abbildung 115 dargestellt. Die zugrundeliegenden Messwerte und Wirkungsgrade wurden neben den Abgasanalysenwerten, den Primärenergiefaktoren und der Primärenergieeinsparung in die Tabelle 42 eingetragen.

Mit zunehmender elektrischer Leistung der Brennstoffzellenanlage steigt der elektrische Wirkungsgrad an und erreicht den Maximalwert von 63,9 % bei der elektrischen Nennleistung von 1500 W. Der thermische Wirkungsgrad sinkt mit zunehmender elektrischer Leistung von 29,6 % auf 21,2 % bei einer Rücklauftemperatur von ca. 30 °C.

Um die Abhängigkeit des thermischen Wirkungsgrades von der Rücklauftemperatur darstellen zu können, sind in der Abbildung 116 die ermittelten Kennfelder in leistungsbezogener Darstellung abgebildet. Es ist erkennbar, dass bei höheren Rücklauftemperaturen der thermische Wirkungsgrad des Gerätes abnimmt, während sich der elektrische Wirkungsgrad bei gleicher Leistungsstufe nur geringfügig ändert. Auf Grund der geringen Wärmeleistung des Gerätes, insbesondere bei höheren Rücklauftemperaturen, konnte die höchste angestrebte Rücklauftemperatur von 50 °C nicht erreicht werden.

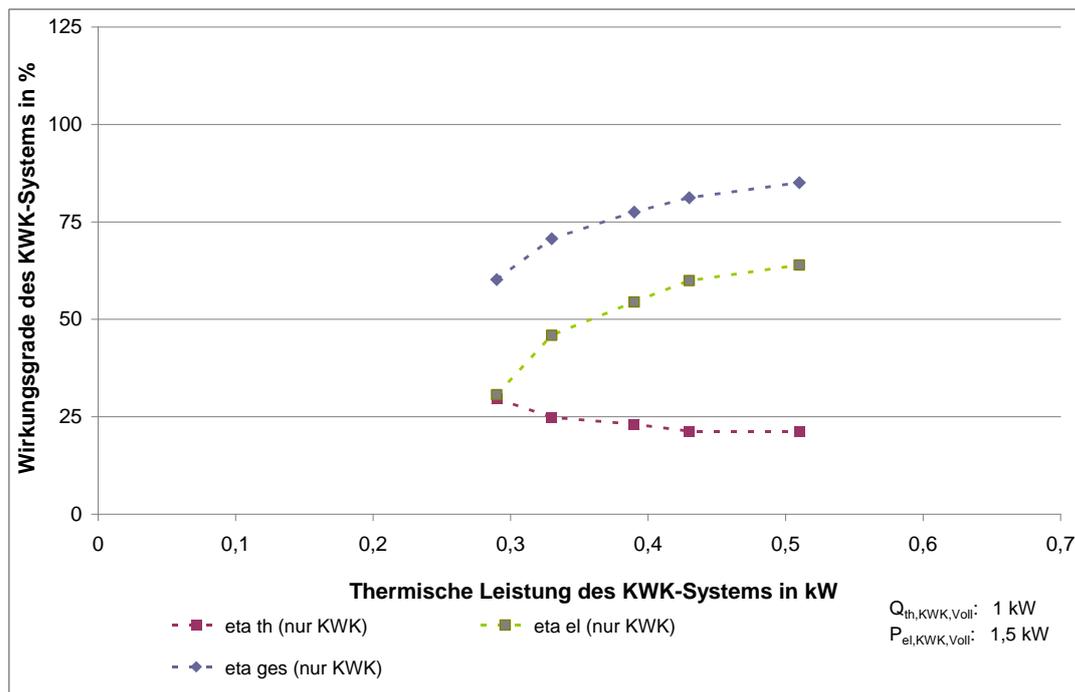
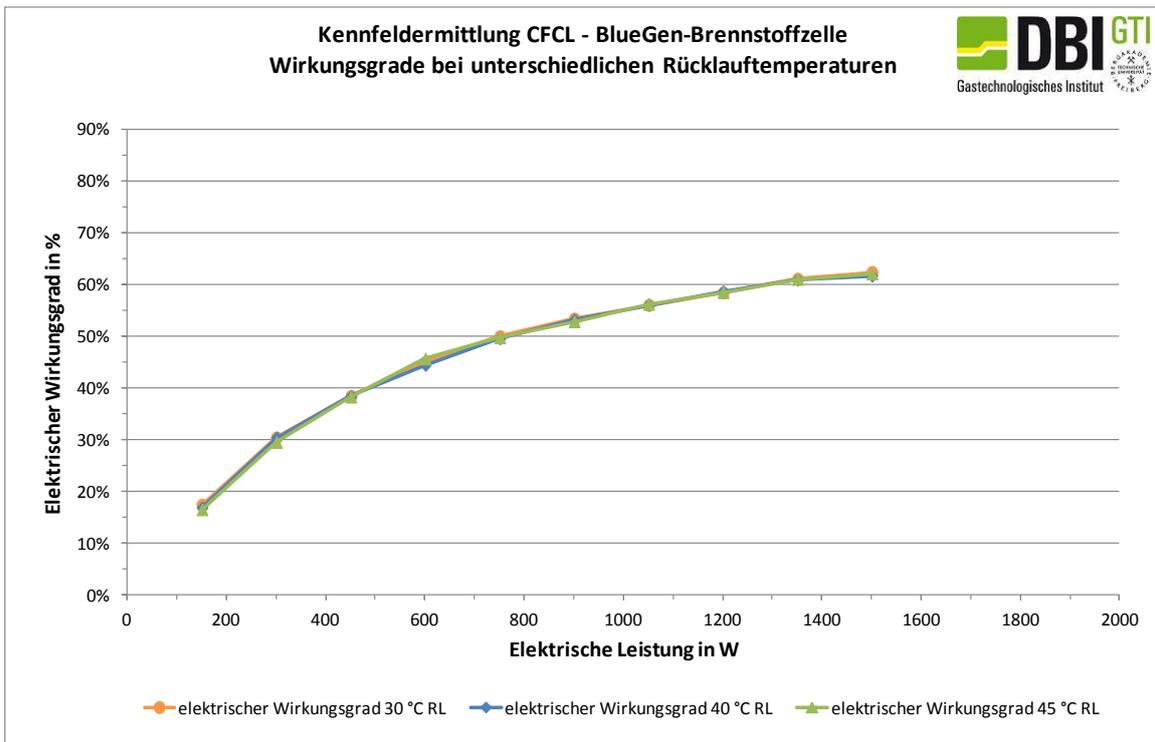
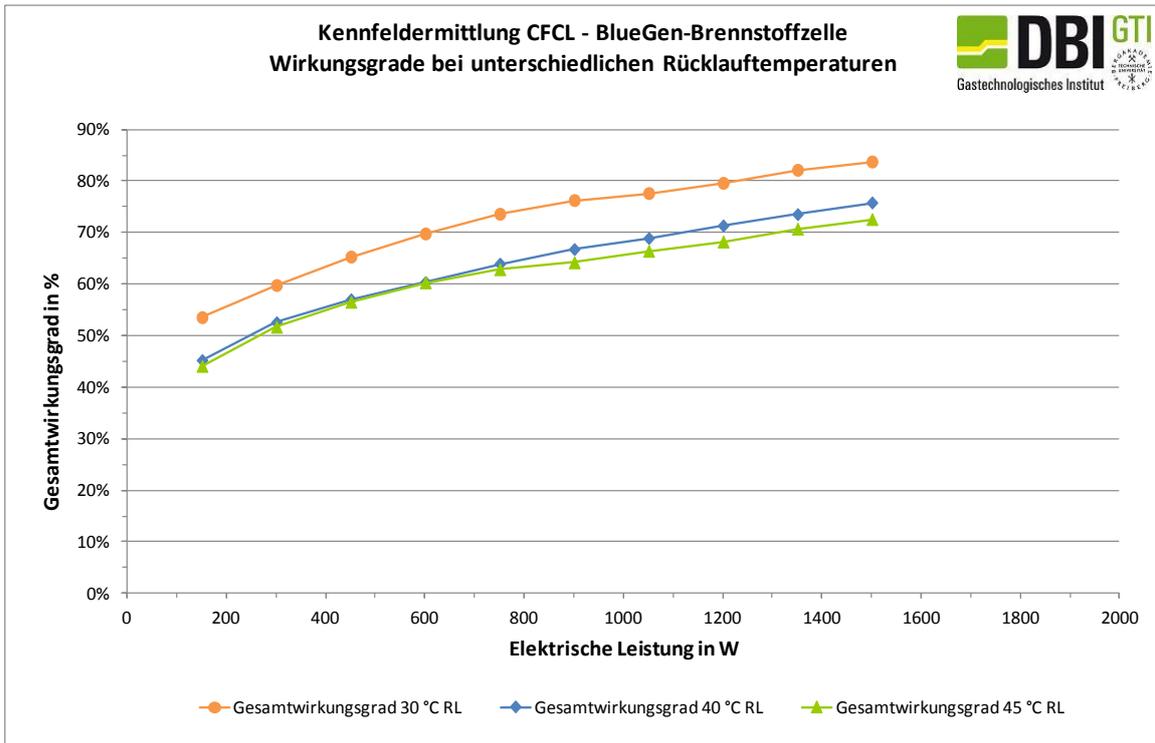


Abbildung 115: Wirkungsgrade BlueGen

Tabelle 42: Messwerte und Kennziffern bei verschiedenen Lastpunkten

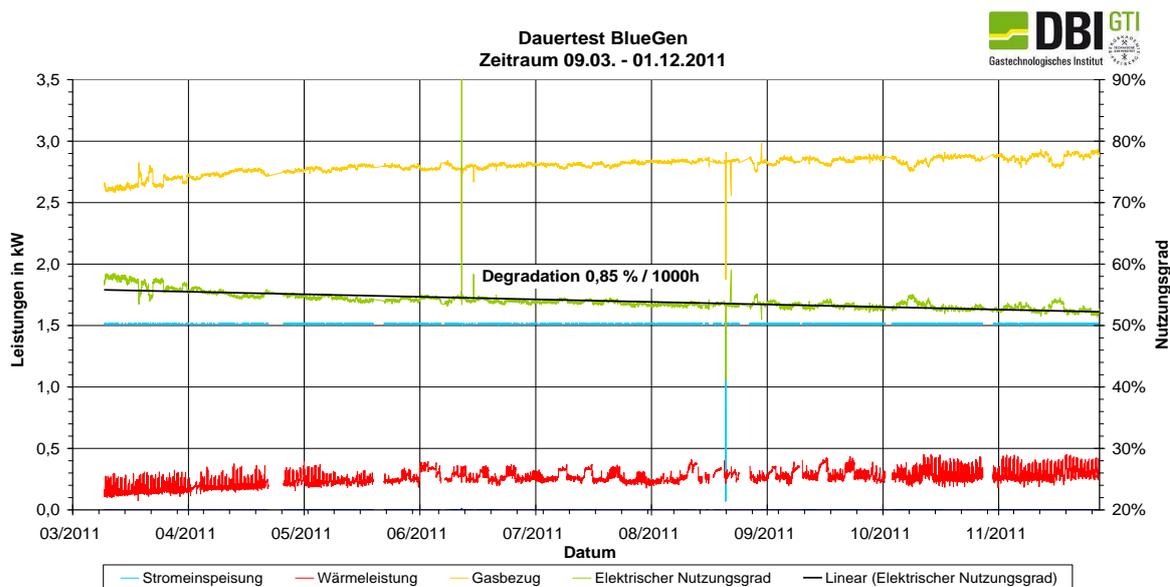
Wirkungsgrade "BlueGen"							
Bezeichnung		Einheit	Prüfpunkte				
			1	2	3	4	5
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{vor}$	°C	36,0	36,5	37,8	38,0	39,3
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{rück}$	°C	30,0	29,5	29,7	29,2	28,6
Abgastemperatur	$\vartheta_{Abgas}$	°C	42,0	41,5	40,6	40,8	43,4
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{CO_2,mess}$	%	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
CO gemessen	$r_{CO,mess}$	ppm	2,6	3,3	4,3	7,9	22,9
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{NO_x,mess}$	ppm	1,4	0,6	0,0	0,0	0,0
CO luftfrei	$r_{CO,luftfrei}$	ppm	21,9	20,8	21,0	33,9	82,1
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{NO_x,luftfrei}$	ppm	12,3	3,7	0,0	0,0	0,0
Wärmebelastung	$\dot{Q}_B$	kW	0,98	1,33	1,69	2,02	2,41
Thermische Leistung	$\dot{Q}_{th}$	kW	0,29	0,33	0,39	0,43	0,51
Elektrische Leistung	$P_{el}$	kW	0,3	0,61	0,92	1,21	1,54
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	<b><math>\eta_{th}</math></b>	<b>%</b>	<b>29,6</b>	<b>24,8</b>	<b>23,1</b>	<b>21,3</b>	<b>21,2</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad</b>	<b><math>\eta_{el}</math></b>	<b>%</b>	<b>30,6</b>	<b>45,9</b>	<b>54,4</b>	<b>59,9</b>	<b>63,9</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	<b><math>\eta_{ges}</math></b>	<b>%</b>	<b>60,2</b>	<b>70,7</b>	<b>77,5</b>	<b>81,2</b>	<b>85,1</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	<b><math>f_{PE,KWK}</math></b>	<b>1</b>	<b>1,03</b>	<b>-0,37</b>	<b>-1,37</b>	<b>-2,15</b>	<b>-2,65</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	<b>%</b>	<b>-5,2</b>	<b>17,2</b>	<b>26,6</b>	<b>31,2</b>	<b>34,8</b>



**Abbildung 116:** Ergebnisse der Kennfeldermittlung (leistungsbezogen)

Nach der Fertigstellung des Demonstrationszentrums am DBI Freiberg wurde die Brennstoffzelle in dieser Räumlichkeit für den Dauertest installiert. Seit der

Inbetriebnahme am 09.03.2011 arbeitet die BlueGen-Brennstoffzelle mit einer elektrischen Leistung von 1,5 kW im Dauerbetrieb. Während des gesamten Zeitraumes traten keine Betriebsstörungen auf. Die Abbildung 117 zeigt neben dem Verlauf der Leistungsdaten, den elektrischen Nutzungsgrad im bisherigen Betriebszeitraum. Die ermittelte Degradation betrug in diesem Zeitraum 0,85 % pro 1000 Betriebsstunden und lag damit über der kommerziellen Zielstellung von CFCL.



**Abbildung 117:** Verlauf der Kenngrößen im bisherigen Betriebszeitraum

Die vom Gerät aufgenommenen und abgegebenen Energiemengen sind in der Tabelle 43 zusammenfassend für den gesamten Zeitraum und beispielhaft für den Monat November 2011 dargestellt. Diese Werte basieren auf den Aufzeichnungen des installierten Dataloggers.

**Tabelle 43:** Aufgezeichnete Energiemengen im Betriebszeitraum (09.03. – 30.11.2011)

	Summe	Monat November
Gasbezug	18.683 kWh	2.191 kWh
Stromabgabe	8.952 kWh	1.036 kWh
Strombezug	19 kWh	-
Wärmemenge	1.511 kWh	192 kWh

### 4.7.3 WhisperGen EU1

Beim WhisperGen handelt es sich um ein zweistufiges Brennwertgerät mit integriertem Stirlingmotor zur Stromerzeugung. Das Gerät wird von der spanischen Firma Efficient Home Energy hergestellt. Der doppelt wirkende 4-Zylinder Stirlingmotor arbeitet aufgrund seines speziellen Lagerungsprinzips sehr leise und vibrationsarm. Er besitzt eine elektrische Leistung von maximal 1kW und eine thermische Leistung im Stirlingbetrieb von 7,7 bis 8,3 kW. Der integrierte Zusatzbrenner hat eine thermische Leistung von 6 kW, wodurch das Gerät für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern und im Kleingewerbe, ohne einen zusätzlichen Spitzenkessel, geeignet ist. Der Stirlingmotor ist wartungsfrei und weist geringe CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen auf. Vom Hersteller wird eine System-Paket-Lösung angeboten, die neben dem Stirlingmotor aus einem auf das System abgestimmten 800 Liter Multihygiene-Speicher und einer steckerfertigen Regelungseinheit besteht. Durch ein spezielles Schichtungssystem sind eine hygienische Erzeugung von Trinkwasser und eine effektive Speicherung der erzeugten Wärmeenergie möglich. Die Regelungseinheit ist vorprogrammiert mit einem speziell für den WhisperGen entwickelten Energie-Management-System.

Während der Labormessungen wurde das Gerät zunächst für die Durchführung von Wirkungsgradmessungen ohne den Wärmespeicher betrieben. Da der Hersteller bei Betrieb des Gerätes eine bestimmte Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf fordert, um Hotspots zu vermeiden, erfolgten die Wirkungsgradmessungen bei einer Rücklauftemperatur von 30 °C und einem konstanten Volumenstrom. Die Messungen wurden durchgeführt beim alleinigen Betrieb des Stirlingmotors und beim Betrieb des Stirlingmotors mit Zusatzbrenner.

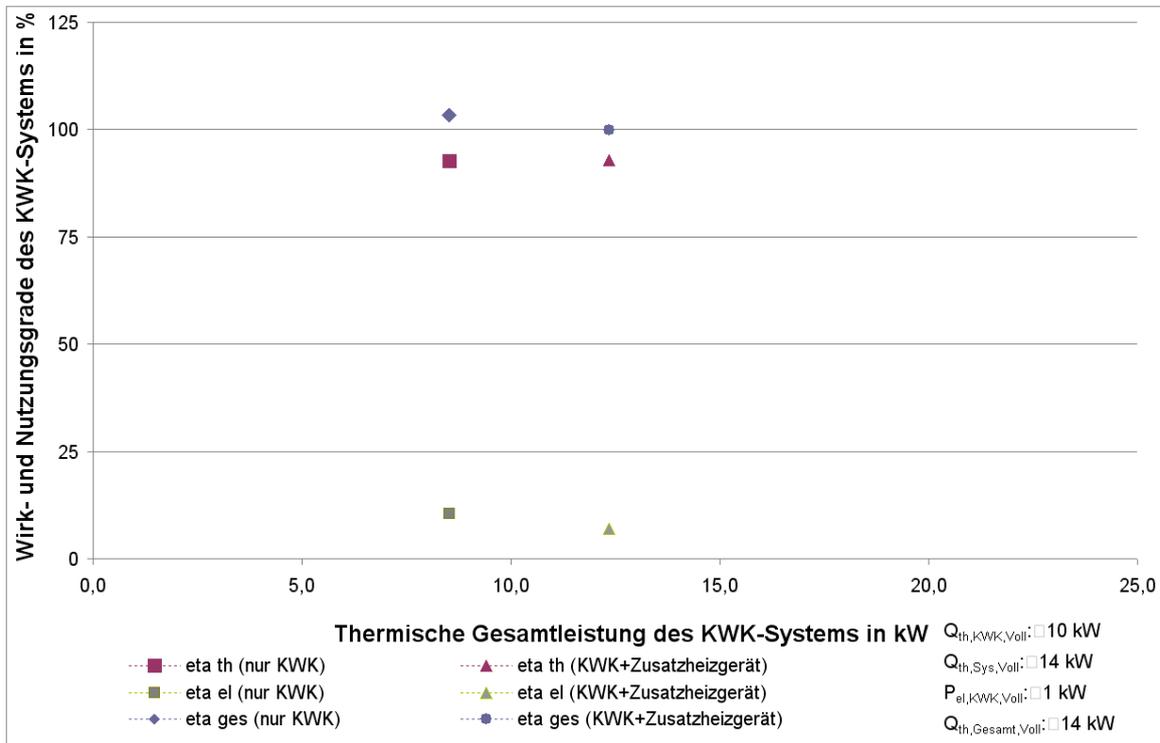
Die Tabelle 44 zeigt die ermittelten Wirkungsgrade bei den angegebenen Systemtemperaturen und die Ergebnisse der Abgasemissionsmessungen. Eine grafische Darstellung der Wirkungsgrade des KWK-Gerätes zeigt die Abbildung 118.

Der ermittelte elektrische Wirkungsgrad im Stirlingbetrieb bestätigt die Herstellerangabe, der ermittelte thermische Wirkungsgrad liegt ca. 3 % unter der Herstellerangabe. Beim Betrieb mit Zusatzbrenner wurde aufgrund der erhöhten thermischen Leistung ein geringerer elektrischer Wirkungsgrad gemessen.

**Tabelle 44:** Wirkungsgradermittlung WhisperGen EU1

Wirkungsgrade "WhisperGen"

Bezeichnung		Einheit	Prüfpunkte	
			1	2
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	45	51,7
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	30,2	30,2
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	30,7	33,7
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	9,5	9,2
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	58,1	49,5
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	30,4	26,4
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{luftfrei}}$	ppm	74	65
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{luftfrei}}$	ppm	39	34
Wärmebelastung	$\dot{Q}_B$	kW	9,2	13,3
Thermische Leistung	$\dot{Q}_{\text{th}}$	kW	8,5	12,4
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,97	0,94
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>92,7</b>	<b>92,9</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{el}}$	%	<b>10,6</b>	<b>7,1</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>103,3</b>	<b>99,9</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	<b>1</b>	<b>0,89</b>	<b>0,99</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	<b>PEE</b>	%	<b>19,7</b>	<b>14,9</b>



**Abbildung 118:** Wirkungsgrade WhisperGen EU1 in Abhängigkeit von der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems

Zur Durchführung der Lastprofilmessungen in Anlehnung an die DIN 4709 wurde das gesamte Systempaket (Wärmespeicher, Regelungseinheit) im Prüflabor installiert und eine SPS-Steuerung zum Abfahren des Lastprofils programmiert. Die Messung wurde entsprechend dem in der DIN 4709 dargestellten Prüfungsablauf durchgeführt und nach Beendigung der letzten Speicherbeladung (Herstellung des Ausgangsladezustandes des Wärmespeichers) nach ca. 25 Stunden beendet.

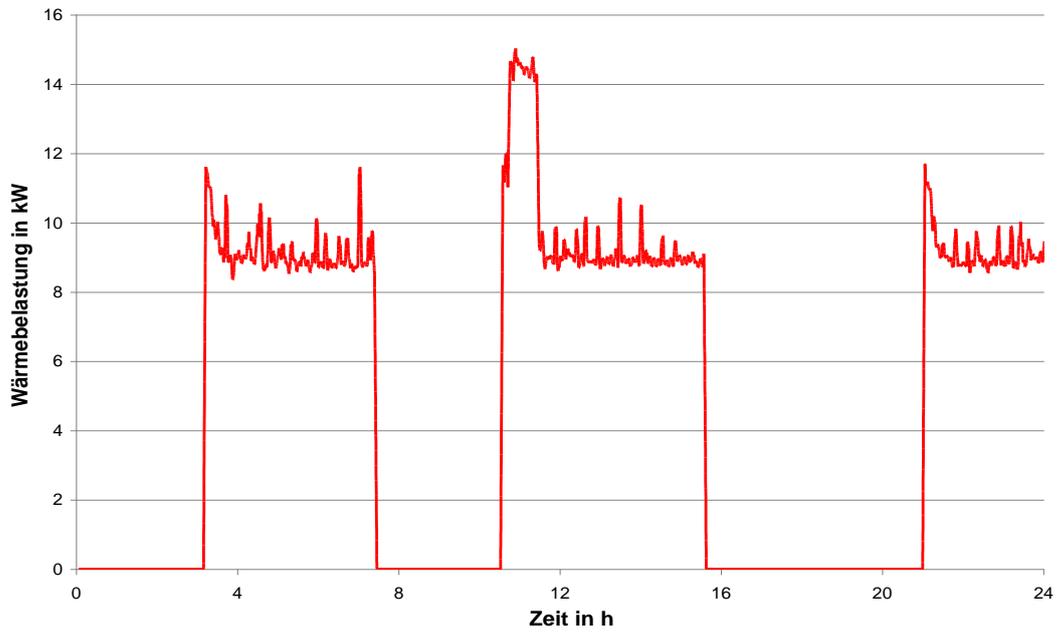
In der Tabelle 45 sind die Ergebnisse der Normnutzungsgradmessung gemäß DIN 4709 (24-Stunden-Referenzlastprofil) zusammengestellt.

**Tabelle 45:** Normnutzungsgradermittlung WhisperGen mit 800 l Kombispeicher

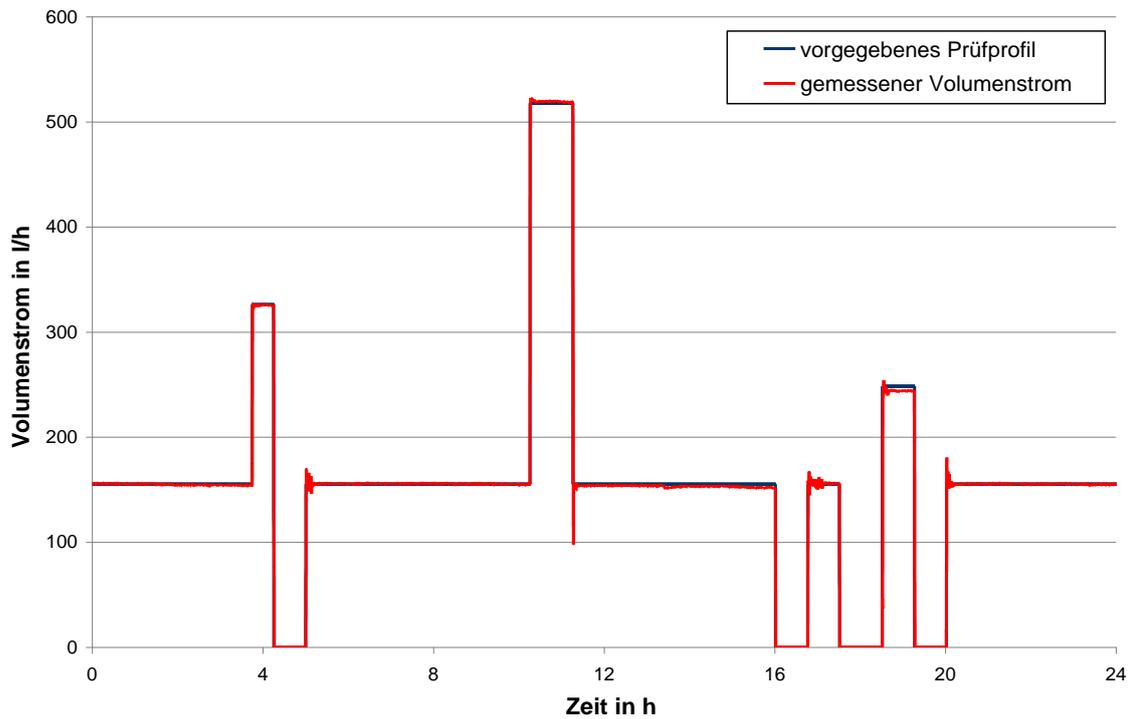
Normnutzungsgrade nach DIN 4709 "WhisperGen"

Bezeichnung		Einheit	Eingestellte Gesamtleistung 12 kW
Speichervolumen	$V_{Sp}$	dm <sup>3</sup>	800
mittlere Vorlauftemperatur	$\vartheta_{m,vor}$	°C	50,2
mittlere Rücklauftemperatur	$\vartheta_{m,rück}$	°C	29,8
Thermische Leistung KWK	$\dot{Q}_{th}$	kW	8
Elektrische Leistung KWK	$P_{el}$	kW	1
Anteil KWK am Gesamtsystem	$r_{KWK}$	%	67
Zugeführte Energie	$Q_{Br}$	kWh	128,4
erzeugte thermische Energie	$Q_{th}$	kWh	93,9
erzeugte elektrische Energie	$W_{el}$	kWh	13,2
<b>Thermischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,th}$	%	<b>73,1</b>
<b>Elektrischer Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,el}$	%	<b>10,3</b>
<b>Gesamt Normnutzungsgrad</b>	$\eta_{N,ges}$	%	<b>101,2</b>

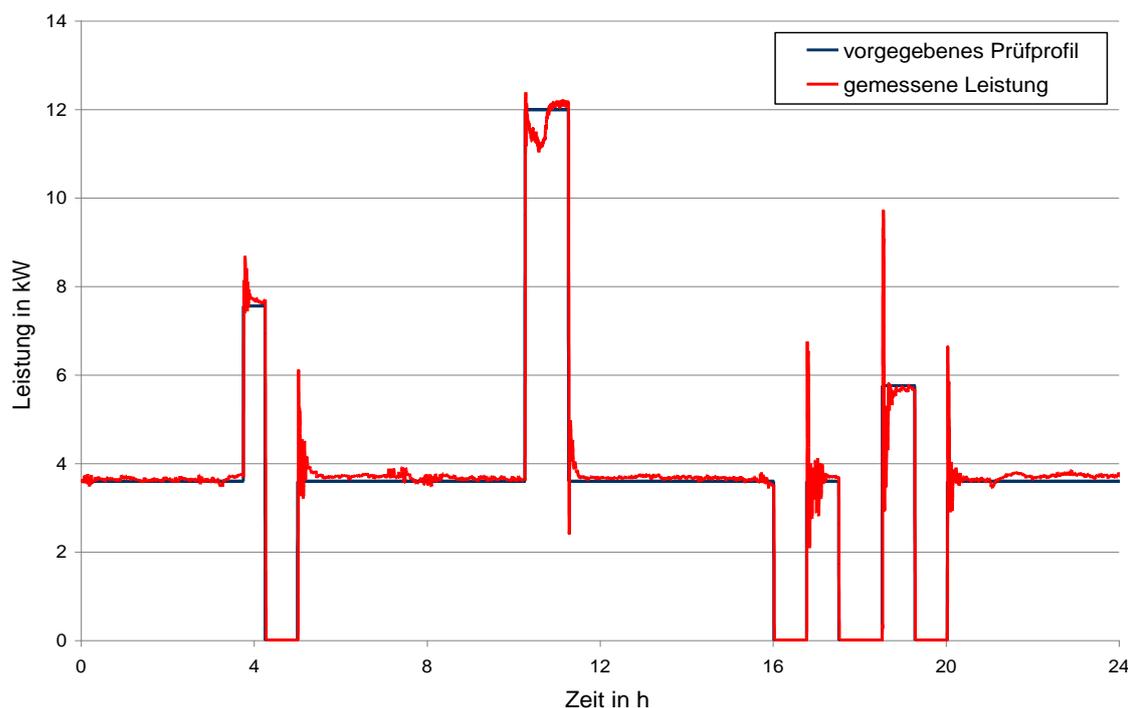
Die Abbildung 119 zeigt den Verlauf, der während der Messung des Lastprofils aufgetretenen Wärmebelastung. In der Abbildung 120 ist der Volumenstrom im Heizkreis und in der Abbildung 121 die aus dem Wärmespeicher abgeführte thermische Leistung während des Abfahrens des Lastprofils gemäß DIN 4709 dargestellt [DIN 4709].



**Abbildung 119:** Verlauf der Wärmebelastung beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709)



**Abbildung 120:** Heizwasservolumenstrom beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709)



**Abbildung 121:** Verlauf der aus dem Wärmespeicher entnommenen thermischen Leistung beim Abfahren des Lastprofils (DIN 4709)

#### 4.7.4 Kirsch microBHKW L 4.12

Das microBHKW L 4.12 arbeitet mit einem Briggs & Stratton Vanguard V2-Zylinder-Gasverbrennungsmotor in Industriespezifikation mit einem Hubraum von 480 cm<sup>3</sup>. Der Verbrennungsmotor arbeitet bei einer Drehzahl von ca. 1900 1/min und treibt einen dreiphasigen luftgekühlten Asynchrongenerator an. Durch eine Anpassung der zugeführten Brennstoffmenge und damit des Drehmomentes kann das Gerät in den elektrischen Leistungsstufen 2, 3 und 4 kW betrieben werden. Die anfallende Motorwärme wird nahezu vollständig genutzt und einem Pufferspeicher mit mindestens 600 l Volumen zugeführt. Das Gerät arbeitet dabei wärmegeführt. Seitens des Herstellers ist geplant, mehrere Kombispeichergößen mit mindestens 750 l Inhalt für das KWK-System anzubieten.

Im Gerät ist ein mikroprozessorgesteuerter Regler integriert, der neben der Sicherstellung einer konstanten elektrischen Leistung, die Funktionen der Heizkreise, den Beladungszustand des Pufferspeichers, sowie alle sicherheitsrelevanten Einrichtungen des microBHKW überwacht. Alle Funktionen können über ein bedienerfreundliches 7-Zoll-Touchscreen-Display einfach programmiert werden. Durch den Hersteller ist eine Kaskadierung von mehreren microBHKWs bzw. Zusatzkesseln in Vorbereitung.

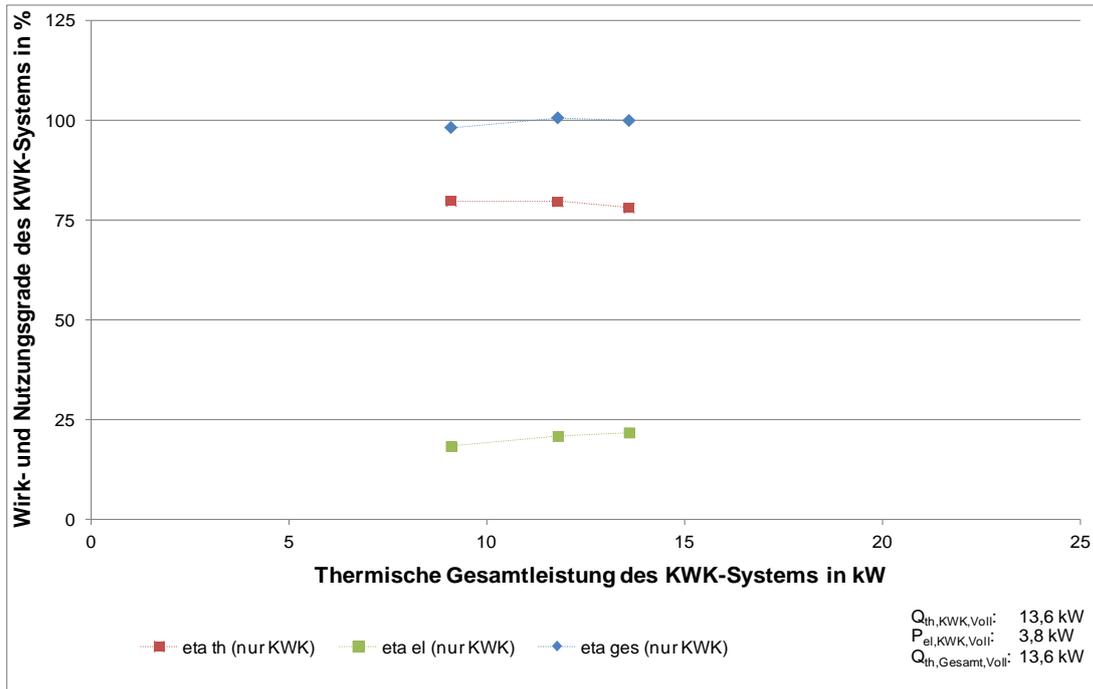
In der Tabelle 46 sind die ermittelten Wirkungsgrade bei den angegebenen Systemtemperaturen und die gemessenen Abgasemissionswerte dargestellt. Eine grafische Darstellung der Wirkungsgrade des KWK-Gerätes zeigt die

Abbildung 122. Die ermittelten elektrischen Wirkungsgrade liegen bei dem vermessenen Feldtestgerät etwas unter den Herstellerangaben von  $25 \pm 3 \%$ . Die ermittelten thermischen Wirkungsgrade liegen über den Herstellerangaben von  $70 \pm 3 \%$ .

**Tabelle 46:** Wirkungsgradermittlung KIRSCH microBHKW L 4.12 (Feldtestgerät)

Wirkungsgrade "microBHKW L 4.12 (Feldtestgerät)"

Bezeichnung		Einheit	Prüfpunkte		
			1	2	3
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	56,9	62,7	64
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	30,2	30,3	30,2
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	39,7	42,1	42,1
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	11,7	11,4	11,4
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	1	7	87
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	131	180	138
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{luftfrei}}$	ppm	1	9	88
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{luftfrei}}$	ppm	132	182	139
Wärmebelastung	$\dot{Q}_B$	kW	11,4	14,8	17,4
Thermische Leistung	$\dot{Q}_{\text{th}}$	kW	9,1	11,8	13,6
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	2,1	3,1	3,8
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>					
	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>79,8</b>	<b>79,7</b>	<b>78,2</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad</b>					
	$\eta_{\text{el}}$	%	<b>18,4</b>	<b>20,9</b>	<b>21,8</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>					
	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>98,2</b>	<b>100,7</b>	<b>100,0</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>					
	$f_{\text{PE,KWK}}$	1	<b>0,78</b>	<b>0,70</b>	<b>0,68</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>					
	$PEE$	%	<b>20,7</b>	<b>23,8</b>	<b>23,8</b>



**Abbildung 122:** Wirkungsgrade KIRSCH microBHKW L 4.12 (Feldtestgerät) in Abhängigkeit der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems

#### 4.7.5 Remeha eVita 25s

Im Rahmen des Projektes wurden Wirkungsgradmessungen am eVita 25s des Herstellers Remeha durchgeführt. Bei dem Gerät handelt es sich um einen Einzylinder Microgen-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von max. 1 kW. Die thermische Leistung des Stirlings beträgt maximal ca. 6 kW. In dem wandhängenden Gerät ist zusätzlich ein Brennwertkessel integriert, wodurch eine thermische Gesamtleistung beim Betrieb beider Komponenten von bis zu 26,5 kW erreicht werden kann.

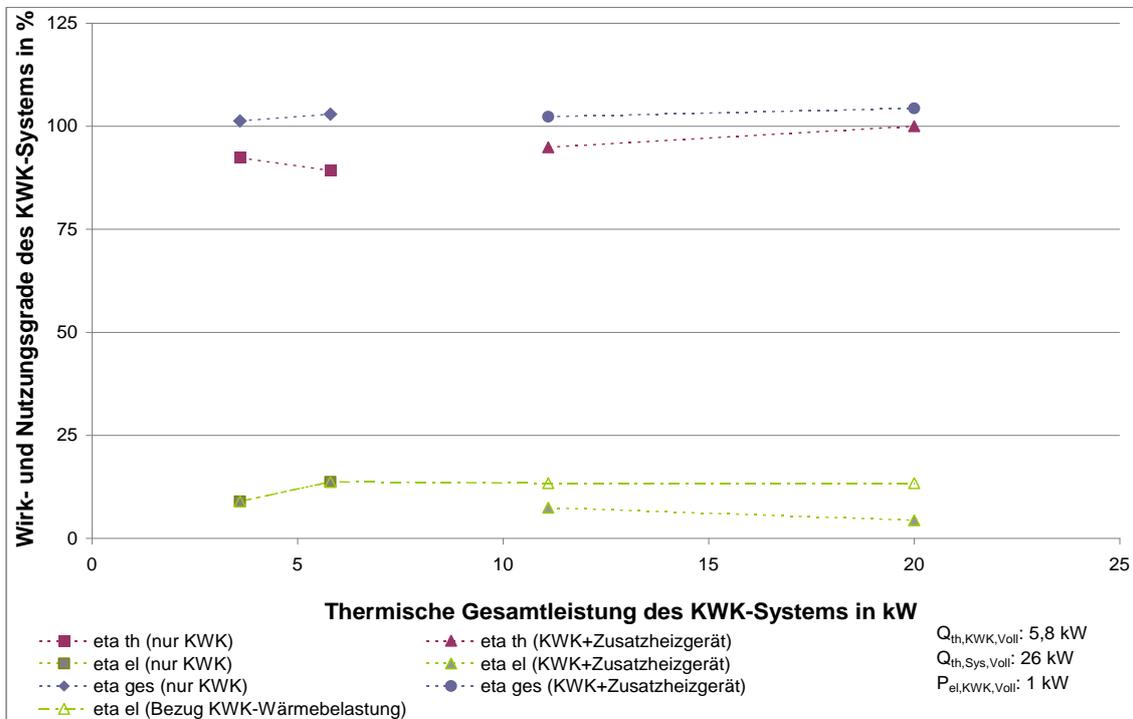
Zur Durchführung von Wirkungsgradmessungen wurde das Gerät direkt an den Prüfstand angeschlossen. Die Messungen erfolgten wie bei den anderen Geräten bei einer Rücklauftemperatur von 30 °C und einem konstanten Volumenstrom. Die Messungen erfolgten bei minimaler und maximaler Leistung des Stirlingmotors, sowie bei maximaler Leistung des Stirlingmotors und 2 unterschiedlichen Leistungsstufen des integrierten Zusatzkessels.

In der Tabelle 47 sind die ermittelten Wirkungsgrade bei den angegebenen Systemtemperaturen und die gemessenen Abgasemissionswerte dargestellt. Eine grafische Darstellung der Wirkungsgrade des Gerätes zeigt die Abbildung 123. Die ermittelten Wirkungsgrade wurden vom Hersteller bestätigt.

**Tabelle 47:** Wirkungsgradermittlung Remeha eVita 25s

Wirkungsgrade "eVita 25s"

Bezeichnung		Einheit	Prüfpunkte			
			1	2	3	4
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{\text{vor}}$	°C	37,1	41,1	51,4	55,1
Rücklauftemperatur	$\vartheta_{\text{rück}}$	°C	30,3	30,3	30,3	30,3
Abgastemperatur	$\vartheta_{\text{Abgas}}$	°C	35	41,5	44,1	43,1
CO <sub>2</sub> gemessen	$r_{\text{CO}_2,\text{mess}}$	%	8,5	8,8	9,1	9,4
CO gemessen	$r_{\text{CO},\text{mess}}$	ppm	32	25	17	60
NO <sub>x</sub> gemessen	$r_{\text{NO}_x,\text{mess}}$	ppm	13	26	25	42
CO luftfrei	$r_{\text{CO},\text{luftfrei}}$	ppm	44	33	22	75
NO <sub>x</sub> luftfrei	$r_{\text{NO}_x,\text{luftfrei}}$	ppm	19	33	33	53
Wärmebelastung Gesamtsystem	$\dot{Q}_{\text{B,Ges}}$	kW	3,9	6,5	11,7	20
Wärmebelastung KWK	$\dot{Q}_{\text{B,KWK}}$	kW	3,9	6,5	6,5	6,5
Thermische Leistung	$\dot{Q}_{\text{th}}$	kW	3,6	5,8	11,1	20
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	kW	0,35	0,89	0,87	0,87
<b>Thermischer Wirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{th}}$	%	<b>92,3</b>	<b>89,2</b>	<b>94,9</b>	<b>100,0</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug Gesamtwärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,Ges}}$	%	<b>9,0</b>	<b>13,7</b>	<b>7,4</b>	<b>4,4</b>
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (Bezug KWK-Wärmebelastung)</b>	$\eta_{\text{el,KWK}}$	%	<b>9,0</b>	<b>13,7</b>	<b>13,4</b>	<b>13,4</b>
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>	$\eta_{\text{ges}}$	%	<b>101,3</b>	<b>102,9</b>	<b>102,3</b>	<b>104,4</b>
<b>Primärenergiefaktor</b>	$f_{\text{PE,KWK}}$	<b>1</b>	<b>0,94</b>	<b>0,83</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>
<b>Primärenergieeinsparung</b>	$PEE$	%	<b>17,2</b>	<b>21,2</b>	<b>17,0</b>	<b>16,6</b>



**Abbildung 123:** Wirkungsgrade Remeha eVita 25s in Abhängigkeit der thermischen Gesamtleistung des KWK-Systems

## 4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Messungen an den verschiedenen Mikro-KWK-Geräten zeigen zunächst eine gute Deckung mit den vom Hersteller angegebenen Effizienzdaten. Ebenfalls konnten die Anlagen bis auf wenige Ausnahmen problemlos installiert und vermessen werden. Die Anforderungen der derzeit angewandten Normen und Richtlinien zu Wirkungsgradmessungen können erfüllt werden. Hierbei hat sich allerdings gezeigt, dass eine gültige Prüfnorm mit definierten Messpunkten und einer definierten Energiebilanzierung unerlässlich ist.

Neben den Messungen zum Wirkungsgrad wurden umfangreiche Messungen zum Normnutzungsgrad basierend auf der neuen DIN 4709 durchgeführt. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei den Prüfstandseinstellungen, konnten die dynamischen Messungen im Laufe des Projektes problemlos und reproduzierbar vermessen werden. Der Aufwand einer solchen Messung ist bei der gezielten Einstellung der Geräte für die Messung relativ gering. Wichtige Voraussetzung für einen reibungslosen Ablauf der Prüfung ist die intensive Zusammenarbeit mit fachkundigen Technikern des jeweiligen Mikro-KWK-Geräteherstellers. Ein wesentlicher Faktor war hierbei die Einstellung der geforderten, über den Zeitraum der Prüfung konstant zu haltende, Vorlauftemperatur von 50 °C. Auch die Abstimmung des Mischer Ventils auf den eingesetzten Prüfstand muss im Vorfeld durchgeführt werden.

Im Vergleich zu üblichen Normnutzungsgraden von konventionellen Heizungsanlagen sind die gemessenen Normnutzungsgrade der Mikro-KWK-Systeme etwas höher anzusiedeln, was sinnvollerweise mit der Bewertung des erzeugten elektrischen Stromes bei der Normnutzungsgradermittlung nach DIN 4709 zusammenhängt. Durch den universellen Prüfaufbau ist es weiterhin möglich, jedes Heizungssystem nach dem dynamischen Prüfprofil zu testen. Interessant ist in diesem Zusammenhang besonders der Vergleich von Brennwert- bzw. Niedertemperaturgeräten zu den gemessenen Mikro-KWK-Anlagen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sowohl Wirkungsgrad als auch der Normnutzungsgrad nur bedingt zur Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen eingesetzt werden können. Vielmehr sollten diese Werte als Richtungsweiser und Kenndaten verstanden werden. Eine Auslegung nach Jahresdauerlinie bzw. idealerweise mit Hilfe geeigneter Simulationen kann durch eine einfache Angabe eines gemessenen Effizienzwertes nicht ersetzt werden.

## 4.9 Democenter

Die an den Instituten gemessenen Mikro-KWK-Anlagen werden zur Öffentlichkeitsarbeit und für Schulungen an den jeweiligen Institutsstandorten in sog. Democentern installiert.

### 4.9.1 Democenter GWI

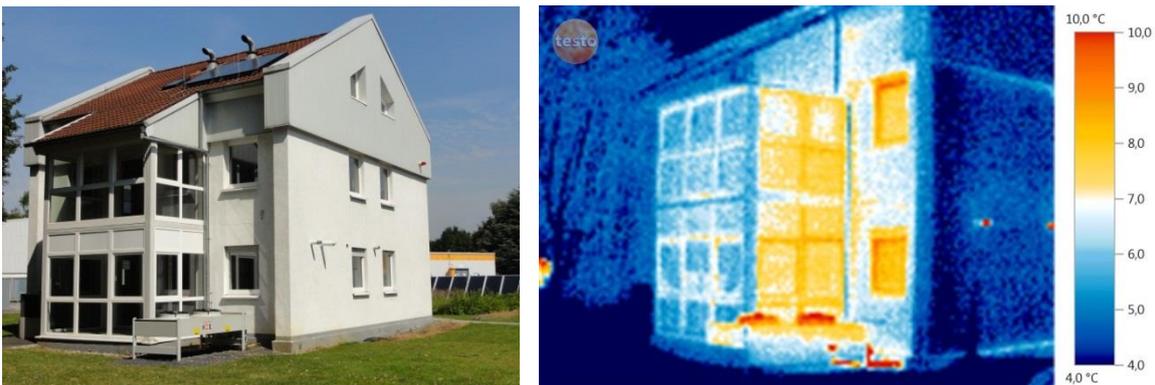
Flankierend zu den experimentellen Untersuchungen im Labor sind die innovativen Gasanwendungstechnologien im GWI-Versuchshaus zu einem Demonstrationszentrum zusammengefasst worden und werden dort im Betrieb präsentiert. Die Laborteststände, die nach neusten Normen- und Richtlinienanforderungen mit DKD-geprüften Messgeräten aufgebaut sind, zeigt Abbildung 124. Diese sind so konzipiert, dass quasi beliebige Anforderungsprofile autark über Zeiträume abgefahren werden können.



**Abbildung 124:** Mobiler, autarker Versuchsstand für statische und dynamische Messungen (Hydraulik, Regelung und Datenvisualisierung)

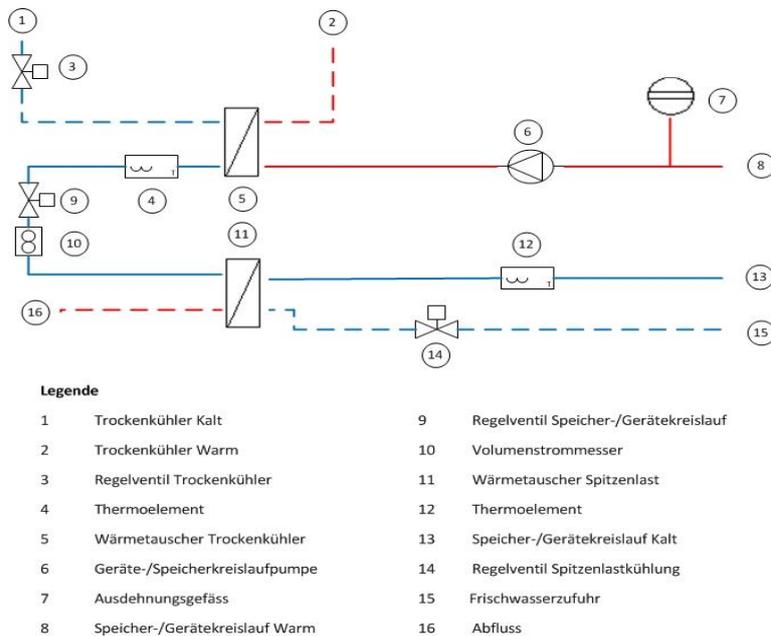
Das Versuchshaus am Standort Essen wurde im Jahr 1998 fertig gestellt und wird zu Demonstrations- und Experimentierzwecken sowie Schulungen genutzt. Es handelt sich hierbei um ein vollunterkellertes, freistehendes Einfamilienhaus mit

125 m<sup>2</sup> Wohnfläche im Erd- und Obergeschoss, einem Dachgeschoss und einem Wintergarten. Die Grundfläche beträgt 85 m<sup>2</sup>, die Gebäudenutzfläche liegt bei 297 m<sup>2</sup>, das umbaute Volumen beträgt 930 m<sup>3</sup>. Das Versuchshaus ist nach dem Wärmedämmstandard WSVO '95 gebaut worden. Es weist einen spezifischen Heizwärmebedarf von 70 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf. Abbildung 125 zeigt eine Außenansicht des Versuchshauses mit einer Thermografieaufnahme.



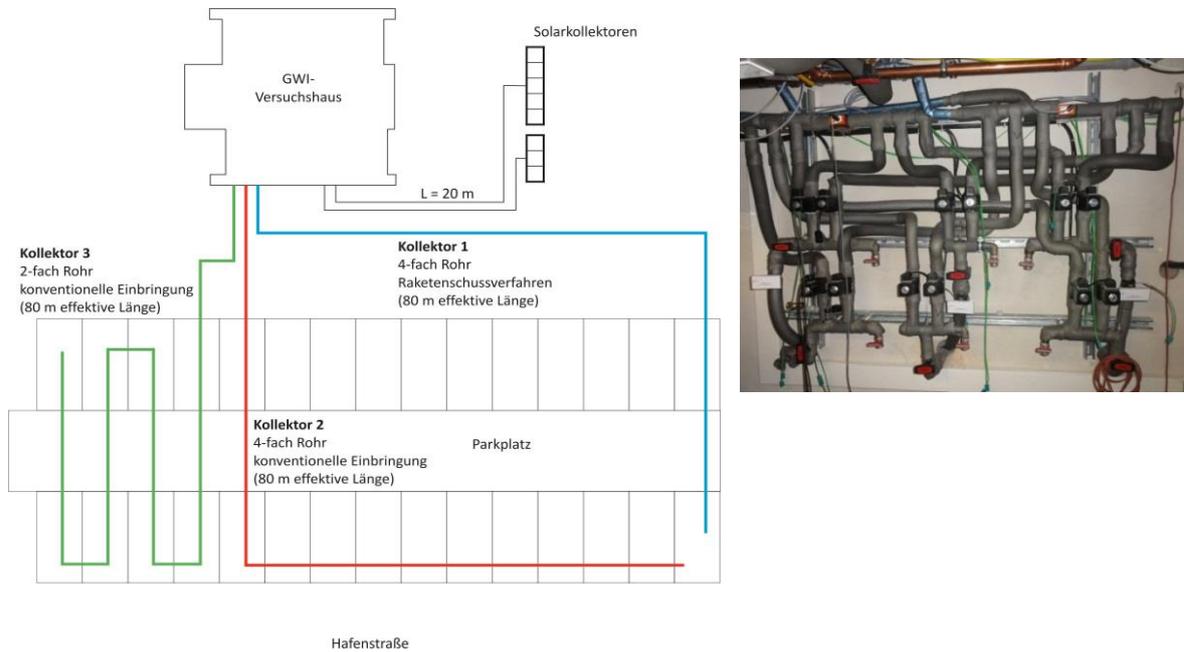
**Abbildung 125:** Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.

Damit die im Erdgeschoss installierten Gas-plus-Technologien auch gleichzeitig ohne Einschränkungen betrieben werden können, wird ein Trockenkühler eingesetzt, um die anfallende Wärme regelbar abzuführen. Die schematische Darstellung der Anbindung der Heizungsanlagen an den Trockenkühler ist in Abbildung 126 aufgezeigt.



**Abbildung 126:** Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler

Die Anlagen zur Umweltwärmeeinkopplung über Erdbodenflächenkollektoren sind in Abbildung 127 abgebildet. Insgesamt sind drei Flächenkollektoren unterschiedlicher Verlegearten und Rohrkombinationen als Wärmequelle für die im Haus installierte Gaswärmepumpe verlegt. Die in Abbildung 127 dargestellte hydraulische Verschaltung erlaubt eine Umschaltung der Kollektoren im Betrieb.



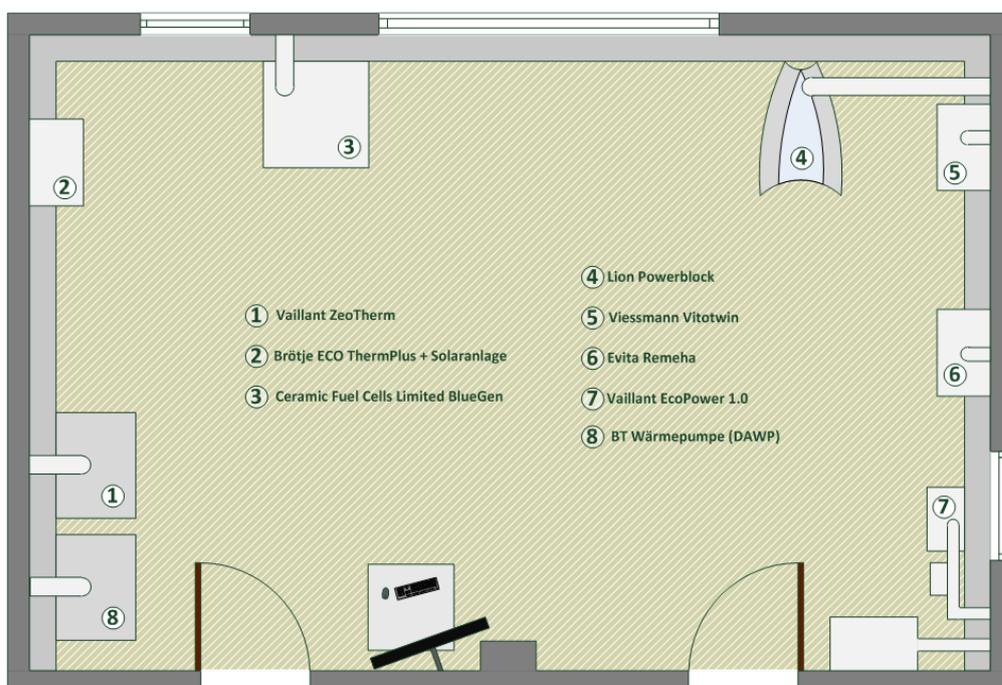
**Abbildung 127:** Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren

Die zwei Solarkollektoren (Abbildung 128) versorgen das Gasbrennwertgerät und die Gaswärmepumpe (System Vaillant) mit erneuerbarer Energie.



**Abbildung 128:** Solarthermiemodule für die Brennwert plus Solar- und Gaswärmepumpenanlage

Das Technologieangebot in der Gerätetechnik hat sich in den letzten Jahren enorm erweitert. Neben den klassischen Brennwertgeräten stehen hocheffiziente KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Brennstoffzellen unter Einbindung regenerativer Quellen wie Sonnenenergie oder Biogas und unter Berücksichtigung von Speichersystemen bereit. Das Zusammenspiel von Energiebedarfen, Gerätetechnik, Gebäude und Nutzer zu analysieren und zu optimieren ist eine der Kernkompetenzen am Gwi. Im Versuchshaus kann das Nutzerverhalten gezielt simuliert und die jeweiligen Auswirkungen mithilfe modernster Messtechnik detailliert erfasst und ausgewertet werden. Neben wissenschaftlichen Untersuchungen ist es zudem möglich, an den installierten Anlagen Schulungen, Demonstrationen und Informationsveranstaltungen durchzuführen.



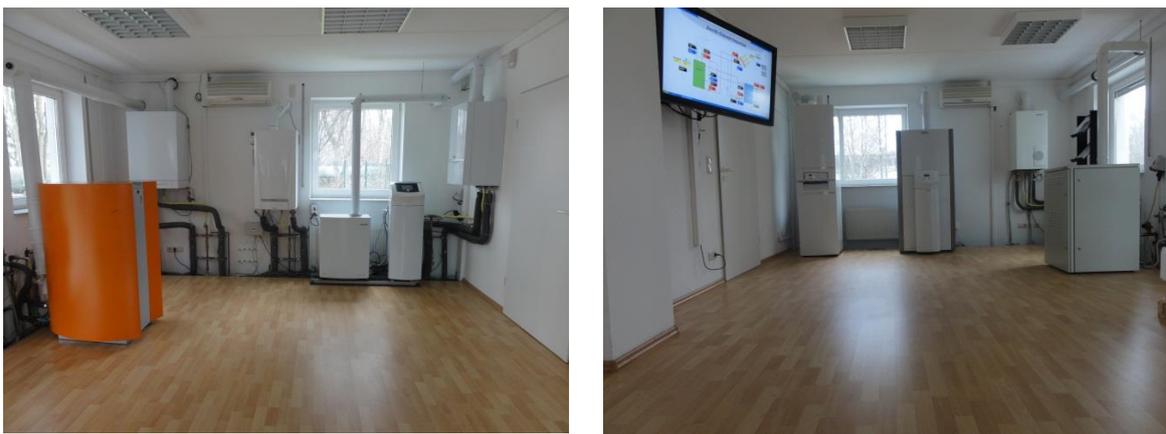
**Abbildung 129:** Aufstellungssituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe

In Abbildung 129 ist der derzeitige Installationsstatus im Versuchshaus schematisch dargestellt. Neben den in Projekt vermessenden Mikro-KWK-Geräten<sup>17</sup> sind Gaswärmepumpen und Brennwert plus Solar-Technologien

<sup>17</sup> Ausgenommen ecoPower 3.0, da dieser primär für Mehrfamilienhausanwendung eingesetzt wird.

installiert, um einen guten Überblick über den Stand der Technik und innovative Konzepte in der Heizungstechnik darzustellen. Sämtliche Messdaten werden auf einem 46“ LCD-Flachbildschirm mit Energieflüssen bzw. Temperaturen visualisiert, was insbesondere bei Schulungen von großem Vorteil ist.

Die folgenden Fotos (Abbildung 130) zeigen auf dem linken Foto die Mikro-KWK-Geräte und auf dem rechten Foto die Gaswärmepumpen sowie das Brennwertgerät und die Brennstoffzelle. Die Kombination aus Brennstoffzelle und Brennwertgerät übernehmen die Wärme- und Stromversorgung des Hauses, sodass alle anderen Geräte am resultierenden Bedarf geführt werden. Die dabei redundant bereitgestellte Wärme wird über den Trockenkühler abgeführt. Die Hydraulik ist so angelegt, dass im Prinzip jedes Gerät als „führendes“ Gerät betrieben werden kann. Alle Geräte verfügen über ihre eigene Systemtechnik mit zugehörigem Speicher, wie vom Hersteller ausgelegt. Der Installationsaufwand wird in Abbildung 131 deutlich.



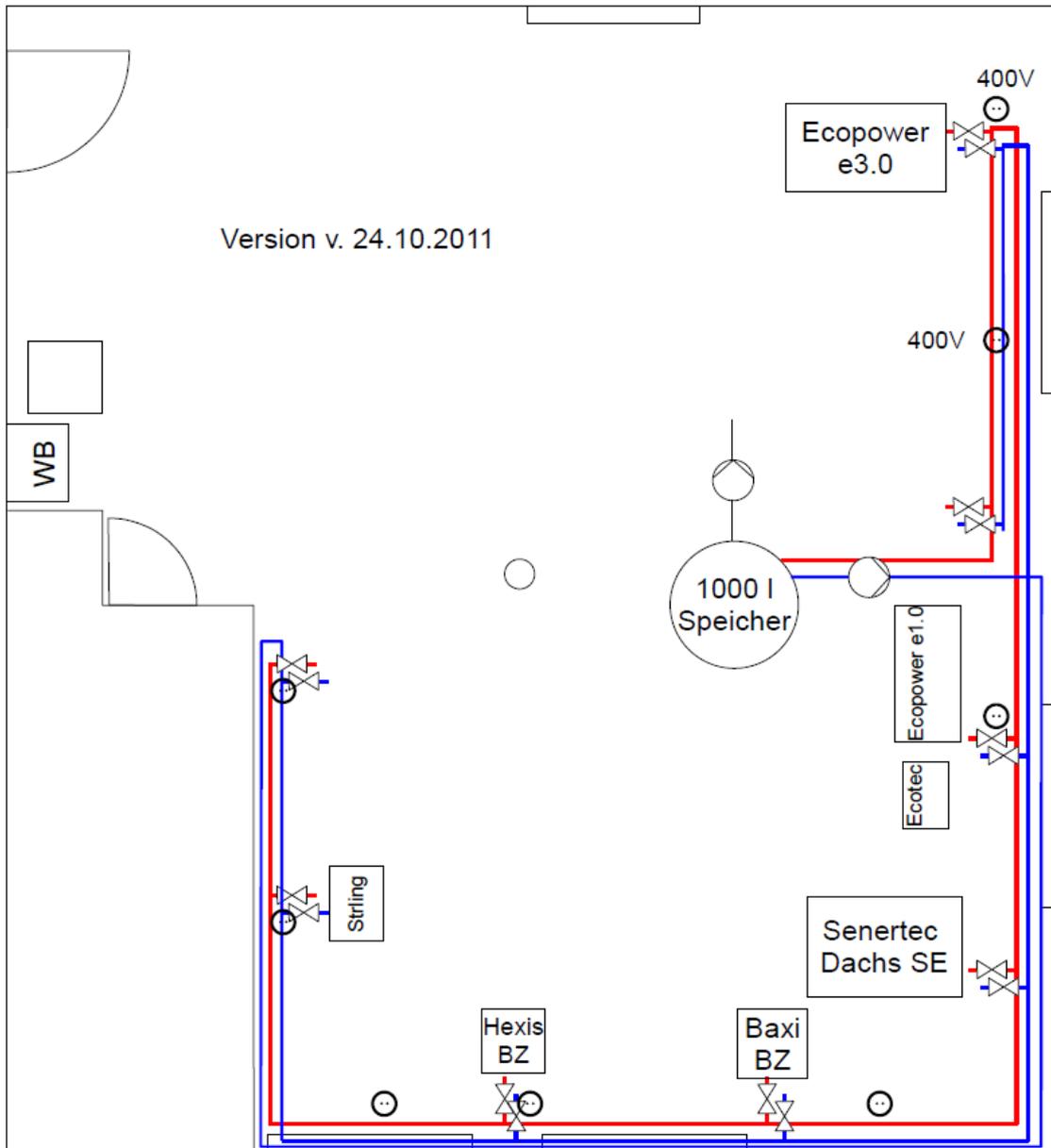
**Abbildung 130:** KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts)



**Abbildung 131:** Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen

#### **4.9.2 Democenter EBI**

Für das Democenter der DVGW-Forschungsstelle am EBI konnten während des Projektverlaufs die Stadtwerke Karlsruhe als Partner gewonnen werden. Der lokale Energiedienstleister stellte großzügige Räumlichkeiten in der Betriebsstelle Ost und übernahm auch Teile der Installation. Die Installation wurde gemäß Abbildung 132 so umgesetzt, dass die Mikro-KWK-Systeme über eine Ringleitung die Wärme in einen 1000 l Pufferspeicher einspeisen.



**Abbildung 132:** Grundriss und Aufstellungsplan des Democenters

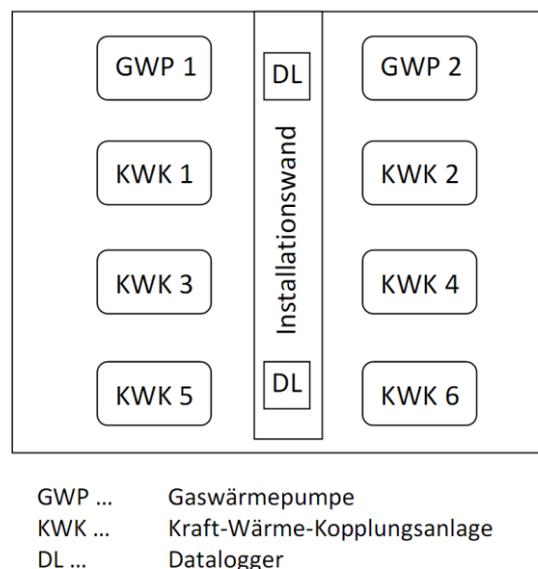
Aus diesem Pufferspeicher kann die Wärme dann über einen Wärmetauscher im darunterliegenden Heizungskeller in die Hauswärmeversorgung gefahren werden. Besonders vorteilhaft an der Objektwahl ist, dass über die Sozialräume der Stadtwerke in dieser Betriebsstelle ein relativ hoher ganzjähriger Bedarf an Warmwasser für Duschen besteht, damit liegen selbst für den Sommerbetrieb Wärmesenken speziell für die Brennstoffzellen vor. Die Wärme kann damit vor Ort genutzt werden und das Democenter unterstützt die installierte Heizungstechnik über eine angepasste Kaskadenschaltung. Der Strom wird in das Hausnetz bzw. in das öffentliche Netz eingespeist.

Durch den Partner bietet sich auch eine breitere Nutzungsperspektive, da der Partner das Democenter im Bereich Information und Contracting einsetzen kann. Die Forschungsstelle plant neben der Informationsplattform Democenter für Gas-Plus-Anwendungstechnologien, wie Mikro-KWK-Systeme und Gaswärmepumpen, dort auch moderne Energieerfassungssysteme, sogenannte Smart-Meter für Gas, Strom und Wärme im Verbund mit den Anwendungstechnologien zu zeigen. Als weitere Partner für das Democenter konnten einige Hersteller gewonnen werden, die ihre Mikro-KWK-Systeme (Viessmann Vitotwin 300-W), Pufferspeicher (Wikora) oder Smart-Meter (Itron Allmess, Landis & Gyr, Diehl Gas Metering) als Leihgabe zum Democenter beisteuerten. Die Leistungsdaten der Systeme werden über die Smart-Meter aufgezeichnet und visualisiert, um den Betrieb auch als Feldtest nutzen zu können. Die Installation wurde so konzipiert und umgesetzt, dass bis zu acht Systeme parallel angeschlossen werden können. Der Wechsel kann im laufenden Betrieb erfolgen, um z. B. eine neuere Generation eines Mikro-KWK-Systems vorstellen zu können.

Das Nutzungskonzept sieht neben den Betreibern Stadtwerke Karlsruhe und der Forschungsstelle die Einbindung des Handwerks und von Fachschulen vor. Für das Democenter steht vor Ort ein großer Seminarraum zur Verfügung. In dem sind regelmäßige Informationsveranstaltungen für das interessierte Publikum, wie Architekten, Energieberater, Handwerker und Hauslebauer geplant, die durch die Besichtigung des Demolabors mit der modernen Heiztechnik eine herstellerübergreifende Informationsplattform bieten. Die Inbetriebnahme erfolgte parallel zur Berichtserstellung zu Projektende.

### 4.9.3 Democenter DBI

Um die im Rahmen des Projektes geplante Technologie-Demonstration durchführen zu können, wurde zunächst damit begonnen, eine geeignete Räumlichkeit für das DVGW-Demonstrationszentrum „Gastechnologien“ auszuwählen, die den im Projektantrag dargestellten Anforderungen gerecht wird. Dabei sollte einerseits die Möglichkeit bestehen, eine ausreichend große Anzahl von Demonstrationsständen mit entsprechender Visualisierung installieren zu können, andererseits auch ausreichenden Platzbedarf für Schulungsveranstaltungen zu haben. Die Anforderungen erfüllte ein bereits für Schulungen verwendeter Raum, der im Rahmen der Rekonstruktion des Technikums saniert wurde und auch günstige Anschlussbedingungen für die benötigte Medienversorgung aufwies. Dieser Raum wurde unterteilt in einen Schulungsraum und dem eigentlichen Aufstellungsraum für die Technologiedemonstration.



**Abbildung 133:** Räumlicher Überblick des Demonstrationszentrums

Es erfolgte zunächst die Planung und Auslegung des hydraulischen Gesamtsystems, das nach der baulichen Fertigstellung der Räumlichkeiten installiert und mit dem vorhandenen Heizungssystem im Kopfbau des Technikums verbunden wurde. Das hydraulische System wurde für den Anschluss von acht Geräten ausgelegt, die gemäß dem in der Abbildung 133 dargestellten räumlichen Überblick aufgestellt werden können. Die Medienversorgung erfolgt über eine in der Mitte des Aufstellungsraumes einbaute Installationswand. Es ist vorgesehen, die zwei Gerätstellplätze an der Außenwand vorrangig für die Installation von

Gaswärmepumpen (Anschluss an geothermische Sonde) und die anderen sechs Stellplätze für den Anschluss von Mikro-KWK-Anlagen zu verwenden.

Um die im Demonstrationszentrum zu installierenden Geräte nach bestimmten Vorgaben betreiben zu können, wurde ein Regelungsschema erarbeitet und eine übergeordnete Regelung konzipiert. Die

Abbildung 134 zeigt das R&I-Fließschema des gesamten hydraulischen Systems sowie der installierten Mess- und Regeltechnik. Derzeit erfolgt die Umsetzung der Regelung, die nach Fertigstellung die Möglichkeit bieten soll, die innovativen Gasgeräte in folgenden drei Betriebsarten betreiben zu können:

- Automatikbetrieb (witterungs- und bedarfsabhängige Deckung des Wärmebedarfs)
- Demonstrationsmodus (kurzzeitiger Betrieb der Geräte zur Demonstration)
- Wärmepumpenmodus (vorrangiger Betrieb von Gaswärmepumpen mit niedrigeren Systemtemperaturen)

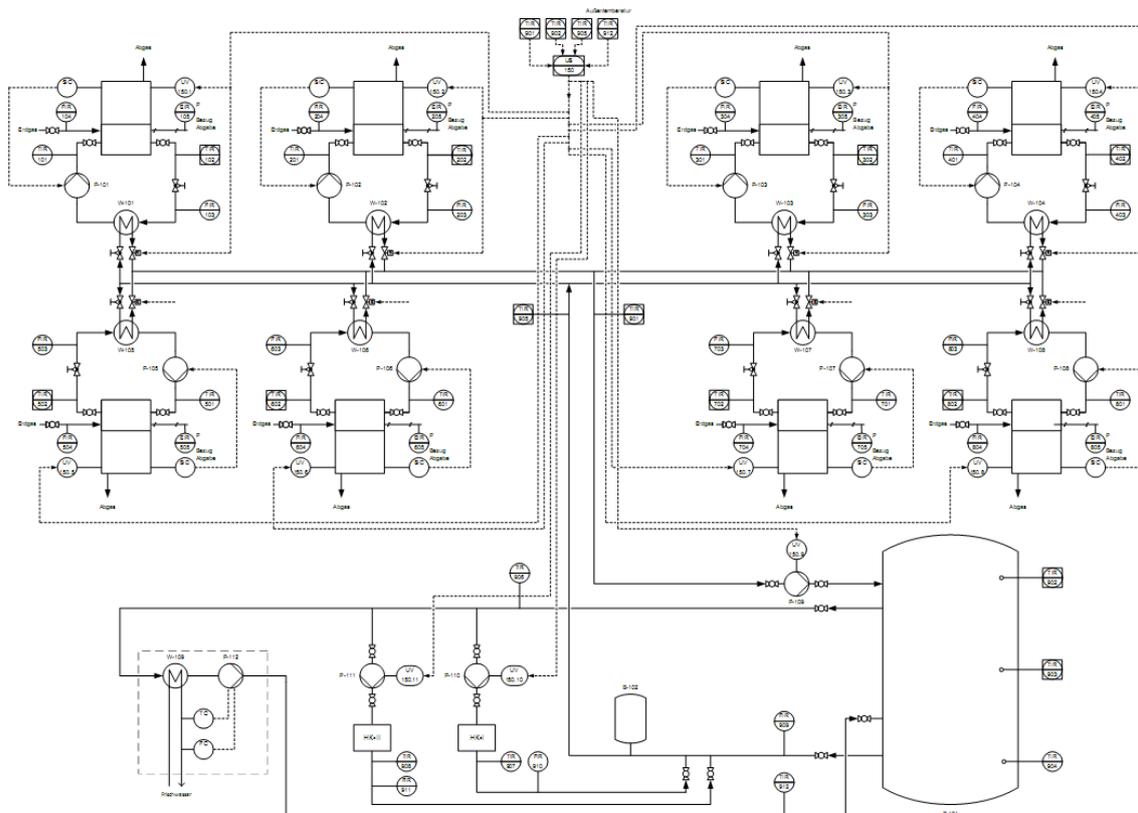


Abbildung 134: R&I-Fließschema des hydraulischen Systems

Die von den KWK-Anlagen erzeugte elektrische Energie wird im Technikum zur teilweisen Deckung des Energiebedarfs eingesetzt und verringert dadurch den Energiebezug aus dem öffentlichen Stromnetz. Die von den Geräten erzeugte Wärme wird jeweils über einen kleinen hydraulischen Primärkreis mit Hilfe eines Wärmeübertragers an einen sekundären Heizkreis (Sammelkreis) übertragen. Dieser transportiert die Wärme in einen 1000 l Pufferspeicher, der auch die Wärmeverteilung durch Entnahme aus unterschiedlichen Schichten übernimmt. Neben der Erzeugung von Warmwasser, das mit Hilfe eines Durchlaufwassermoduls erfolgt, werden zwei Heizkreise mit Wärme versorgt. Ein Heizkreis versorgt Werkstatt-, Aufenthaltsräume und den Schulungsraum mit Wärme, ein zweiter Heizkreis, der durch einen Wärmeübertrager hydraulisch getrennt ist, trägt zur Wärmeversorgung der im Erdgeschoß befindlichen DVGW-Prüfstelle bei.

In der Installationswand (Abbildung 135) befindet sich neben der Medienversorgung auch die für die äußere Bilanzierung der Geräte benötigte Messtechnik, deren Messdaten mit Hilfe von zwei Dataloggern als 1-Minutenmittelwerte aufgezeichnet werden. Die Datalogger dienen durch das integrierte Touchscreen-Display auch zur Visualisierung der Messdaten vor Ort und können durch die Möglichkeit der Programmierung von mehreren Benutzerbildschirmen die Mess- und Bilanzdaten jedes einzelnen Gerätes separat anzeigen. Die Abbildung 136 zeigt einen Datalogger mit einer gerätespezifischen Ansicht.



Abbildung 135: Installationswand mit Sichtöffnung und Schaltkasten



Abbildung 136: Datalogger mit gerätespezifischem Benutzerbildschirm

Die Abbildung 137 zeigt eine Ansicht der gegenwärtig im Demonstrationszentrum installierten KWK-Systeme, die im Dauertest arbeiten. Dabei handelt es sich um folgende Geräte:

- BlueGen (CFCL),
- WhisperGen EU1(EHE),
- lion<sup>®</sup>-Powerblock (OTAG).

Nach der Beendigung von Messaufgaben bzw. nach Anlieferung eines für den Dauertest vorgesehenen Gerätes ist die Installation von weiteren Geräten vorgesehen. Dabei handelt es sich um das eVita 25s (Remeha) und das microBHKW L 4.12 (KIRSCH GmbH).



**Abbildung 137:** Dauertest von Mikro-KWK-Geräten im Demonstrationszentrum am DBI

Die Abbildung 138 zeigt die Ansicht des Demonstrationszentrums mit dem im Vordergrund befindlichen Schulungsraum.



**Abbildung 138:** Ansicht des Demonstrationszentrums mit dem Schulungsraum

## 5 Handlungsempfehlungen

Aus den aufgeführten Ergebnissen dieser Studie lassen sich zahlreiche Handlungsempfehlungen für die verschiedensten Einsatzszenarien ableiten. Im Folgenden sind die wesentlichen, nahezu allgemeingültigen Erkenntnisse dargestellt, die sowohl für die Erschließung und Identifizierung von Anwendungspotenzialen als auch den Einsatz von innovativen Mikro-KWK-Systemen beachtet werden sollten:

- Zur wirtschaftlichen Optimierung sollte der Stromeigennutzungsanteil des KWK-Systems soweit wie möglich maximiert werden (Installationspraxis Stromzähler, technische Durchführbarkeit (Abfahren der Lastspitzen))
- Kosten für KWK-Systeme wettbewerbsfähiger machen (z.B. höhere Absatzzahlen, Subventionen / Marktanreizprogramme, längere garantierte Lebensdauer)
- Maximierung der Kundenzufriedenheit durch optimale Dimensionierung / Einsatz von KWK-Systemen inkl. des Wärmespeichers (Sensibilisierung Handwerk / Energieberater / Architekt / Entscheider)
- Ausweitung der Öffentlichkeitsarbeit (intensive Democenternutzung)
- Wirtschaftliche Vergleiche immer mit geeigneten Alternativen darstellen (z.B. Brennwert + Solar)
- Schulung von Schornsteinfeger im Hinblick auf die Emissionsmessung (z.B. CO<sub>2</sub>-Messung ecoPower 3.0)
- Schulung von Handwerkern und Fachunternehmen (einfache Installation, hydraulisch, abgastechisch)
- Vertrauen in die Technik und Hersteller schaffen z.B. über langfristige Wartungsverträge, Garantien etc.
- Vereinfachung und Schaffung von Transparenz im Hinblick auf Förderungen und die Vergütungen (auch Einsatz im MFH)
- Weiterentwicklung dynamischer Messmethoden (DIN 4709)
- Berücksichtigung von mehr Freiheitsgraden in Bezug auf die Systemauslegungen bei der Normungsentwicklung (Heiznetztemperaturen)

## 6 Forschungsbedarf

Neben den Handlungsempfehlungen sind im Laufe des Projekts interessante und verfolgungswürdige Fragestellungen aufgetreten, die im Rahmen von weiteren Forschungsprojekten vertieft betrachtet und analysiert werden sollten. Die folgende Auflistung enthält die wesentlichen Forschungsbedarfe im Bereich von möglichen Einsatzpotenzialen von Mikro-KWK-Systemen:

- Untersuchung des Betriebsverhaltens durch die Einbindung von Solarthermie in den Betrieb von KWK-Systemen
- Detaillierte Simulation des Betriebsverhaltens unter Berücksichtigung der An- und Abfahrvorgänge
- Möglichst allgemeingültige Kostenstudie zum Einsatz von Mikro-KWK-Systemen im Vergleich zu anderen innovativen Technologien
- Potenziale für den Einsatz von elektrischen Speichern zur Maximierung des Stromeigennutzungsanteils sowie Optimierung möglicher Kombinationen aus thermischen und elektrischen Speichern
- Entwicklung einer Prüfvorschrift für den kombinierten Strom- und Wärmegeführten Betrieb (DIN 4709-2)
- Entwicklung intelligenter, strom- und wärmebasierter Systemregelstrategien
- Vertiefende Untersuchung bezüglich möglicher KWK-Systeme in Kombination mit EWP als ein mögliches neues Betriebsmodell
- Ermittlung von Effizienzsteigerung durch modulierenden Betrieb von gekoppelten Systemen
- Life Cycle Assessment von Mikro-KWK-Systemen, möglicher Vergleich zu anderen Heizungstechniken zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen
- Weiterentwicklung eines Simulationsmodells in Bezug zur DIN 4709 bzw. einer allgemeinen dynamischen Untersuchung von KWK-Systemen

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie zur Ermittlung von Anwendungspotenzialen innovativer Gastechnologien mit dem Fokus auf Mikro-KWK-Systeme und Brennstoffzellen wurden unterschiedlichste Untersuchungen und Recherchen zum effizienten Einsatz von gekoppelten Systemen durch die involvierten Institute (GWI, EBI, DBI) durchgeführt. Im Marktsegment der Mikro-KWK-Systeme ist enormer Zuwachs an Geräten unterschiedlichster Technologien, deren spezifische Funktionsweisen und Eigenschaften möglichst allgemein dargestellt und erläutert wurden, zu erkennen. Weiterhin wurden unterschiedliche Contracting-Varianten aufgezeigt, die sowohl die ausgelagerte Finanzierung von KWK-Systemen als auch umfangreiche, nutzerfreundliche Betreiberkonzepte ermöglichen.

Die Auswertung der simulationsgestützten Eignungsvergleiche für den Einsatz von KWK-Systemen im Hinblick auf das Anlagenbetriebsverhalten und die Integration von thermischen Pufferspeichern liefert erste Erkenntnisse über die Auswirkungen des Speichers auf die Taktungen und zeigt auf, dass der Deckungsanteil des Stromeigenbedarfs im Wesentlichen von den Gleichzeitigkeiten der Wärme- und Stromanforderungen und der Anlagengröße abhängig ist.

Primärenergetische und somit ökologische Einsparpotenziale wurden über eine bilanzielle Untersuchung für Kombinationen aus Mikro-KWK-Systemen und Wärmepumpen aufgezeigt. Eine detaillierte Betrachtung und spezifische Optimierungen dieser Betriebsvariante werden als sinnvoll erachtet. Mögliche additive Wärmesenken, vor dem Hintergrund der Erschließung von Einsatzpotenzialen innovativer KWK-Systeme im Wohnungsneubau, sind über die thermische Substitution von elektrisch bereitgestellten, anlagenbedingten Warmwasserbedarfen von Wasch- und Spülmaschinen ermittelt und bewertet worden. Durch eine gekoppelte Bereitstellung des zusätzlichen Wärmebedarfs ist eine marginale Steigerung der Betriebszeit des betrachteten, hoch-effizienten Systems – einer Festoxid-Brennstoffzelle aufgrund der hohen Strom-kennzahl von 3,0 – realisierbar.

Die ganzheitliche Betrachtung des Mikro-KWK-Anwendungspotenzials im Wohngebäudebestand unter der Prämisse der Nutzung möglicher Synergien von energetischer Sanierung der Gebäudehülle und Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung beruht auf theoretischen Grundlagen und fokussiert sich auf die Simulation von Einflüssen verschiedener Eingangsvariablen sowie auf die anschließende Analyse und Interpretation der Ergebnisse. Sowohl durch den Einsatz von Dämmmaßnahmen als auch durch das Einsetzen von Kraft-Wärme-

Kopplung – sowohl bei der Einzelumsetzung als auch bei deren Kombination – können die vorhandenen Umweltbelastungen und Primärenergiebedarfe enorm vermindert werden. Die ökonomisch rentabelste Betriebsvariante orientiert sich an der Maximierung der Eigennutzung der gekoppelt bereitgestellten elektrischen Energie. Die wirtschaftlichste Dimensionierung liegt im Bereich des Übergangs von Stromeigenenutzung zur Einspeisung und ist weiterhin abhängig von der jährlichen Laufzeit des KWK-Systems. Die abgeleiteten Ergebnisse zeigen Optimierungspotenziale auf, die einen wirtschaftlichen Einsatz von Mikro-KWK-Systemen in Zukunft ermöglichen könnten. Die ökonomische Bewertung von Mikro-KWK-Anlagen im Rahmen dieser Studie stellt keinen Vergleich zu anderen, innovativen Technologien zur Wärmebereitstellung her. Eine weitere Untersuchung von Vergleichbaren Systemen sollte im Rahmen von künftigen Forschungsvorhaben durchgeführt werden.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurde eine große Bandbreite an KWK-Technologien und Geräten in den Laboren der Institute hinsichtlich der Wirkungsgrade und dynamischer Nutzungsgrade nach DIN 4709 vermessen. Neben den positiven Erfahrungen der einfachen Installation und Einbindung der Systeme, validieren die durchweg guten Messergebnisse auf den Prüfständen die Angaben der Hersteller und verdeutlichen die stetige Weiterentwicklung. Im Rahmen der langzeitigen, messtechnischen Untersuchung der Brennstoffzellen konnten zahlreiche Erfahrungen gesammelt werden, die für weitere Optimierungen dieser hocheffizienten, innovativen Gasanwendungstechnologie genutzt werden können.

Des Weiteren wurden Democenter zu Schulungszwecken unter anderem zur vereinfachten Veranschaulichung der Technologien an allen drei Institutsstandorten, vor dem Hintergrund der bundesweiten, flächenmäßigen Abdeckung, eingerichtet. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt ist ein reges Interesse sowohl der Öffentlichkeit als auch von Fachunternehmen zu erkennen. Diese positiven Außenwirkungen unterstreichen die Notwendigkeit des weiteren Ausbaus der Öffentlichkeitsarbeit im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung.

Die rasanten Fortschritte in der industriellen Weiterentwicklung der Systeme und die weiterführenden betrieboptimierenden Forschungsmöglichkeiten wurden besonders deutlich. Auf Grund der vielfältigen Optimierungs- und Einflussmöglichkeiten im Bereich der Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung besteht die Möglichkeit einen wirtschaftlichen Betrieb in Wohngebäuden in Zukunft zu ermöglichen. Aufgezeigt wurde weiterhin, dass durch den Einsatz von hocheffizienten Technologien zur dezentralen, gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme, ein essentieller Beitrag zur Schonung der vorhandenen Ressourcen und zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen geleistet werden kann.

## 8 Literaturverzeichnis

- [EON11] E.ON Thüringer Energie AG, Technik, [http://www.eon-thueringerenergie.com/Privatkunden/Energien\\_der\\_Zukunft/Feldtest\\_Mikro-KWK/Technik.html](http://www.eon-thueringerenergie.com/Privatkunden/Energien_der_Zukunft/Feldtest_Mikro-KWK/Technik.html), Stand: 21.Juli 2011
- [BAFA12] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle - Zuschuss für Mini-KWK-Anlagen, [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/mini\\_kwk\\_anlagen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/index.html), Stand: 24. Januar 2012
- [BP11] BP Europa SE, Grafik-Brennstoffzelle, <http://www.deutschebp.de/popuppreviewthreecol.do?categoryId=418&contentId=7013605>, Stand: 20. Juli 2011
- [DBI1] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH: Dampfbetriebene Mini-BHKW-Wissenschaftliche Begleitung eines Feldversuches zur Einführung von dampfbetriebenen Mini-BHKW-Systemen, Abschlussbericht, 30.06.2008, gefördert durch: DVGW, FKZ G 8/01/05
- [DBI2] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH: Wissenschaftliche Begleitung eines Feldversuches zur Einführung von dampfbetriebenen Mini-BHKW-Systemen, Abschlußbericht, Auftraggeber: GASAG Berliner Gaswerke AG
- [DBI3] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH: Wissenschaftliche Begleitung von Stirling-Mikro-KWK-Anlagen des Herstellers DeDietrich Remeha (HRe 28), 16.03.2011, Abschlußbericht, Auftraggeber: GASAG Berliner Gaswerke AG
- [DBI4] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH: Prüfstandstest und Monitoring eines WhisperGen EU1-Seriengerätes, Abschlussbericht, 15.09.2010, Auftraggeber: GASAG Berliner Gaswerke AG

- [UN97] Vereinte Nationen, Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, 1997
- [IEKP07] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm, Berlin, 05. Dezember 2007
- [IFT11] Institut für Thermodynamik, Universität Hannover, Die chemischen Vorgänge in einer Brennstoffzelle, <http://mathechemie.de/brenzel.htm>, Stand: 04. August 2011
- [TUD10] H.-D. Kühl, I. Geue, TU Dortmund, Stirling-basierte Mikro-KWK mit variablem Strom-Wärme-Verhältnis, Februar 2010, [http://www.cep-expo.de/fileadmin/user\\_upload/stirling/09.45\\_Hans-Detlev\\_Kuehl.pdf](http://www.cep-expo.de/fileadmin/user_upload/stirling/09.45_Hans-Detlev_Kuehl.pdf)
- [GEN11] Energetix Genlec Limited, Kingston in detail - Products - Genlec Limited, Oktober 2011, <http://www.genlec.com>
- [TUM06] A. Schuster, TU München, Der Organic Rankine Cycle – Anwendungen für KWK und Abwärmenutzung, Dezember 2006, [http://www.zae-bayern.de/files/schuster\\_zae-symposium06.pdf](http://www.zae-bayern.de/files/schuster_zae-symposium06.pdf)
- [GMK11] GMK - Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen mbH, Beschreibung des ORC-Prozesses, Oktober 2011, <http://www.gmk.info/ORC.133.html?/#>
- [UIS11] Umweltzentrum des Handwerks Thüringen - DBU – Projekte, Oktober 2011  
<http://uis.umweltzentrum.de/www/uis/dbuprojekte/?pid=FA192A3081>

- [SÖFW05] R. Stamminger, G. Goerdeler, Waschen in Deutschland – Auswertung einer Verbraucherbefragung, <http://www.landtechnik.uni-bonn.de/research/appliance-technology/publications/waschen-in-deutschland>
- [Öko09] V. Bürger, Öko Institut e.V., Identifikation, Quantifizierung und Systematisierung technischer und verhaltensbedingter Stromeinsparpotenziale privater Haushalte, Januar 2009, <http://oeko.de/oekodoc/980/2009-120-de.pdf>
- [Öko04] I. Rüdener, R. Griebhammer, Öko-Institut, PROSA Waschmaschinen - Produkt-Nachhaltigkeitsanalyse von Waschmaschinen und Waschprozessen, Dezember 2004, <http://www.oeko.de/oekodoc/257/2004-036-de.pdf>
- [TEST08] Stiftung Warentest, Stromfressern auf der Spur, 1/2008, <http://www.test.de/themen/haus-garten/meldung/Stromkosten-Stromfressern-auf-der-Spur-1609125-1608704/>
- [Fab07] S. Faberi et.al., Domestic Washing Machines & Dishwashers, Final Report, Dezember 2007, [http://www.ecowet-domestic.org/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=90&Itemid=40](http://www.ecowet-domestic.org/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=90&Itemid=40)
- [Öko06] I. Rüdener, Öko-Institut e.V., Geschirrspülmaschinen als EcoTopTen-Produkte, März 2006, [http://www.prosa.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/EcoTopTen\\_Endbericht\\_Spuelen.pdf](http://www.prosa.org/fileadmin/user_upload/pdf/EcoTopTen_Endbericht_Spuelen.pdf)
- [DIN 4701] Deutsches Institut für Normung, Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Vornorm, Beuth Verlag, Berlin, August 2003 unter Berücksichtigung der DIN SPEC 4701-10/A1, Oktober 2009

- [DIN 4108] Deutsches Institut für Normung, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Vornorm, Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003 unter Berücksichtigung der DIN V 4107-6 Berichtigung 1, März 2004
- [DIN 4709] Deutsches Institut für Normung, Bestimmung des Normnutzungsgrades für Mikro-KWK-Geräte bis 70 kW Nennwärmebelastung, Beuth Verlag, Berlin, November 2011
- [EEG] Gesetz der Bundesregierung, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, zuletzt geändert am 21. Juli 2011
- [KWKG] Gesetz der Bundesregierung, Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, zuletzt geändert am 27. Juli 2011
- [VDI 2067] Verein Deutscher Ingenieure, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen der Kostenberechnung, Entwurf, Beuth Verlag, Berlin, September 2010
- [VDI 4655] Verein Deutscher Ingenieure, Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2008
- [Ih100] Ihle, Claus et al., Tabellenbuch – Sanitär · Heizung · Lüftung, Gehlen Verlag, Bad Homburg vor der Höhe, 2000
- [IIED87] International Institute for Environment and Development, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, 1987

- [EN 832] Deutsches Institut für Normung, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude, Beuth Verlag, Berlin, unter Berücksichtigung der Berichtigung AC:2002, Juni 2003
- [EnEV] Verordnung der Bundesregierung, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, zuletzt geändert am 29. April 2009
- [IWU09] Institut für Wohnen und Umwelt, Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 Teil 1 – Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile in der energetischen Modernisierung von Altbauten – 3. vorläufiger Zwischenbericht, 17. Dezember 2009
- [IWU07] Institut für Wohnen und Umwelt, Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU, 12. November 2007
- [BMVBS09] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand, 30. Juli 2009
- [Dit98] Dittmann, Achim u. Zschernig, Joachim, Energiewirtschaft, Teubner Verlag, Wiesbaden, 1998
- [Bur04] Burger, Helmut et al., Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung, IKZ-HAUSTECHNIK, Strobel Verlag, Ausgabe 18/2004
- [BMW11] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 15. August 2011

- [Büc11] Bücherl, Christian, BHKW Preis: Kosten für Anschaffung, Betrieb, Wartung und Brennstoff eines Blockheizkraftwerks, <http://www.bhkw-ratgeber.de/kosten-erloese/bhkw-preis-kosten-fuer-anschaffung-betrieb-wartung-und-brennstoff-eines-blockheizkraftwerks/>, Stand: 01. August 2011
- [Mes11] Messerschmid, Rolf, Wartung Blockheizkraftwerk, <http://www.messerschmid-energiesysteme.de/wartung-instandhaltung.php>, Stand: 01. August 2011
- [Ros11] Roswandowicz , Holger, BHKW Antrieb, <http://www.bhkw-anlagen.com/blockheizkraftwerke/bhkw/bhkwantrieb/index.html>, Stand: 02. August 2011
- [Zie11] Ziehensack, Norbert, GLIZIE BHKW-Vollwartung, [http://www.glizie.de/service\\_vollwartung.htm](http://www.glizie.de/service_vollwartung.htm), Stand: 01. August 2011
- [Mär11] Märkel, Christian, Förderung von BHKW durch BAFA, EEG und KWK-Gesetz, <http://www.heizungsfinder.de/bhkw/foerderung/bafa>, Stand: 02. August 2011
- [EEX11] European Energy Exchange, KWK-Preis-EEX, [http://www.eex.com/de/document/52446/Phelix\\_Quarterly.xls](http://www.eex.com/de/document/52446/Phelix_Quarterly.xls), Stand: 08. Oktober 2011
- [DVGW10] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs, Systemanalyse – Abschlussbericht Teil I, Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern: Analyse der Energieflussketten der dezentralen Erzeugungsketten, 22. Dezember 2010

- [DVGW11] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs, Systemanalyse – Abschlussbericht Teil I, Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern: Nachfragestruktur, Bedarfs- und Bestandsanalyse, 13. Januar 2011
- [IEKP07] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm, Berlin, 05. Dezember 2007
- [VfW11] Verband für Wärmelieferung, Contracting-Formen, [http://www.energiecontracting.de/01\\_contracting/00\\_definition/formen.php](http://www.energiecontracting.de/01_contracting/00_definition/formen.php), Stand: 12. Oktober 2011
- [DIN 8930] Deutsches Institut für Normung, Kälteanlagen und Wärmepumpen - Terminologie - Teil 5: Contracting, Beuth Verlag, Berlin, November 2003
- [UoQ11] University of Queensland, This Week's Seminar was on Scroll Expanders - Geothermal Energy Centre of Excellence at The University of Queensland, Oktober 2011, <http://www.uq.edu.au/geothermal/this-week-s-seminar-was-on-scroll-expanders>
- [UBA11] Umweltbundesamt, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010 im Vergleich zum Stromverbrauch, <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>

- [KWKR] 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, 2004
- [KWKW] Entscheidung der Kommission vom 21. Dezember 2006 zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 2006
- [WGR92] RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: RICHTLINIE 92/42/EWG - Wirkungsgrade von mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen beschickten neuen Warmwasserheizkesseln. unter Berücksichtigung der Änderungen und Berichtigungen, 11. August 2005
- [EN297] Deutsches Institut für Normung e.V.: Heizkessel für gasförmige Brennstoffe - Heizkessel der Art B mit atmosphärischen Brennern, mit einer Nennwärmebelastung kleiner als oder gleich 70 kW. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2005
- [EN483] Deutsches Institut für Normung e.V.: Heizkessel für gasförmige Brennstoffe - Heizkessel des Typs C mit einer Nennwärmebelastung gleich oder kleiner als 70 kW. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2010

# A Anlagen

