



**Abschlussbericht zum Verbundprojekt**

**roadmap | KWK.NRW**  
Einsatz von KWK-Technologien in NRW –  
Detailfragestellungen und Forschungsagenda

Aktenz.: 64.65.69 – PRO - 0060 A



Diese Veröffentlichung ist wie folgt zu zitieren:

M. Schmidt, C. Spitta, V. Vrangos (Hrsg.): *roadmap | KWK.NRW – Einsatz von KWK-Technologien in NRW – Detailfragestellungen und Forschungsagenda*; Abschlussbericht zum Verbundprojekt; Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Lehrstuhl für Energietechnik und Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik der Universität Duisburg-Essen (2015).

Die Inhalte der Teilkapitel liegen in der Verantwortung der jeweiligen Institute und beziehen sich auf den Sachstand im April 2015, sofern nicht anders gekennzeichnet.

## **Autoren**

### **Gas- und Wärme-Institut Essen (GWI)**

Michael Schmidt  
Nadine Lefort  
Frederic Frankenhoff  
Dr. Manfred Lange  
Maren Wenzel  
Prof. Dr. Klaus Görner

### **Universität Duisburg-Essen**

#### **Lehrstuhl für Energietechnik (LET)**

Dr. Christian Spitta  
Othmar Verheyen  
Nicolas Witte  
Dr. Ulrich Gardmann  
Hubert Beyer  
Christian Budde  
Lothar Theves  
Michael Bonda  
Prof. Dr. Angelika Heinzl

### **Universität Duisburg-Essen**

#### **Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT)**

Dr. Vassilios Vrangos  
Dr. Gerd Oeljeklaus  
Fabian Graw  
Ashkan Hashemi  
Prof. Dr. Klaus Görner

Essen, November 2015

# Management Summary

## Motivation und Hintergrund

In Nordrhein-Westfalen, dem Bundesland mit dem größten Industrie- und Bevölkerungsanteil, wird etwa ein Drittel der deutschen Treibhausgase emittiert. Damit ist NRW für die Erreichung der deutschen Klimaschutzziele von höchster Bedeutung. Die Energiewende bietet Chancen aber auch Risiken für NRW. Diese können wegen der vielfältigen energietechnischen und energiewirtschaftlichen Einflüsse und der strukturellen Unterschiede des Landes, das durch ländliche Wohngebiete, urbane Ballungsräume und eine regional stark prägende Industrie gekennzeichnet ist, nur schwer abgeschätzt werden. Das Land NRW räumt dem effizienten Technologieprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für den notwendigen energetischen Strukturwandel und für die Erreichung der Klimaschutzziele eine wichtige Rolle ein. Um das NRW-Ziel zu erreichen, den KWK-Stromanteil bis 2020 auf mindestens 25 % der Nettostromerzeugung zu erhöhen, wurden vom Land verschiedene Förderbausteine entwickelt und ein Forschungscluster KWK - das Projekt **roadmap | KWK.NRW** - initiiert.

## Ziel des Projekts

Ziel der Studie **roadmap | KWK.NRW** war eine detaillierte technologische sowie ökologisch und ökonomisch erweiterte Bewertung der Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung im Bundesland NRW. Dazu wurden die Themenfelder „Erzeugung und Bedarfe“ sowie „Bewertung und Optimierung“ fokussiert.

Ziel des ersten Themenfeldes war die tiefgehende technologische Beschreibung und Bewertung verfügbarer KWK-Systeme aller Leistungsklassen sowie die Erarbeitung der Bedarfsstrukturen unterschiedlicher Bedarfsträger. Die Ergebnisse daraus dienten der Darstellung des derzeitigen technologischen Status und der Perspektiven für den Einsatz von KWK-Anlagen und ihren Peripherie-Technologien. Dabei wurden vor allem anlagen- und betriebstechnische Optimierungspotenziale fokussiert. Darüber hinaus war die Zuordnung der Systeme bzw. Leistungsklassen zu den ermittelten Bedarfsprofilen primäres Ziel des Themenfeldes. Im Rahmen einer globalen Betrachtung war die Darstellung von Synergieeffekten, Schnittstellen und Konkurrenzbereichen der leistungsklassenübergreifenden KWK-Systeme Teil der Zielsetzung.

Übergeordnetes Ziel des zweiten Themenfeldes war die Analyse von Verbesserungspotenzialen hinsichtlich der Betriebsweise von KWK-Systemen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Peripherie-Systeme. Dazu sollten sowohl die technische und ökologische Optimierung von KWK-Anlagen als auch die wirtschaftliche Situation des Anlagenbetriebs detailliert beschrieben und beurteilt werden. Die Bearbeitung von Detailfragestellungen zur optimierten Auslegung thermischer und elektrischer Speicher sowie zum Einfluss der Anlagenlaufzeit und

des Stromeigennutzungsanteils auf die Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen stellten hier zwei wesentliche Teilziele dar. Diesbezüglich stellten die Ableitung einer zeitabhängigen, bedarfsorientierten Stromkennzahl sowie die Kosten/Nutzen-Analyse und Sensitivitätsbetrachtung des Ausbaus von Speicherpotenzialen wesentliche Aspekte der Zielsetzung dar.

Die Ergebnisse der Studie ermöglichen durch die Steigerung der Attraktivität hocheffizienter KWK-Systeme deren besseren Positionierung am Markt. Dies soll wesentlich durch die projektbegleitende Ausarbeitung eines leistungsklassenübergreifenden Handlungsleitfadens für den optimierten Einsatz von KWK-Systemen in NRW unterstützt werden.

### **Methodisches Vorgehen**

Im Rahmen dieses Projekts wurden der Entwicklungs- und Verfügbarkeitsstatus sowie die Kosten und die Potenziale leistungsklassenübergreifender KWK-Systeme untersucht und vergleichbar zusammengefasst. Für die weiteren Betrachtungen wurden Beschreibungen von alternativen Wärmebereitstellungssystemen sowie Wärme- und Stromspeichern als technische Grundlage sowie als einheitliche Datenbasis erarbeitet.

Die gegenwärtigen und zukünftigen Wärmebedarfsstrukturen in den Bereichen Wohngebäude, Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD) und den unterschiedlichen Industriebranchen in NRW sowie eine grobe räumliche Verteilung von Wärmebedarfen sind in Abhängigkeit möglicher Einsatzbereiche für KWK-Anlagen erarbeitet worden. Darüber hinaus wurden die aktuelle und die zukünftige fluktuierende Einspeisung erneuerbarer Energien untersucht.

Für die ökologischen und ökonomischen Analysen wurden zunächst eine einheitliche Bewertungsgrundlage definiert, die Rahmenbedingungen der Förderlandschaft zusammengefasst und potenzielle Betriebsstrategien von KWK-Systemen leistungsklassenübergreifend erarbeitet und bewertet.

Auf dieser fundierten Grundlage erfolgte eine Bewertung und theoretische Optimierung von KWK-Systemen sowie von integrierten Anlagensystemen zur Objektversorgung. Modellhafte Untersuchungen und Sensitivitätsbetrachtungen für den Wohngebäude- sowie den GHD-Sektor sowie dynamische Simulationen von KWK-Systemen in Kombination mit thermischen und elektrischen Speichern wurden durchgeführt.

Für die zu erstellende Forschungsagenda wurden ergänzend zu den eigenen Arbeiten drei Expertenworkshops zu den Themen Erzeugungstechnologien, Speicher und Netze organisiert und durchgeführt, in denen mit unterschiedlichen Stakeholdergruppen Forschungsfragestellungen erarbeitet wurden. Relevante Aspekte dieser Workshops wurden in die KWK Forschungsagenda NRW eingearbeitet.

Weiterhin wurde innerhalb des Projekts das **Virtuelle Institut | KWK.NRW** gegründet. Durch die Weiterführung und Erweiterung dieses Instituts kann ein nachhaltiger Beitrag zur Forschung und Entwicklung des multiplen und komplexen Themenfeldes der KWK sichergestellt werden. Die Fortschreibung der Forschungsagenda ist dabei ebenso wichtig, wie die enge Vernetzung der wissenschaftlichen Einrichtungen unter Einbeziehung der Kontakte zur Industrie, zu Versorgern und Betreibern von KWK-Systemen.

## Ergebnisse und Kernaussagen

Durch steigende Energieeffizianzorderungen im Wohngebäudesektor, insbesondere aufgrund politischer Vorgaben, ist ein sinkender flächenspezifischer Wärmebedarf zu erwarten. Auch im Rahmen des Projektes konnte nachgewiesen werden, dass sowohl für moderne Niedrigstenergie- sowie Bestandsobjekte unterschiedliche KWK-Technologien als potenzielle Systeme zur Wärme- und Strombereitung zur Verfügung stehen.

Die wärmeseitigen Bedarfe im GHD-Sektor sind stark von der jeweiligen Branche abhängig und sind z. T. nicht branchenspezifisch verfügbar. Der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung ist bereits in einigen Branchen verbreitet, wobei in diesen sowie in anderen Branchen noch große Potenziale für den Einsatz von KWK vorhanden sind.

Die in den letzten fünf Jahren in diversen Studien für unterschiedliche Industriebranchen aufgezeigten Potenziale für den Ausbau der KWK zur Deckung des Wärmebedarfs sind weiterhin gültig und ausbauwürdig. Entwicklungen in manchen Industriebranchen lassen sogar eine Zunahme des Potenzials bis 2030 erwarten.

➤ **Die Entwicklung der Wärmebedarfe in den verschiedenen Sektoren ist unterschiedlich. KWK Potenziale sind im hohen Maße vorhanden.**

Der forcierte Ausbau der erneuerbaren Energien wird zunehmend auch zu stärkeren Schwankungen im Nieder- und Mittelspannungsnetz führen. Da in diesen Netzebenen auch KWK-Anlagen im Wohngebäude- und GHD-Sektor einspeisen, erhöht sich somit die Notwendigkeit einer flexibleren Fahrweise von KWK in diesem Leistungsbereich. Andere Studien belegen diese Notwendigkeit insbesondere auch für große KWK-Anlagen der allgemeinen Versorgung. Diese erforderliche Flexibilität können KWK-Anlagen – insbesondere in Kombination mit thermischen und elektrischen Speichern – gut leisten.

➤ **Die fluktuierende Einspeisung von erneuerbaren Energien führt zunehmend auch auf der Nieder- und Mittelspannungsebene zu Stabilitätsproblemen. Flexible KWK kann hier einen Beitrag zur Versorgungssicherheit und -stabilität leisten.**

Die Analysen von KWK zur reinen Objektversorgung haben gezeigt, dass der GHD-Sektor ein rentables Anwendungsgebiet für den Einsatz von KWK-Anlagen sein kann. Darüber hinaus existiert hier auch ein hohes Potenzial zur Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung. In Bereichen, in denen das Strombedarfsprofil starken Schwankungen unterliegt, ist die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall zu überprüfen. Darüber hinaus haben die förderrechtlichen Rahmenbedingungen weit reichende Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer KWK-Anlage.

Der wirtschaftliche Einsatz von KWK im Wohngebäudesektor ist aufgrund der derzeitigen hohen Investitionskosten in Mehrfamilienhäusern kaum bzw. in Einfamilienhäusern nur schwer möglich. Weitere Faktoren wie der elektrische Wirkungsgrad und die Strompreise haben ebenfalls einen signifikanten Einfluss, welcher jedoch klein gegenüber den Investitionskosten ist. Mittels der Flankierung durch Markteinführungsprogramme und einer resultierenden Stei-

gerung der Stückzahlen einhergehend mit Skaleneffekten, können diese Investitionskosten zukünftig auf ein wirtschaftliches Maß reduziert werden. Der Ausbau von KWK im Wohngebäudesektor würde zu einer erheblichen CO<sub>2</sub>- und Primärenergie-Einsparung führen.

- **In Modelluntersuchungen im Wohngebäude- und GHD-Sektor konnten gegenüber den Referenzszenarien mehr als 25 % CO<sub>2</sub> und Primärenergie eingespart werden.**
- **Die Wirtschaftlichkeit von KWK im Wohngebäude- und GHD-Sektor muss im Einzelfall geprüft werden.**

Neben den Investitionskosten stellt der Anteil an selbstgenutztem KWK-Strom (Stromeigen-nutzungsanteil) eine zentrale Kenngröße zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen in der Objektversorgung dar. Bereits durch den Einsatz von kleinen elektrischen Speicherkapazitäten kann eine Erhöhung dieser Kenngröße und somit ein wirtschaftlicherer Betrieb bei einer wärmegeführten Fahrweise erreicht werden. Anhand der systemischen Ergebnisse kann ferner abgeleitet werden, dass durch eine speicherorientierte Anpassung der Systemregelung eine weitere Steigerung dieser Kenngröße zu erwarten ist.

- **Durch den Einsatz von KWK mit Stromspeichern kann in Wohnobjekten der Stromeigen-nutzungsanteil erhöht werden.**

Die erarbeitete KWK Forschungsagenda für das Bundesland NRW stellt eine umfassende Übersicht über die relevanten Forschungsthemen für den leistungsklassenübergreifenden Ausbau von KWK in Nordrhein-Westfalen dar.

- **Forschungsagenda für leistungsklassenübergreifenden Ausbau von KWK in NRW.**







# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>MOTIVATION UND HINTERGRUND .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MARKTSCREENING UND TECHNISCHE OPTIMIERUNG.....</b>	<b>3</b>
2.1	Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung .....	4
2.1.1	Stirling-Motor.....	4
2.1.2	Mikro-Gasturbine .....	5
2.1.3	Verbrennungsmotor.....	7
2.1.4	Brennstoffzellen .....	10
2.1.5	Gasturbine .....	15
2.1.6	Dampfturbine .....	18
2.1.7	Optionen der Wärmeverstromung.....	19
2.2	Alternative Systeme zur Wärmebereitstellung .....	22
2.2.1	Heizwertkessel .....	22
2.2.2	Niedertemperaturkessel.....	23
2.2.3	Brennwertkessel .....	24
2.2.4	Solarkollektoren .....	25
2.2.5	Holzpelletkessel .....	27
2.2.6	Holzhackschnitzelkessel.....	29
2.2.7	Scheitholzessel .....	31
2.2.8	Wärmepumpe .....	33
2.2.9	Stromheizung .....	35
2.3	Thermische Speichersysteme.....	37
2.3.1	Sensible Speicher .....	37
2.3.2	Latentwärmespeicher .....	39
2.3.3	Thermochemische Speicher .....	40
2.4	Elektrische Speichersysteme.....	41
2.4.1	Blei-Säure-Batterien.....	41
2.4.2	Lithium-Ionen-Batterien.....	42
2.4.3	Hochtemperatur-Batterien.....	43
2.4.4	Redox-Flow-Batterien.....	44

<b>3</b>	<b>ERMITTLUNG DER BEDARFSSTRUKTUREN .....</b>	<b>47</b>
3.1	Energiebedarfe im Wohngebäude-Sektor .....	48
3.1.1	Ermittlung der Jahresenergiebedarfe .....	48
3.1.2	Beschreibung von Jahreslastgängen .....	53
3.1.3	Tageslastgänge .....	54
3.1.4	Räumliche Bedarfsverteilung .....	55
3.2	Wärmebedarfe im GHD-Sektor .....	58
3.2.1	Strukturierung des GHD-Sektors .....	59
3.2.2	Vorgehensweise bei der Ermittlung des Wärmebedarfs .....	60
3.2.3	Wärmebedarfe der verschiedenen Bereiche .....	64
3.2.4	Potenziale für die Kraft-Wärme-Kopplung im GHD-Sektor .....	65
3.2.5	Räumliche Bedarfsverteilung .....	66
3.3	Wärmebedarfe im Industrie-Sektor .....	70
3.3.1	Wärmebedarfsermittlung aus Endenergieverbrauch im Jahr 2012.....	70
3.3.2	Wärmebedarfsermittlung aus Wärmebedarfen für BRD .....	73
3.3.3	Endenergieverbrauch einzelner Industriebranchen in NRW .....	74
3.3.4	KWK Wärmeerzeugung in der Industrie.....	75
3.3.5	Entwicklung des Wärmebedarfes bis 2020 und 2030 .....	76
3.3.6	Räumliche Bedarfsverteilung .....	78
3.4	Strombedarfe bei fluktuierender Einspeisung von EE-Strom.....	81
3.4.1	Stromverbrauch und -Erzeugung in NRW und in Deutschland .....	81
3.4.2	Entwicklung der EE-Stromerzeugung in Deutschland und NRW .....	84
3.4.3	Einfluss des EE-Stroms auf Strombedarfe und -Preise .....	88
<b>4</b>	<b>FÖRDERLANDSCHAFT UND BETRIEBSSTRATEGIEN.....</b>	<b>93</b>
4.1	Förderlandschaft.....	94
4.1.1	Fördermaßnahmen auf Bundesebene .....	94
4.1.2	Fördermaßnahmen des Landes Nordrhein-Westfalen .....	106
4.1.3	Förderprogramme in anderen Bundesländern .....	113
4.1.4	Vermiedene Kosten durch Eigenstromerzeugung .....	113
4.1.5	Steuerliche Behandlung von KWK-Anlagen .....	115
4.2	Betriebsstrategien .....	116
4.2.1	Grundlegende Fahrweisen von KWK-Anlagen.....	116
4.2.2	Begriffe und technisches Umfeld .....	117
4.2.3	Vermarktungsmöglichkeiten .....	126
4.2.4	Fahrweisen und Betriebsstrategieoptionen.....	130

<b>5</b>	<b>MODELLE ZUR BEWERTUNG .....</b>	<b>135</b>
5.1	Bewertungsgrundlagen .....	136
5.1.1	Wirtschaftliche Bewertung.....	136
5.1.2	Ökologische und Energetische Bewertung .....	137
5.2	Analyse von KWK-Techniken für ausgewählte Objekte.....	140
5.2.1	Methodisches Vorgehen.....	140
5.2.2	Untersuchte Objekte .....	144
5.2.3	Auswertung der Objekte.....	146
5.2.4	Sensitivitätsanalysen .....	153
5.2.5	Zusammenfassung und Ausblick .....	158
5.3	Erweiterte Bewertung von kombinierten Speichersystemen .....	160
5.3.1	Methodischer Ansatz.....	160
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	164
5.3.3	Zusammenfassung und Ausblick .....	171
<b>6</b>	<b>FORSCHUNGSAGENDA.....</b>	<b>173</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>185</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>205</b>



# 1 Motivation und Hintergrund

Nordrhein-Westfalen ist mit über 17,5 Millionen Einwohnern das bevölkerungsreichste Bundesland Deutschlands. Einzigartig ist der Ballungsraum Rhein-Ruhr im Zentrum des Landes. Dieser bildet mit rund zehn Millionen Einwohnern eine der größten Metropolregionen Europas und beinhaltet 29 von 80 deutschen Großstädten. Dagegen ist das Land im Norden und Süden vergleichsweise dünn besiedelt und bildet damit eine inhomogene Bevölkerungsdichte. Folglich bildet das Land durch diese Vielfalt alle Bedarfsprofile ab, die sich von den Bereichen Ein- bis Mehrfamilienhäuser über Gewerbe-Handel-Dienstleistung, aber auch die Industrie, erstreckt.

Des Weiteren zählt Nordrhein-Westfalen zu den wichtigsten Wirtschaftszentren der Welt. Im Jahr 2012 erreichte es mit einer Beteiligung von rund 22 % am deutschen Bruttoinlandsprodukt die höchste Wirtschaftsleistung Deutschlands. Dominierende Energieträger sind derzeit Braun- und Steinkohle. Dementsprechend produziert NRW alleine mehr als ein Drittel der deutschen Treibhausgasemissionen. Die Rolle des Landes für die Erreichung der Klimaschutzziele ist damit von höchstem Stellenwert.

Das Ziel der Landesregierung ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 25 % sowie eine Erhöhung des Anteils der durch KWK-Anlagen erzeugten Strommenge auf über 25 % bis 2020 (Referenz 1990). Für die Erreichung dieses Ziels ist es eine der großen gesellschaftlichen Herausforderungen, das bestehende fossil dominierte Energieversorgungssystem zu einem klimafreundlichen und zugleich sicheren sowie bezahlbaren System zu transformieren. Der Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien gemäß den Zielen von Bund und Land wird mittelfristig dazu führen, dass das zeitliche und örtliche Stromangebot nicht zur Nachfrage passt. Dementsprechend ist das zukünftige Energieversorgungssystem deutlich flexibler auszugestalten. Neben dem Netzausbau auf allen Ebenen und der Flexibilisierung des bestehenden Kraftwerksparks werden zunehmend auch Energiemanagementoptionen und Speicherkapazitäten benötigt.

Durch den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung können die vorhandene Primärenergie effizienter genutzt und infolgedessen vorhandene Ressourcen geschont werden. KWK-Systeme sind überwiegend flexibel regelbar und eignen sich daher auch für den Einsatz in Smart-Grids. Ein vielversprechender Ansatz bietet hierbei die Vernetzung und bedarfsgerechte Steuerung von dezentralen KWK-Anlagen in virtuellen Kraftwerken und damit eine mögliche Lastverschiebung von der zentralen zur dezentralen Energieerzeugung. Anhand der flexiblen Regelung können die Systeme auf die schwankenden Angebots- und Nachfragesituationen im Stromnetz kurzfristig reagieren und als Ausgleich dienen. Infolge des steigenden Anteils der fluktuierenden erneuerbaren Energien im Netz wird die Flexibilität der KWK-Anlagen diesbezüglich an Bedeutung gewinnen. KWK ist die hocheffiziente und umweltfreundliche Lö-

sung beim Übergang von der fossilen elektrischen Energieerzeugung in die elektrische Energieerzeugung mittels erneuerbaren Energien.

Abbildung 1 symbolisiert das mit diesem Bericht zusammengefasste sowie zukünftige hierauf aufbauende Verbundprojekt. Illustriert wird die leistungsübergreifende Erzeugung und Nutzung von KWK in NRW. Diese reicht vom Sektor der Wohngebäude, in dem eine Energiebereitstellung durch hocheffiziente Mikro-KWK-Anlagen gewährleistet werden kann, über größere Blockheizkraftwerke in den Bereichen Gewerbe-Handel-Dienstleistung bis hin zum Einsatz von Groß-KWK-Anlagen im industriell geprägten Bereich sowie zur allgemeinen Versorgung.

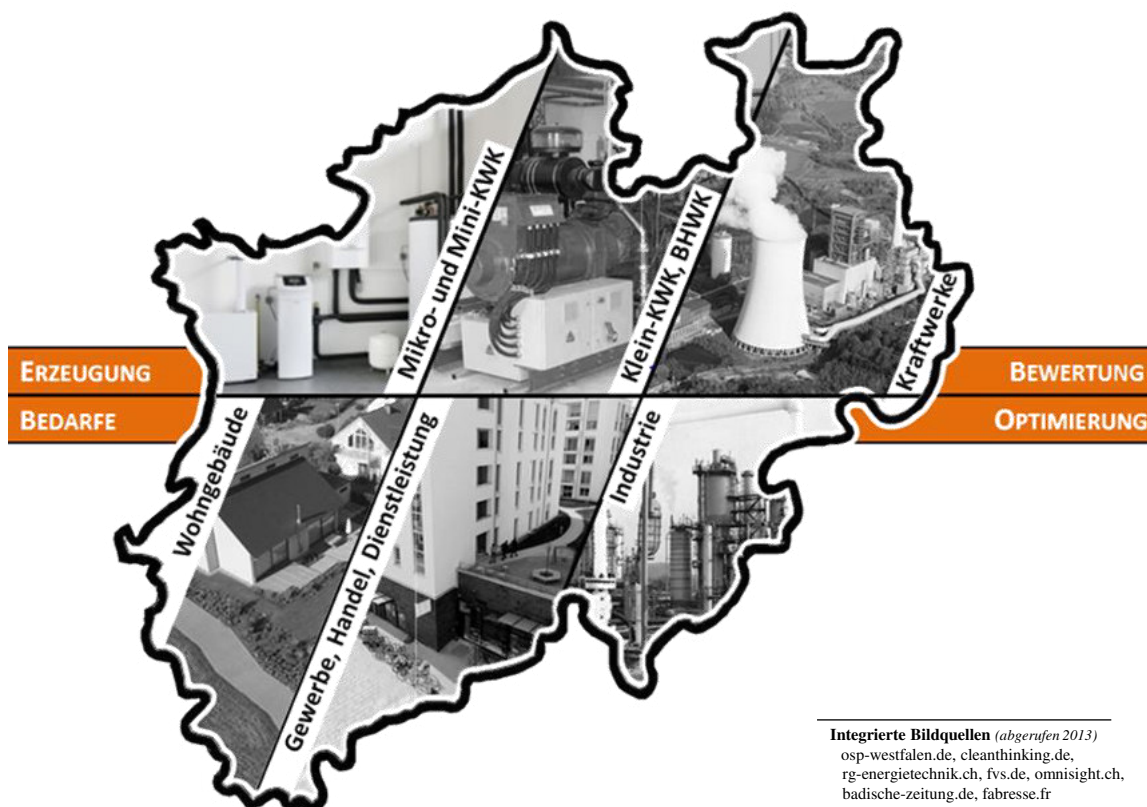


Abbildung 1: Illustration zum Verbundprojekt roadmap | KWK.NRW

Die große Bandbreite an Erzeugungsstrukturen lässt sich in eine Vielzahl von unterschiedlichsten Bedarfsprofilen integrieren. Kraft-Wärme-Kopplungssysteme können somit in vielen verschiedenen Bereichen als hocheffiziente Technologie zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung eingesetzt werden. Optimierungsmöglichkeiten für KWK-Technologien sind vielfältig und werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Durch einen Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und unter Berücksichtigung des Speicherpotenzials in NRW kann ein zusätzlicher Anreiz zur Entwicklung innovativer Erzeugungs- und Speichertechnologien geschaffen werden. Dieser Impuls wirkt darüber hinaus auf ansässige Unternehmen, sodass positive Einflüsse auf die lokale Wirtschaft erwartet werden. Der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung kann zusätzlich die intelligente Flexibilisierung des Energieversorgungssystems unterstützen und dazu beitragen, den Industriestandort NRW zu sichern und gleichzeitig klimafreundlicher und ressourcen-effizienter zu gestalten.

## 2 Marktscreening und technische Optimierung

*Im Rahmen des Marktscreenings wurden KWK-Systeme und alternative Wärmebereitstellungssysteme sowie thermische und elektrische Speicher hinsichtlich ihres derzeitigen Entwicklungsstandes, der technologischen und funktionellen Eigenschaften sowie der Kostenstruktur beschrieben. Diese Beschreibung basiert auf der Darstellung des „Standes der Technik“ und der Zusammenfassung der relevanten technischen Parameter der unterschiedlichen Systeme. Darauf basierend werden Anwendungsgrenzen und Hemmnisse aufgezeigt, welche unter anderem durch die verfügbaren Leistungsklassen, technischen Voraussetzungen sowie System- und Betriebskosten beeinflusst werden. Die durchgeführte Marktanalyse und Auswertung der jeweiligen Fachliteratur ermöglicht die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und der bestehenden Entwicklungspotenziale der einzelnen Technologien. Hinsichtlich der Weiterentwicklung werden darüber hinaus system- und betriebstechnische Optimierungsansätze aufgezeigt.*

*Der Markt für KWK-Systeme wird aktuell von Anlagen mit Verbrennungsmotoren dominiert. Weitere KWK-Technologien, die im Rahmen der Marktscreenings als etabliert oder zukunftsfähig identifiziert wurden, sind Stirling-Motoren, Mikro-Gasturbinen, Brennstoffzellen sowie Gas- und Dampfturbinen und deren Kombination als Gas- und Dampfturbinen-Anlage. Konventionelle und innovative Alternativsysteme wurden im Zuge der Vergleichbarkeit ebenfalls bewertet. Als relevant für den Wärmemarkt haben sich Heizwert-, Niedertemperatur- und Brennwertkessel sowie Solarkollektoren, Wärmepumpen, Stromheizungen und Systeme auf Basis biogener Festbrennstoffe herausgestellt.*

*Thermische und elektrische Speicher gelten als zentrale Peripherie-Technologie der KWK. In diesem Zusammenhang wurden am Markt etablierte sowie in der Entwicklungsphase befindliche Technologien hinsichtlich ihrer Speichereigenschaften und den daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten, Stärken und Schwächen untersucht. Relevant für den KWK-Sektor sind im Bereich der Wärmespeicher sensible, latente sowie thermochemische Speicher, im Bereich der Stromspeicher Blei-Säure-, Lithium-Ionen-, Hochtemperatur- und Redox-Flow-Batterien.*

## 2.1 Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung

### 2.1.1 Stirling-Motor

Der Stirling-Motor nutzt die Expansionsenergie eines im Zylinderraum des Motors eingeschlossenen Arbeitsgases, welche von einer äußeren Wärmequelle mit Energie gespeist wird. Im Stirling-Motor gibt es einen heißen und einen kalten Raum, zwischen denen das Arbeitsgas hin- und her bewegt wird. Dem heißen Raum wird laufend Wärme zugeführt, und vom kalten Raum wird laufend Wärme abgeführt. Das zwischen den beiden Räumen bewegte Arbeitsgas strömt zur Wärmerückgewinnung durch einen Regenerator, in dem die Wärme aus der Phase der Strömung des heißen Gases in den kalten Zylinderraum zwischengespeichert wird. So kann es für die Phase der Rückströmung des aufzuheizenden kalten Gases in den heißen Zylinderraum genutzt werden.

Im Grunde kann im Stirling-Motor jede Wärmequelle zur Beheizung des Arbeitsgases verwendet werden. Üblicherweise handelt es sich dabei um Wärme aus der Verbrennung von konventionellen oder regenerativen Brennstoffen. Da eine äußere Verbrennung bezüglich der Emissionen besser als die innere Verbrennung eines Kraftstoffgemisches im Motor optimiert werden kann, weist der Stirling-Motor niedrigere Emissionen auf.

Nach dem Stirling-Motorprinzip gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Bauformen von KWK-Anlagen mit einer unterschiedlichen Zahl von Kolben und Zylindern und auch unterschiedlichen Geometrien. Als Arbeitsgas wird meistens das thermodynamisch günstige und gefahrfreie Helium verwendet. Bei modernen Stirling-Motoren sind die Heliumverluste sehr gering.

Der Stirling-Motor selbst ist zuverlässig und wartungsfreundlich. Es gibt keine Verbrennungsrückstände im eigentlichen Motor und keine Schmierprobleme. Die Wartungsintervalle sind wesentlich länger als bei Verbrennungsmotoren.[1]

Die im kalten Raum abzuführende Wärme wird im KWK-Betrieb als Nutzwärme (Warmwasserbereitung und Heizwärme) bereitgestellt.

Der Stirling-Motor hat sich für KWK-Anwendungen in privaten Haushalten mit einer elektrischen Leistung von ca. 1 kW etabliert. Hierzu korrespondierend steht je nach erzielbarer Stromkennzahl – dem Verhältnis von elektrischer Leistung zu thermischer Leistung – eine Nutzwärmeleistung von ca. 5 bis 7,5 kW zur Verfügung.

Prinzipbedingt können nur vergleichsweise niedrige Stromkennzahlen von  $\sigma = 0,17 - 0,25$  erzielt werden. Der Hauptfokus dieser Anwendungen liegt daher auf der Wärmeerzeugung, weshalb für Stirling-Geräte auch oft der Begriff stromerzeugende Heizung verwendet wird. Trotz geringer elektrischer Wirkungsgrade im Bereich zwischen 13,9 und 15 % kann bei optimaler Wärmenutzung ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 98 % und im Kondensationsbetrieb sogar bis zu 107 % realisiert werden. Der Hersteller gibt für seinen in der Optimierungs- und Testphase befindlichen 4 Zyklen Stirling-Motor 4-ZGM-1 kW eine Stromkennzahl von  $\sigma = 0,45$  und einen erzielbaren elektrischen Wirkungsgrad von 28,6 % an [2], was für diese Technologie herausstechend hohe Leistungsdaten sind.



Die externe Verbrennung kann ohne Beeinflussung des Prozesses soweit optimiert werden, dass niedrige Schadstoffemissionen ( $\text{CO}$  maximal bis  $40 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  bis  $70 \text{ mg/m}^3$ ) auch ohne aufwändige Abgasnachbehandlung erzielt werden können. Daraus erfolgen eine geringe Systemkomplexität und eine kompakte Bauweise. Nach dem Stirling-Prinzip konzipierte KWK-Anlagen werden oft als wandhängende Geräte ausgeführt.

KWK-Anlagen mit Stirling-Motoren weisen Schallemissionen von 40 bis maximal 54 dB(A) auf, welche somit im Bereich von Brennstoffzellenheizgeräten liegen und im Vergleich zu Otto-Motoren gleicher Leistungsklasse eine deutlich niedrigere Belastung darstellen. Aufgrund dieser Eigenschaften besteht die Möglichkeit der Aufstellung in der Nähe von Wohnräumen. Zum Vergleich: ein Fernseher auf Zimmerlautstärke in 1 m Entfernung weist einen Schalldruckpegel von ca. 60 dB(A) auf.

In der Geräteübersicht des Stirling Technologie Instituts Potsdam werden bezüglich der Kosten Angaben zu Listenpreisen und jährlichen Wartungskosten gemacht [2]. Für vier als Serienprodukt verfügbare Geräte belaufen sich die Listenpreise auf 11.950 EUR bis 15.950 EUR. Die Wartungskosten betragen im Schnitt 150 EUR/a. Spezifische Einbindungskosten werden nicht explizit benannt.

Die Wirtschaftlichkeit derartiger Systeme kann derzeit nur gewährleistet werden, wenn entsprechende Fördermaßnahmen etabliert und anwendbar sind.

### 2.1.2 Mikro-Gasturbine

Als Mikro-Gasturbinen werden üblicherweise kleine Gasturbinen ab ca.  $30 \text{ kW}_{\text{el}}$  bezeichnet. Eine einheitliche Definition anhand des Leistungsbereiches ist bis dato nicht zu finden. So wird in einer Quelle von Gasturbinen mit einer elektrischen Leistung bis  $100 \text{ kW}$  [3, p. 148], in einer anderen bis  $300 \text{ kW}_{\text{el}}$  gesprochen [4].

In ihrer Funktionsweise sind Mikro-Gasturbinen den Turbinen aus der Luftfahrtindustrie nachempfunden. Sie bestehen im Wesentlichen aus den Komponenten Verdichter, Brennkammer, Turbine, Generator und Rekuperator, welcher jedoch nicht zwingend zu nutzen ist. Für die Anwendung in einer KWK-Anlage sind sie mit einem Modul zur Abwärmenutzung (Abgaswärmetauscher) verbunden. Bei Mikro-Gasturbinen wird die Leistung anhand der Drehzahl anstatt über die zugeführte Gasmenge (vgl. Verbrennungsmotor) geregelt. So können durch eine Anpassung von Volumenstrom und Drehzahl Stoßverluste an Turbinen- und Verdichterrad vermieden werden, da die Schaufelwinkel der Räder und die Eintrittsrichtung der Gase in die Räder gleich gerichtet sind. Auf diese Weise lassen sich die Wirkungsgradverluste von Mikro-Gasturbinen im Teillastbereich vergleichsweise gering halten. Mikro-Gasturbinen zeichnen sich durch einen konstanten Wirkungsgradverlauf über weite Lastbereiche aus (siehe Abbildung 2). [5, pp. 13 – 16], [6]

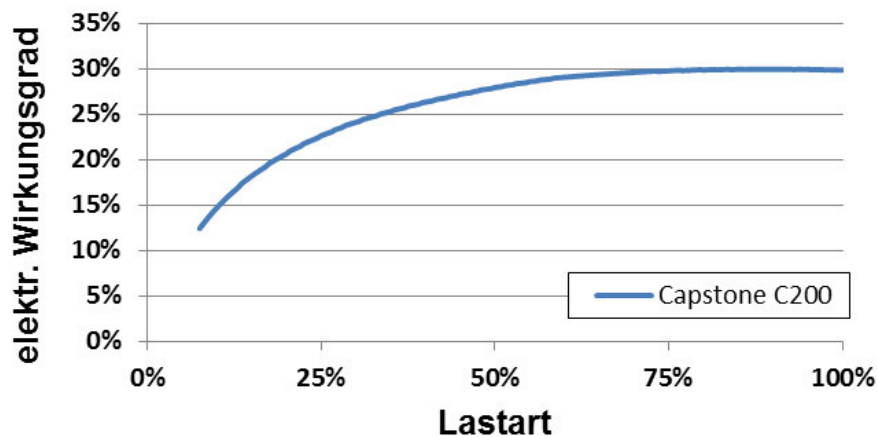


Abbildung 2: Teillastverhalten einer Mikro-Gasturbine mit 200 kW<sub>el</sub> – Werte von E-Quad Power Systems

Da Mikro-Gasturbinen in den meisten Fällen sogenannte Ein-Wellen-Aggregate ohne Getriebe sind, wird auch der Generator mit Drehzahlen von 70.000 bis 100.000 1/min angetrieben. Aus diesem Grund liefert er hochfrequenten Wechselstrom, der in netzkonforme Wechselspannung umgewandelt wird.

Abgastemperaturen von 270 bis 680 °C ermöglichen eine Dampferzeugung in einem Abhitzekeessel. Die Unterschiede in den erreichbaren Abgastemperaturen sind darauf zurückzuführen, dass nicht alle Mikro-Gasturbinen - wie oben angesprochen - mit einem Rekuperator zur internen Vorwärmung ausgestattet sind [1]. Darüber hinaus kann das Abgas aufgrund der hohen Temperatur und vergleichsweise hohen Reinheit auch in einem Konvektionstrockner direkt genutzt werden [7].

Je nach Größe werden elektrische Wirkungsgrade zwischen 24 und 33 % erreicht. Die Stromkennzahlen liegen in einem Bereich von 0,41 bis 0,66 [1]. Die Abgaswerte (im Wesentlichen NO<sub>x</sub> und CO) sind bedingt durch den hohen Lambda-Wert sehr gering, weshalb in den meisten Fällen keine weiteren Systeme zur Abgasreinigung erforderlich sind [10], [11], [12].

Für den Markt von Mikro-Gasturbinen kann ein Wachstum prognostiziert werden, da diese besonders in Ländern mit vielen Stromausfällen häufig verwendet werden, um Liegenschaften und Hotels autark versorgen zu können [3, pp. 148 – 149]. Aktuell ist die Anzahl der am Markt verfügbaren Mikro-Gasturbinen in Deutschland sehr gering, weshalb man hier noch von einer Randtechnologie sprechen muss.

Neben den oben beschriebenen Mikro-Gasturbinen, die durch die Verbrennung eines Luft-Gas-Gemisches angetrieben werden, sind ebenfalls sogenannte Turbinengeneratoren auf dem Markt zu finden. Bei dieser Technik nutzt man Gas, welches entweder ungenutzt einen Industrieprozess verlässt oder von einem hohen Druckniveau auf ein geringeres gebracht wird, um eine Turbinen-Generator-Einheit anzutreiben. Wie bei Mikro-Gasturbinen liegen in diesem Fall Turbine und Generator auf einer Welle. Zudem kann diese Technik bei Biogasanlagen und BHKW mit Hilfe eines ORC-Prozesses zur Nachverstromung der Abwärme zum Einsatz kommen [13], [14]. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um Anlagen, die nach dem KWK-Prinzip arbeiten, weshalb sie im Folgenden keine weitere Berücksichtigung finden.

Die spezifischen Investitionskosten von Mikro-Gasturbinen sind hoch. Für eine leistungsstarke Mikro-Gasturbine ( $200 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) liegen sie bei  $1.380 \text{ EUR/kW}_{\text{el}}$ . Die Mikro-Gasturbine mit der geringsten am Markt verfügbaren Leistung weist spezifische Investitionskosten von  $2.270 \text{ EUR/kW}_{\text{el}}$  auf. Die Wartungskosten (Teil- und Vollwartung) steigen zwar mit der elektrischen Leistung, sind aber durch die Nutzung von Luftlagern, für die keine Schmiermittel benötigt werden, über alle Leistungsklassen hinweg im Verhältnis zu den hohen Investitionskosten gering ( $2,31 \text{ EUR/Betriebsstunde}$  für die Vollwartung einer Mikro-Gasturbine mit  $200 \text{ kW}_{\text{el}}$ ). Nimmt man beispielsweise eine Laufzeit von  $6.000 \text{ Betriebsstunden}$  pro Jahr an, so würden sich die Kosten eines Vollwartungsvertrags bei einer Mikro-Gasturbine mit  $200 \text{ kW}_{\text{el}}$  auf  $1,2 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$  belaufen. [15]

### 2.1.3 Verbrennungsmotor

Die Strom- und Wärmeerzeugung von BHKW wird hauptsächlich durch Verbrennungsmotoren realisiert. Systeme mit Brennstoffzellen, Mikro-Gasturbinen oder Stirling-Motoren bilden eine Minderheit, weshalb im Folgenden der Begriff BHKW als Synonym für Motor-BHKW verwendet wird. Dabei handelt es sich um Gas-Otto-, Gas-Diesel- und Diesel-Motoren. Als Brennstoffe können je nach Motortyp Diesel- bzw. Heizöl oder Brenngase, wie z. B. Erdgas, Flüssiggas, Klärgas, Deponiegas, Kokereigas, Restgase aus Produktionsanlagen und eine Kombination der genannten Brennstoffe eingesetzt werden [1], [16].

Die Funktionsweise beruht auf der eines Verbrennungsmotors, wie er auch im Kraftfahrzeugbereich eingesetzt wird und deshalb bereits sehr ausgereift ist. Prinzipiell bewegen sich hierbei mehrere Kolben in Zylindern und treiben über Pleuel eine Kurbelwelle an. Diese treibt wiederum einen Generator an, wodurch Strom erzeugt wird.

Wie auch beim Kraftfahrzeugmotor entsteht bei der Stromerzeugung im BHKW Abwärme aus verschiedenen Quellen. Der größte Abwärmeanteil fällt bei der internen Zylinder- und Motorblockkühlung an. Mit einer Temperatur von  $90 \text{ °C}$  am Kühlerauslass ist das Kühlwasser optimal zu Heizzwecken geeignet. Das Abgas mit einer deutlich höheren Temperatur (bis  $600 \text{ °C}$ , je nach Antriebsart) ist über einen Abgaswärmetauscher zur Wärmeauskopplung ebenfalls nutzbar [3]. Auch die Abwärme des Ölkühlers ist über einen Wärmetauscher nutzbar. Eine direkte Nutzung des Abgaswärmestromes eines Verbrennungsmotors ist aufgrund von Verunreinigungen im Abgas nur beschränkt einsetzbar, z. B. für die Schlamm-trocknung [1], [7] (Abbildung 3).

Der Bereich der erzeugten elektrischen Leistung durch BHKW, die mit Verbrennungsmotoren arbeiten, erstreckt sich von  $0,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis ca.  $20 \text{ MW}_{\text{el}}$  pro Modul. Hierdurch sind unterschiedlichste Anwendungen sowohl von der Einzelobjektversorgung in (kleinen) Wohnhäusern bis Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD) und Industrie als auch die Versorgung von Nahwärmenetzen realisierbar. Seltener in Betrieb sind die größeren Anlagen mit elektrischen Leistungen von  $4$  bis  $20 \text{ MW}_{\text{el}}$  pro Modul, die zwar nur von wenigen Herstellern angeboten werden [18], aber evtl. einen Trend der Entwicklung darstellen.

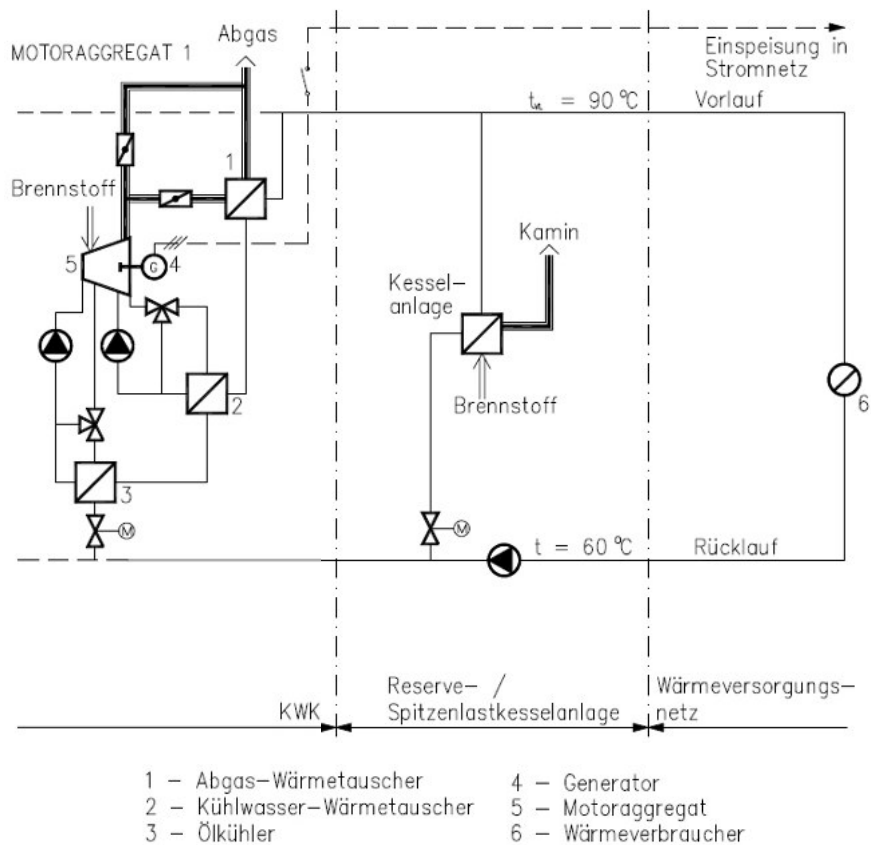


Abbildung 3: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Verbrennungsmotor (Otto oder Diesel) [1], nachbearbeitet

Je nach Größe des BHKW ergeben sich auch die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade. Tendenziell steigt der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad mit steigender elektrischer Leistung von ca. 27 bis 30 % für kleine Anlagen bis ca. 43 bis 45 % für Anlagen im MW-Bereich. Im Gegensatz dazu sinkt der thermische Wirkungsgrad, was sich durch einen konstanten Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffausnutzungsgrad) von ca. 86 bis 93 % über den gesamten Leistungsbereich ausdrückt. Zusätzlich hängt der Wirkungsgrad auch vom Brennstoff ab. Für den Leistungsbereich um  $500 \text{ kW}_{el}$  liegen elektrische Wirkungsgrade in einem Bereich um rund 40 %. [19]

Bei großen Anlagen ( $> 2 \text{ MW}_{el}$ ) steigt der Wirkungsgrad im Falle von Prozesswärme um ca. 6 bis 8 %-Punkte und der thermische Wirkungsgrad sinkt erheblich. Der Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffausnutzungsgrad) sinkt auf ca. 70 %.

Verbrennungsmotoren gelten in der Regel als sehr flexible Einheiten auch im Teillastbereich. Durch die Reihenschaltung von mehreren Modulen können BHKW für den mittleren und hohen Leistungsbereich der elektrischen Erzeugung realisiert werden.

Eine aktuelle in der Entwicklung befindliche Option zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades ist u. a. eine zweistufige Turboaufladung. Diese ermöglicht eine schnellere und bessere Befüllung des Brennraums, was zu einer Steigerung der Motoreffizienz führt [20].

Eine weitere Möglichkeit zur Effizienzsteigerung der großen Motoren im MW-Bereich ist die Nutzung der Abgaswärme zur Dampferzeugung mit der Möglichkeit der anschließenden Verstromung in einer Dampfturbine. Die erwartete Leistungssteigerung liegt im Bereich von 3 bis 5 %-Punkten.

Betrachtet man die Stromkennzahl  $\sigma$ , so ist ebenfalls eine klare Tendenz erkennbar. Mit steigender Anlagengröße steigt  $\sigma$  von ca. 0,21 bis 0,5 für kleine Anlagen auf über 1,1 für Anlagen im MW-Bereich. Im Falle von Prozesswärme für Anlagen im MW-Bereich können auch Stromkennzahlen größer als 2 erreicht werden.

Die Emissionen der Motoren werden vornehmlich durch die Schadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  und Kohlenwasserstoffe sowie durch Partikel gebildet. Es ist eine Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte nach TA-Luft (Einteilung nach Leistungsgröße) sicherzustellen. Der Großteil der Anlagen erfüllt diese Kriterien oder unterschreitet die Grenzwerte deutlich, wobei BHKW zur Schadstoffreduzierung entweder mit einem Drei-Wege-Katalysator oder vorwiegend im höheren Leistungsbereich mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet sind [18]. Die Reduktion der Kohlenwasserstoff-Emission (überwiegend Methan), welche derzeit noch nicht vom Gesetzgeber limitiert wird, wird aktuell durch die Entwicklung/Anpassung spezieller Abgaskatalysatoren adressiert.

Schallemissionen spielen ebenso eine Rolle und fallen besonders dann ins Gewicht, wenn die Anwendung im Wohnbereich und in der nicht-industriellen Energieversorgung (Schulen, Krankenhäuser etc.) liegt. Kleine Anlagen bis ca. 50  $\text{kW}_{\text{el}}$  zeichnen sich durch geringe Schallemissionen im Bereich zwischen 53 und 69 dB(A) aus, wohingegen größere Anlagen bis zu über 110 dB(A) aufweisen können. Diese Werte werden durch geeignete Schallschutzmaßnahmen wie Einkapselung oder Containerlösungen erreicht.

Die folgenden technischen und wirtschaftlichen Daten beziehen sich auf mit Erdgas betriebene Motor-BHKW.

Der größte Teil der Investitionskosten von BHKW fällt für das Modul an. Die spezifischen Modulkosten sind bei den kleinen Anlagen vergleichsweise hoch: Eine Anlage mit 50  $\text{kW}_{\text{el}}$  weist spezifische Modulkosten in Höhe von ca. 1.400 EUR/ $\text{kW}_{\text{el}}$  auf. Mit steigender Leistung sinken die spezifische Modulkosten (bei 2  $\text{MW}_{\text{el}}$  ca. 400 bis 500 EUR/ $\text{kW}_{\text{el}}$ ) [19].

Des Weiteren müssen die Kosten für die Installation im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des BHKW betrachtet werden. Diese unterscheiden sich je nach Leistung des BHKW, wobei es jedoch einen klaren Trend wie bei den Investitionskosten nicht gibt. Im günstigsten Fall liegen die Installationskosten bei ungefähr 45 % der Modulkosten für geringe Leistungsklassen. Möglich sind jedoch auch Installationskosten, die den Modulkosten nahezu entsprechen (95 % der Modulkosten) [19].

## 2.1.4 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen (BZ) sind hocheffiziente, elektrochemische Stromerzeuger, die ohne den Umweg über Wärme die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie direkt in Elektrizität umwandeln. Die Technologie basiert dabei auf der Umkehrung der Wasserelektrolyse, d. h., aus den Gasen Wasserstoff und Sauerstoff entsteht unter Abgabe elektrischer Energie und Wärme als einziges Reaktionsprodukt Wasser. Als Hauptanwendungsgebiet für stationäre Brennstoffzellensysteme wird die Strom- und Wärmeerzeugung auf Erdgasbasis betrachtet.



Abbildung 4: Funktionsprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung zur Hausenergieversorgung [21]

Verfügbare und in der Entwicklung befindliche Anlagen können nach der elektrischen Nennleistung hauptsächlich in zwei Segmente unterteilt werden. Sogenannte Brennstoffzellenheizgeräte (BZHG) adressieren mit einer elektrischen Leistung von bis zu 5 kW dabei das Mikro-KWK Segment zur Versorgung von Wohngebäuden mit Strom und Raumwärme sowie Warmwasser (siehe Abbildung 4). Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einigen hundert bis tausend Kilowatt elektrischer Leistung bedienen den Sektor Klein-KWK in den Bereichen Gewerbe, Handel und Dienstleistung bzw. Industrie zur zeitgleichen Strom- und Wärmeproduktion für Prozesse, Raumwärme und Warmwasserbereitung. Das dazwischen liegende Segment Mini-KWK (10 kW bis ca. 50 kW) wird bei der Entwicklung stationärer Brennstoffzellen derzeit nicht adressiert.

Für überwiegend erdgasbasierte Mikro-KWK-Anwendungen werden Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC) sowie Oxidkeramischen Brennstoffzellen (SOFC) ein hohes Anwendungspotenzial zugesprochen. Für BHKW-Anlagen mit einigen hundert kW elektrischer Leistung haben sich über PEMBZ- und SOFC-Anlagen hinaus Phosphorsäure-Brennstoffzellen (PAFC) sowie Karbonatschmelze-Brennstoffzellen (MCFC) etabliert. BHKW-Anlagen werden ebenfalls vornehmlich mit Erdgas, aber auch mit Biogas o. ä. betrieben.

Der Energieträger wird durch einen vorgeschalteten Reformierungsprozess unter Zugabe von Wasser und/oder Luft in ein Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid haltiges Synthesegas umgewandelt. Die Komplexität dieses Prozesses hängt maßgeblich von der Kohlenstoffmonoxid-Verträglichkeit des Brennstoffzellentyps ab. Während sowohl bei SOFC- als auch bei MCFC-basierten Anlagen das erzeugte Synthesegas direkt der Brennstoffzelle zugeführt und dort über die elektrochemische Reaktion verstromt werden kann, erfordern die PAFC- und PEMBZ-Technologien weitere Reaktionsstufen zur Reduzierung des Kohlenstoffmonoxidanteils auf unter 1 bis 2 % (PAFC und Hochtemperatur-PEMBZ, HTPEMBZ) bzw. auf unter 10 bis 30 ppm (Niedertemperatur-PEMBZ, NTPEMBZ).

Die Startzeiten von brennstoffzellenbasierten KWK-Anlagen hängen wiederum vom BZ-Typ aber auch von der System- bzw. Leistungsgröße ab. Während PEMBZ- und PAFC-Systeme binnen 1 bis 2 Stunden angefahren werden können, liegen die Startzeiten von SOFC- und MCFC-Systemen, bedingt durch die höhere Brennstoffzellentemperatur, im Bereich von 3 bis 24 Stunden.




Wie zuvor erwähnt, können brennstoffzellenbasierte KWK-Anlagen auch mit reinem Wasserstoff betrieben werden. Dies geschieht an geeigneten Standorten mit existierender lokaler Wasserstoffinfrastruktur wie beispielsweise in der Chlorindustrie [22]. Diese Anwendungen bilden derzeit noch die Ausnahme, demonstrieren jedoch das Nutzungspotenzial von Wasserstoff bei einer zukünftig erweiterten H<sub>2</sub>-Infrastruktur.

Im Vergleich zu konventionellen KWK-Technologien weisen Brennstoffzellsysteme insbesondere den Vorteil auf, hohe Stromkennzahlen auch im kleinen Leistungsbereich erreichen zu können. So können hohe Jahresnutzungsgrade und in Kombination mit Wärmespeichern hohe Wärmedeckungsgrade erzielt werden. Hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 60 % und Gesamtwirkungsgrade von bis zu 98 % sowie ein nahezu schadstoffemissionsfreier und geräuscharmer Betrieb machen Brennstoffzellen insgesamt zu einer vielversprechenden Technologie. Die erzielbaren Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Durchschnitt des deutschen Strommix können dabei bis zu 40 % betragen [23].

Durch die Vielfalt und die Vorzüge der Brennstoffzellen-Technologie kann in zukünftigen Energiesystemen die KWK mit Brennstoffzellen einen wesentlichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung leisten.

Neue Märkte für Mikro-KWK Anwendungen zur Hausenergieversorgung auf Basis von Brennstoffzellen entwickeln sich vornehmlich in Asien und Europa. Verschiedene Unternehmen aus der Heizungs- und Energieversorgungsbranche entwickeln PEMBZ- und SOFC-Systeme mit einer elektrischen Leistung von ca. 0,3 bis 5,0 kW. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl der verfügbaren oder im Test befindlichen Brennstoffzellenheizgeräte mit den wesentlichen Eckdaten auf.

Tabelle 1: Auswahl von Brennstoffzellenheizgeräten für Mikro-KWK [24]

									
<b>Hersteller</b>	<b>Buderus</b>	<b>Ceramic Fuel Cells</b>	<b>Elcore</b>	<b>Hexis</b>	<b>Junkers</b>	<b>SenerTec</b>	<b>SOLIDpower</b>	<b>Vaillant</b>	<b>Viessmann</b>
<b>Typ</b>	SOFC	SOFC	HT-PEM	SOFC	SOFC	NT-PEM	SOFC	SOFC	NT-PEM
<b>Leistung (el/th)</b>	0,7/0,62 kW	1,5/0,61 kW	0,3/0,7 kW	1,0/1,8 kW	0,7/0,62 kW	0,7/0,96 kW	2,5/2 kW	0,9/1,5 kW	0,75/1 kW
<b>Thermische Leistung des Zusatzbrenners</b>	7,3-24 kW	extern, individuell wählbar Paketlösungen: 5,1-22,8 kW / 6,8-36,7 kW, oder extern, individuell wählbar	7-21 kW	7-21 kW	7,3-21,8 kW	4,8-20 kW	extern, individuell wählbar	5,8-27 kW	5,5-19 kW
<b>Speicher</b>	Warmwasserspeicher 75 l, Pufferspeicher 135 l	Palettlösungen: 500 l, oder extern, individuell wählbar	extern, individuell wählbar	Warmwasserspeicher 75 l, Pufferspeicher 135 l	Pufferspeicher mit Frischwasserstation 300 l	300 l, optional	extern, individuell wählbar	extern, individuell wählbar	Warmwasserspeicher 46 l, Pufferspeicher 170 l
<b>Elektrischer Wirkungsgrad</b>	45 %	32 %	35 %	45 %	bis zu 37 %	50 %	50 %	33 %	37 %
<b>Gesamt-wirkungsgrad</b>	85 %	104 %	95 %	85 %	93 %	90 %	90 %	92 %	90 %
<b>Abmessungen (B x T x H)</b>	1200 x 600 x 1800	600x550x105	620 x 580 x 1650	1200 x 600 x 1800	Brennstoffzeleinheit: 453 x 727 x 1053 Systemtechnik: 650 x 1065 x 1800	630 x 830 x 170	530 x 630 x 1640	599 x 693 x 1640	1085 x 595 x 1998
<b>Gewicht in kg</b>	Gesamtsystem 304 kg in Modulbauweise, max. Modulgewicht 112kg	115	210	Gesamtsystem 304 kg in Modulbauweise, max. Modulgewicht 112kg	115 kg (Brennstoffzeleinheit) max. Modulgewicht 120 kg	350	150	290 (Brennstoffzeleinheit) 125 (Spitzenlastmodul 165)	
<b>Feldtests, Kooperationen, Demonstrationsprojekte</b>	ene.field (EU), Kleinserie in Kooperation mit Energieversorgern	ene.field (EU), verschiedene Partner aus der Energiewirtschaft und dem Hausbau	Callux (DE), Pharos (CH), ene.field (EU)	ene.field (EU)	ene.field (EU), Callux (DE)	ene.field (EU)	ene.field (EU)	Feldtest in Callux (DE), Kleinserie in ene.field (EU)	Januar 2013 Pretest, Juli 2013 bis März 2014 großer Feldtest
<b>Markteinführung</b>	2016	erfolgt (2012)	Ende 2013	2016	2016	2016/2017	2016/2017	2016/2017	April 2014
<b>Kontakt</b>	<a href="http://www.buderus.de">www.buderus.de</a>	<a href="http://www.ceramicfuelcells.de">www.ceramicfuelcells.de</a>	<a href="http://www.elcore.com">www.elcore.com</a>	<a href="http://www.hexis.com">www.hexis.com</a>	<a href="http://www.junkers.com">www.junkers.com</a>	<a href="http://www.dendachs.de">www.dendachs.de</a>	<a href="http://www.solidpower.com">www.solidpower.com</a>	<a href="http://www.vaillant.de">www.vaillant.de</a>	<a href="http://www.viessmann.com">www.viessmann.com</a>



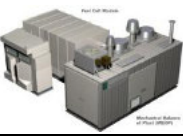




In Japan werden derartige Systeme seit 2009 im Rahmen des Förder- und Entwicklungsprogramms „ene-farm“ beim Endkunden installiert und haben seitdem eine Stückzahl von mehr als 121.000 erreicht (Stand April 2015 [25]). Gerätehersteller in Deutschland demonstrieren mit derzeit 473 installierten Geräten in dem bundesweiten Praxistest „Callux“ die Alltagstauglichkeit der Technologie (Stand April 2015 [26]). Europaweite Feldtestaktivitäten sind unter dem 2012 gestarteten Programm „ene.field“ zu verzeichnen, worin bis zum Jahr 2017 1.000 Systeme in 12 EU-Ländern installiert und erprobt werden sollen [27]. Das Hauptaugenmerk der Feldtests in Deutschland und Europa liegt auf der Erhebung von realen Daten zu Nutzerverhalten, zu Gebäudetypen und zum Betrieb in unterschiedlichen Klimazonen mit dem Ziel, die Systemfunktion optimal auf die gegebenen Bedürfnisse anzupassen. Weitere übergeordnete Themen sind die Erhöhung der Lebensdauer, die Reduktion der System- und Servicekosten, die Erarbeitung von Normen und Standards sowie die Ertüchtigung der Zulieferindustrie. Die aus diesen Feldtestergebnissen abgeleiteten Detailfragestellungen zu Technik und Wirtschaftlichkeit werden in den kommenden Jahren auch Gegenstand der Forschung und Entwicklung sein. Insgesamt ist erkennbar, dass die Markteinführung gerade erfolgt ist oder unmittelbar bevorsteht, sich demnach diese Technologie derzeit in der Übergangsphase von Feldtest zum Serienprodukt befindet.

Brennstoffzellen für BHKW-Anwendungen ab einer elektrischen Leistung von 100 kW sind von unterschiedlichen Herstellern bereits serienreif auf dem Markt verfügbar. In Tabelle 2 sind beispielhaft Systeme mit den jeweiligen Eckdaten aufgelistet. Bei derartigen Anlagen, die in der Regel als Containerlösung aufgebaut werden, ist der Einsatzbereich vielfältig und vornehmlich in dem Bereich GHD sowie kleiner Industrieanwendungen angesiedelt. Da die Wärmebereitstellung auf zwei Temperaturniveaus stattfinden kann (z. B. Hochtemperaturprozesswärme bei 120 °C und Niedertemperaturwärme bei 60 °C [28]), bietet sich neben der klassischen KWK zur Wärmeversorgung in Gebäuden ebenso die Nutzung der Wärme für industrielle Prozesse an. Eine weitere Nutzung, die Anlagen in dieser Größe ermöglichen, ist die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) in der zusätzlich durch Verwendung von Adsorptionskälteanlagen Kälte produziert wird. Ein besonderes Konzept, wurde unter dem Namen „Quattro Generation“ entwickelt, bei dem ein PAFC-basiertes Brennstoffzellensystem ertüchtigt wurde, neben der Erzeugung von Kraft, Wärme und Kälte zudem aktiven Brandschutz von Räumen zu leisten. Hierfür wird die sauerstoffreduzierte Abluft der Kathode mit einem O<sub>2</sub>-Anteil von ca. 15 % in zu schützende Räume, wie z. B. Serverräume, Archive usw. geleitet. Die Brandgefahr wird somit ausgeschlossen, was weitere technische Maßnahmen des Brandschutzes erübrigt, die Betriebskosten senkt und somit die Gesamtwirtschaftlichkeit für derartige Objekte erhöht [29].

Neueste Entwicklungen zeigen ein beispielsweise ein Hybridsystem, bestehend aus einer SOFC-Brennstoffzelle und einer Mikro-Gasturbine (SOFC-MGT hybrid power generation system) mit einer elektrischen Leistung von ca. 250 kW. Die Abgase der SOFC werden zur weiteren Stromproduktion einer Gasturbine zugeführt, wodurch ein elektrischer Wirkungsgrad von ca. 52 % erzielt werden kann [30].

Tabelle 2: Auswahl von Brennstoffzellen für BHKW-Anwendungen [8], [11–13]

					
Hersteller	N <sub>2</sub> telligence (Fuji Electric)	Bloom	Fuel Cell Energy	Doosan Fuel Cell America	Ballard Power Systems
Typ	PAFC	SOFC	MCFC	PAFC	NTPEMBZ
$P_{el}/P_{th}$ / kW	100/123	100-200/ -	300 – 2800 /370 - 3500	400/446	1.000 / 950
$\eta_{el}$ / %	42	> 50	47	42	40
$\eta_{ges}$ / %	91	-	90	90	k. A.
Energieträger	Erdgas, Biogas	Erdgas	Erdgas, Biogas	Erdgas	H <sub>2</sub> , Biogas

Die wirtschaftliche Bewertung von Brennstoffzellenheizgeräten (Mikro-KWK) ist aus heutiger Sicht insbesondere für Europa schwer möglich. Es liegen nur von wenigen Herstellern die Investitionskosten vor. Wartungs- und Instandhaltungskosten werden bislang nicht explizit benannt, sie liegen jedoch im Rahmen von mehreren hundert Euro pro Jahr. Aktuell steht der Kunde sehr hohen Investitionskosten gegenüber. Im Japanischen Programm „ene-farm“ wurde erfolgreich demonstriert, dass durch ein staatlich subventioniertes Markteinführungsprogramm diese Hürde überwunden werden kann. Im Jahr 2009, zu Beginn von „ene-farm“, betrug die Subventionssumme ca. ein Drittel der Investitionskosten (ca. 10.000 EUR). Wie Abbildung 5 zeigt, stieg die Stückzahl der installierten Systeme in den darauf folgenden Jahren deutlich an. Durch den Skaleneffekt konnten die Investitionskosten deutlich reduziert und somit auch die Subventionierung herabgesetzt werden.

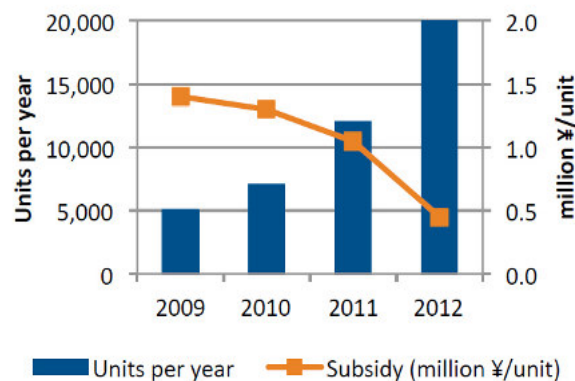


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Anzahl installierter Systeme und der staatl. Förderung im „ene-farm“, Programm JP [34], (Hinweis 1 EUR  $\approx$  147 YEN)

Diesem Beispiel folgend entstehen neben den bereits etablierten Fördermöglichkeiten (KWK-G, BAFA, ...) derzeit auch in der BRD Marktanreizprogramme, die speziell die Brennstoffzellentechnologie stützen sollen. Das KWK-Impulsprogramm des Landes NRW bietet beispielsweise nach Anlagengröße gestaffelt einen Zuschuss in Höhe von 1.500 EUR bis zu 17.000 EUR und unterstützt so vorwiegend kleine und mittelständische Unternehmen in NRW bei der Installation von KWK-Systemen [35]. Ähnliche Förderprogramme werden zurzeit auch in anderen Bundesländern eingeführt (vgl. auch Ausführungen zu Förderlandschaften II/AP1.1). Eine lokale Förderung der Stadt Heinsberg bietet durch die „Brennstoffzellen-Initiative Heinsberg“ einen Zuschuss von 10 Ct je produzierter kWh Strom und einmalig je nach Anlagengröße 1.000 bis 4.000 EUR für ein Brennstoffzellenheizgerät [1].

Ein möglicher Verlauf der Kostendegression mit zunehmenden Stückzahlen wird in der Studie von Roland Berger [37] für Mikro-KWK BZHG, wie in Abbildung 6 dargestellt, prognostiziert. Es ist zu erkennen, dass die aktuell vergleichsweise hohen Kosten (hier ca. 31.000 EUR) schon mit geringer Stückzahlzunahme drastisch sinken können. Auch wenn die hier propagierte Kostendegression im Vergleich zu der Entwicklung in Japan sehr optimistisch wirkt, so zeigt eben dieses Beispiel Japan, dass durch ein gezieltes Technologieeinführungsprogramm die Skaleneffekt-bedingten Investitionskosten auf ein wirtschaftliches Maß sinken können.

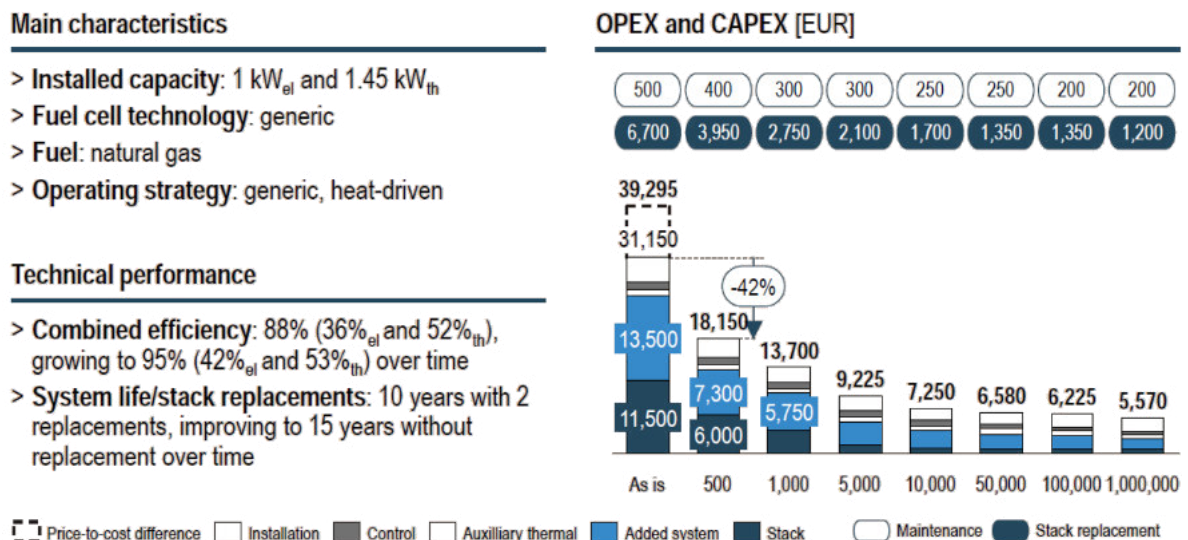


Abbildung 6: Durchschnittliche Kostenstruktur für BZHG (Mikro-KWK) [37]

## 2.1.5 Gasturbine

Gasturbinen können in einer Vielfalt technischer Kombinationen für KWK-Anlagen eingesetzt werden. Sehr häufig werden sie für industrielle KWK-Anlagen eingesetzt. Das Kernstück dieses KWK-Anlagentyps bildet eine Gasturbine, die durch Antreiben eines Generators elektrische Energie erzeugt. Darüber hinaus werden die heißen Abgase thermisch genutzt. Folgende Grundvarianten werden unterschieden:

### 2.1.5.1 Gasturbine (GT) + Abhitzenutzung

Der prinzipielle Aufbau eines Heizkraftwerks mit Gasturbine ist in Abbildung 7 dargestellt. In einer KWK-Anlage mit Gasturbine + Abhitzenutzung in einem Abhitzeessel wird Frischluft angesaugt, im Verdichter komprimiert und der Brennkammer zusammen mit dem Brennstoff zugeführt. Der dort eingebrachte Brennstoff (Gas oder Öl) wird unter Druck verbrannt. Die Abgase expandieren in der Arbeitsturbine, die sowohl den Verdichter als auch den Generator antreibt. Von der Gasturbine gelangen die Abgase mit einer Temperatur von 450 bis 600 °C in einen nachgeschalteten Abhitzeessel. Dieser erzeugt entweder Heißwasser mit Vorlauftemperaturen bis zu 200 °C oder Dampf mit einem Druck von bis zu 80 bar. Um einen temporär erhöhten Wärmebedarf zu decken oder höhere Überhitzungstemperaturen bis rd. 700 °C und Dampfdrücke größer 200 bar zu erreichen, kann im Dampferzeuger eine Zusatzfeuerung integriert werden. [1], [38], [39]

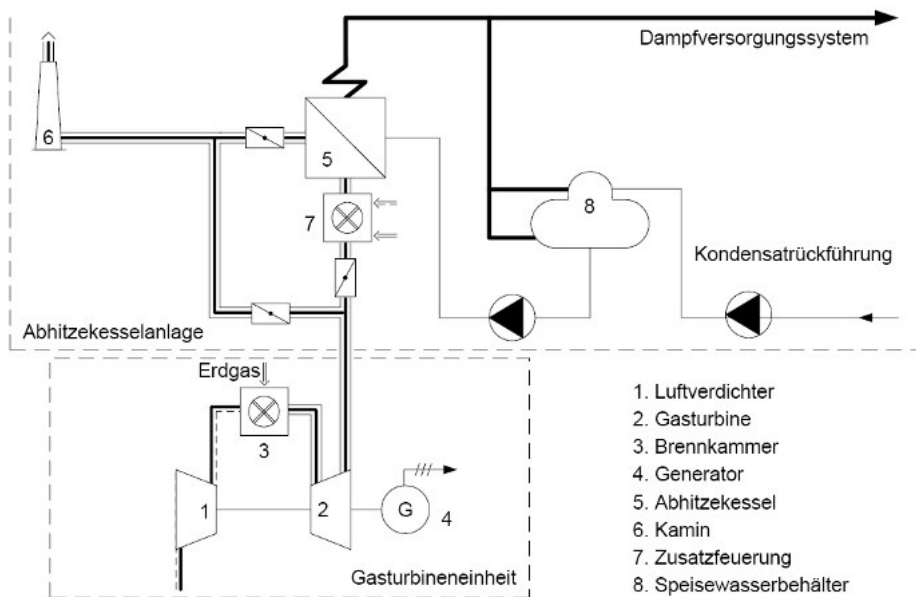


Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit offener Gasturbine und Zusatzfeuerung (optional) [39]

### 2.1.5.2 Gasturbine (GT) + Abhitzenutzung in Cheng Prozess

Als Cheng-Cycle oder STIG (Steam Injected Gas Turbines) bezeichnet man Gasturbinenanlagen, bei denen zusätzlich zu dem Rauchgasmassenstrom aus der Brennkammer ein Dampfmassestrom durch die Turbine geleitet und dort expandiert wird (s. Abbildung 8). Der der Turbine zugeführte Dampf kann sowohl mit Hilfe des Abgases der Gasturbine in einem Abhitzekeessel erzeugt als auch als Abdampf aus Industrieprozessen zur Verfügung gestellt werden. Über die Variation der Dampfmenge, die durch die Turbine geleitet wird, lässt sich die Leistungsabgabe der Turbine in einem weiten Bereich steuern. [39], [41]

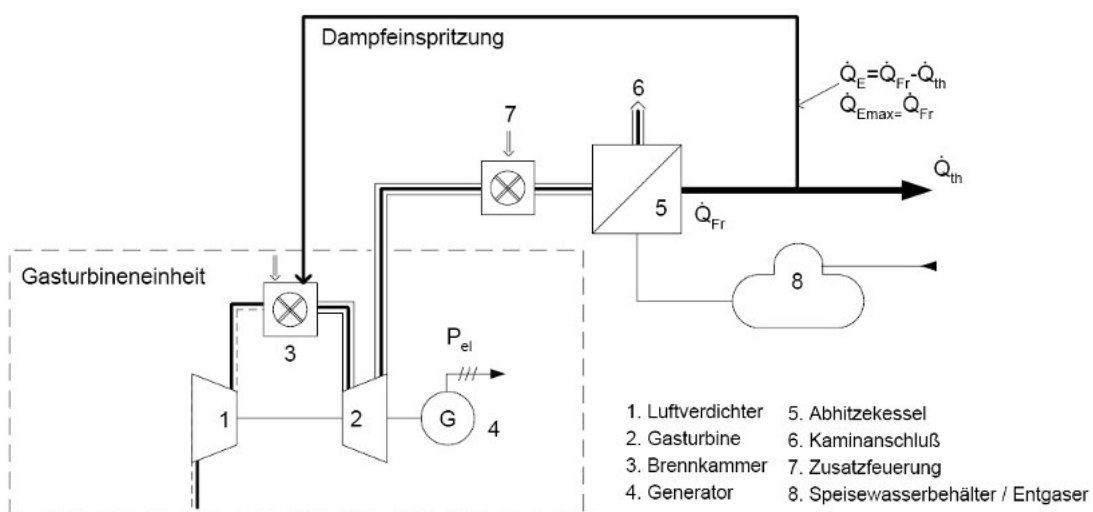


Abbildung 8: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit offener Gasturbine und Dampfeinspritzung (Cheng-Prozess) [39]

### 2.1.5.3 Gas- und Dampfturbinen (GuD) Anlagen

In sogenannten Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerken (GuD oder auch Kombikraftwerke genannt) wird der im Abhitzeessel erzeugte Dampf, neben der direkten Nutzung in einer angeschlossenen Dampfturbine zur Stromerzeugung, auch zur Prozessdampferzeugung sowie zur Heizwärmeerzeugung genutzt. Der elektrische Wirkungsgrad gegenüber der offenen GT Anlage wird dadurch gesteigert (s. Abbildung 9). [1], [38], [39]

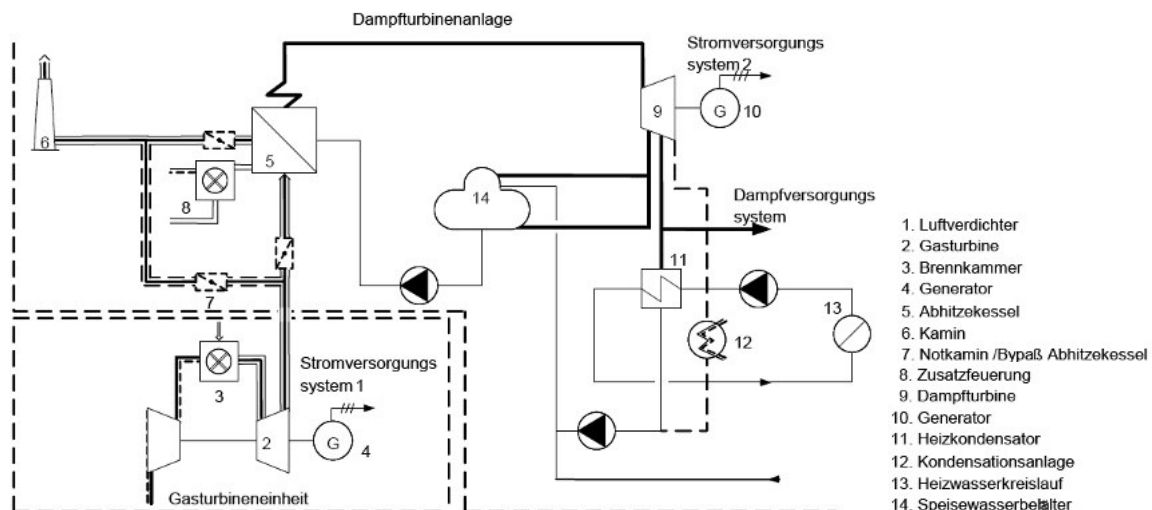


Abbildung 9: Prinzipschaltbild einer GuD KWK-Anlage mit Zusatzfeuerung (optional) [39]

Während bei der Gasturbine als Brennstoff in der Regel Erdgas oder Heizöl eingesetzt wird, können in der Zusatzfeuerung im Abhitzeessel alle verfügbaren festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffe verbrannt werden. Die elektrischen Anlagenteile des Heizkraftwerks können bei großen Anlagen für einen Inselbetrieb ausgelegt werden, sodass ein Betrieb unabhängig vom öffentlichen Stromnetz möglich ist.

Heizkraftwerke mit Gasturbinen weisen eine Vielzahl von Prozessvarianten, Brennstoffen und Anlagentechniken auf und können bei reiner Stromerzeugung im GuD-Kraftwerksprozess elektrische Wirkungsgrade bis 60 % realisieren. Durch die variable Auslegung von Heizkraftwerken mit Gasturbinen ergibt sich in der Industrie ein weites Feld an Einsatzmöglichkeiten. Im Teillastbereich verfügen sie jedoch über einen schlechteren Wirkungsgrad. Daher sind für einen wirtschaftlichen Betrieb Wärmebedarfsstrukturen notwendig, die eine hohe Auslastung der Anlage gewährleisten.[38]

GuD-Heizkraftwerke (HKW) als KWK-Anlagen sind thermodynamisch auf hohem Niveau und technisch ausgereift. Die erzielte Mehrleistung der Dampfturbine beträgt ca. 30 % der Leistung der vorgeschalteten Gasturbine. Der Kostenmehraufwand gegenüber einem einfachen Gasturbinen-HKW ist jedoch erheblich. Dies gilt insbesondere im kleinen Leistungsbe-  
reich von 5 bis 50 MW<sub>el</sub>. Deshalb sind Konzeptionen interessant, bei denen der im Abhitzeessel erzeugte Dampf in die Gasturbine zur Leistungssteigerung zurückgeführt wird. [39]

Wirkungsgrade und Stromkennzahlen von GuD-Anlagen hängen unter anderem auch davon ab, ob die Dampfturbine als Kondensationsentnahme-Turbine oder Gegendruckturbine ausgelegt ist. Dies hängt vom Nutzwärmebedarf und vom Nutzwärmetemperaturniveau ab.

### 2.1.6 Dampfturbine

Bei KWK-Anlagen mit Dampfturbinen wird Frischdampf in einem Dampferzeuger erzeugt und anschließend den Dampfturbinen zugeleitet. Die Wärmeauskopplung erfolgt entweder im Entnahme-Kondensationsbetrieb oder im Gegendruck-Betrieb. Beim Entnahme-Kondensations-Betrieb wird an verschiedenen Entnahmestellen der Turbine ein Teil des Dampfstroms zur Wärmenutzung entnommen (s. Abbildung 10). Eine Anzapfkondensations-Turbine stellt eine vereinfachte Form der Entnahmekondensations-Turbinen dar. Statt der geregelten Entnahme erfolgt hier nur eine ungerichtete Anzapfung in einer oder mehreren Druckstufen.

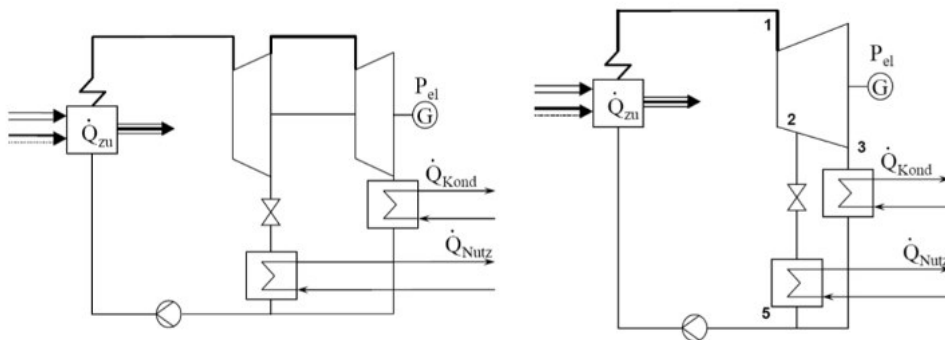


Abbildung 10: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Entnahmekondensations-Turbine und Anzapfkondensations-Turbine [39], [42]

Beim Gegendruck-Betrieb wird Dampf auf einem niedrigen Druckniveau ausgekoppelt (s. Abbildung 11). [38]

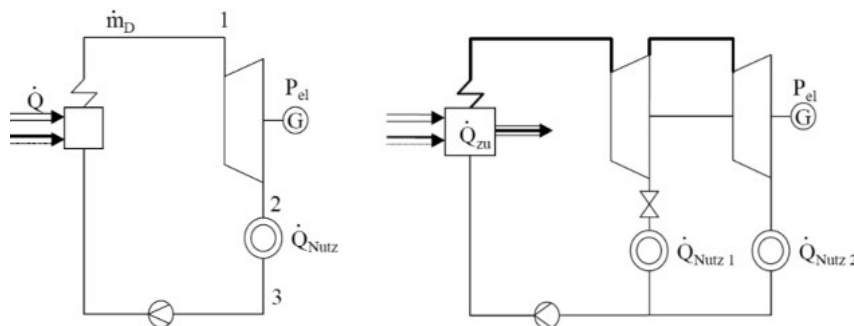


Abbildung 11: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Gegendruckturbine [39], [42]

Die Anlagentechnik ist vielfältig in ihren Varianten und kann somit gut an die örtlichen Randbedingungen und Anforderungen angepasst werden. Ein Hauptvorteil der Heizkraftwerke mit Dampfturbine liegt in den variablen Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Brennstoffarten. Daher können alle günstig verfügbaren bzw. in der Produktion anfallenden festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträger und Reststoffe oder auch nachwachsende Brennstoffe (z. B. Holzschnitzel) zur Feuerung des Dampferzeugers eingesetzt werden. Heizkraftwerke mit Dampfturbinen liegen in der Regel in einem thermischen Leistungsbe- reich von einigen Megawatt bis etwa 200 MW. Sie werden meist in Großbetrieben eingesetzt, in denen durch einen hohen Strom- und Wärmebedarf eine gute Auslastung der Anlage erzielt

werden kann. Die Frischdampfparameter weisen bei kleinen Anlagen etwa 25 bar und 250 °C, bei großen Heizkraftwerken bis 230 bar und 530 °C auf. Der Dampfturbinenwirkungsgrad, besonders von Gegendruckturbinen, sinkt im Teillastbereich stark ab. [38]

Signifikant für KWK-Anlagen ist in den letzten Jahren die Entwicklung der kleinen Dampfturbinen im Leistungsbereich von 100 kW<sub>el</sub> bis 10 MW<sub>el</sub>. Während die kleineren (bis 1 MW) als Gegendruckturbinen ausgelegt sind, können die größeren (5 bis 10 MW) als Gegendruck- oder Entnahmekondensations-Turbinen ausgelegt werden.

Für industrielle KWK-Anlagen kommen Dampfturbinen in der Größenordnung bis 50 MW<sub>el</sub> in Frage. Größere Anlagen bis 200 MW<sub>el</sub> sind selten. Dampfturbinen bis 1.000 MW<sub>el</sub> werden teilweise als KWK-Anlagen zur Versorgung von Fernwärmenetzen betrieben.

Für die kleinen Anlagen (bis 10 MW<sub>el</sub>) werden alle Arten von Brennstoffen außer Kohle eingesetzt. Für die mittleren (10 bis 50 MW<sub>el</sub>) können Gas und Öl, für die größeren (ab 50 MW<sub>el</sub>) Gas, Öl und Kohle eingesetzt werden.

Die Installationskosten einer DT-Anlage im Leistungsbereich 1 bis 10 MW belaufen sich auf 1300 bis 950 EUR/kW, im Leistungsbereich 10 bis 200 MW auf 1100 bis 750 EUR/kW und im Leistungsbereich größer als 200 MW (Steinkohle befeuerte Anlagen) auf 1400 bis 1800 EUR/kW.

## 2.1.7 Optionen der Wärmeverstromung

### 2.1.7.1 Organic Rankine Cycle

Der Organic Rankine Cycle (ORC) basiert auf dem Clausius-Rankine-Kreisprozess, der allen Dampfkraftwerken zugrunde liegt, siehe Abbildung 12. Bei der Verstromung von Wasserdampf sind relativ hohe Temperaturen erforderlich, um einen guten Wirkungsgrad zu erzielen. Der gleiche Prozess kann jedoch auch mit bestimmten organischen Stoffen bei deutlich niedrigeren Temperaturen betrieben werden. Die ORC-Technologie ermöglicht eine Nutzung von (Kraftwerks-) Abwärme bei Temperaturen zwischen ca. 80 und 350 °C. Neben Turbinen sind auch Dampfexpansionsmotoren zur Verstromung am Markt verfügbar. Diese zeichnen sich durch eine sehr gute Teillastfähigkeit bei hohem Wirkungsgrad gegenüber Turbinen aus. Aufgrund der einstufigen Entspannung des Dampfes ist es möglich, einen größeren Teil der Abwärme zur Stromerzeugung zu nutzen. Eine dritte Variante ist die Entspannung in einem Doppelschneckenexpander. Wie beim Dampfexpansionsmotor kann auch hier bis in den Nassdampfbereich entspannt werden. Dank der guten Teillastfähigkeit von ORC-Anlagen kann die Wärmequelle in einem breiten Lastbereich verstromt werden.

„Die ORC-Technologie ist eine relativ junge Effizienztechnologie, die heute an der Schwelle zur breiten Markteinführung steht. Die ORC-Technik hat sich bereits im elektrischen Leistungsbereich von 500-2.000 kW<sub>el</sub> bewährt, sodass ca. 150 ORC-Anlagen in Deutschland installiert wurden.

Erste ORC-Anlagen im Leistungsbereich von 40 bis 60 kW<sub>el</sub> sind seit ca. 3 Jahren im Probebetrieb sowohl bei Verzinkereien, Glaswerken als auch in der Landwirtschaft und befinden

sich ebenfalls in serienreifer Ausführung in der Markteinführung. Mit ORC-Anlagen kann auf breiter Ebene dezentral und CO<sub>2</sub>-frei Elektroenergie erzeugt werden. Damit werden öffentliche Energienetze ohne zusätzlichen Netzausbau entlastet und durch zusätzlich geschaffene Erzeugerkapazitäten grundlastfähig stabilisiert [43].

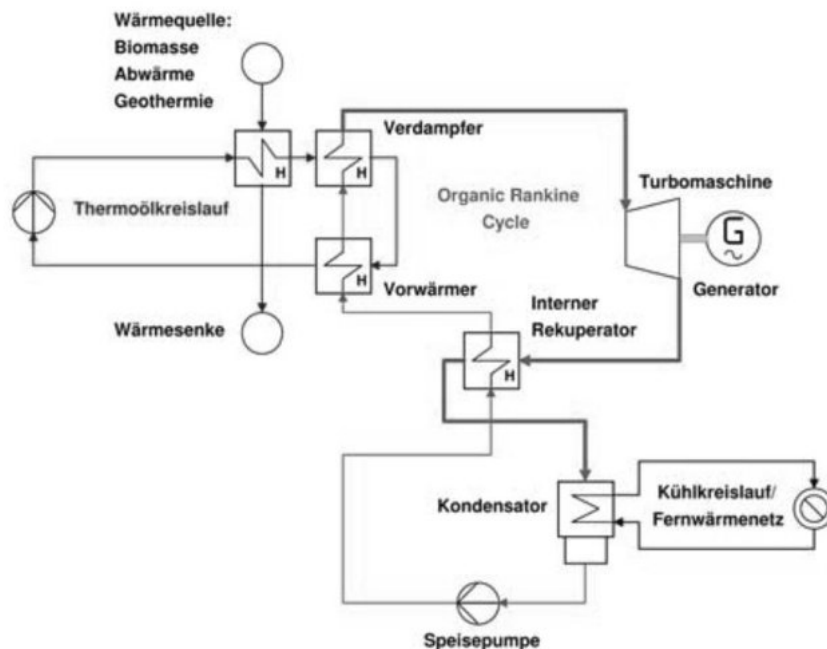


Abbildung 12: Schematische Darstellung des ORC-Prozesses [44]

Das Fluid wird mittels einer Speisepumpe auf einen Betriebsdruck von rund 20 bar gebracht, im Vorwärmer auf Siedetemperatur erhitzt und im Verdampfer vollständig verdampft. Der Sattdampf wird in eine Turbomaschine geleitet, in welcher er expandiert und einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Da die meisten ORC-Fluide eine retrograde Taulinie aufweisen, führt die Expansion zu einer Überhitzung des Fluids. Die entsprechende Wärmeleistung muss vor der Kondensation abgeführt werden, mittels eines Regenerators wird sie zur Vorwärmung des Fluids vor der Verdampfung genutzt oder in KWK-Anlagen ausgekoppelt. Nach der Kondensation des Fluids schließt sich der Kreislauf mit dem Eintritt in die Speisepumpe. Mit den standardmäßig eingesetzten Fluiden und Schaltungskonzepten wird dabei ein thermischer Wirkungsgrad im Bereich von 10 bis 20 % erreicht. [44]

Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet. Die Fluide müssen je nach Einsatztemperatur gewählt werden. Gebräuchlich sind dabei Kältemittel, Alkane sowie Silikonöle.

Da organische Fluide nicht beliebig temperaturbeständig sind, muss je nach Temperatur der Wärmequelle ein Zwischenkreislauf mit Thermoöl zur Wärmeübertragung vorgesehen werden. Dieser kann auch genutzt werden, um diskontinuierlich anfallende Wärmeströme zu gleichmäßigen.



### 2.1.7.2 Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren (TEG) erlauben die direkte Umwandlung von Temperaturdifferenzen in elektrische Spannung. Sie basieren auf dem Seebeck-Effekt. Dieser bewirkt, dass in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entsteht. Die typische Größenordnung erzielbarer Spannungen liegt für Metalle bei Raumtemperatur bei ca.  $10 \mu\text{V/K}$ . Die Effizienz dieses Energy Harvesting liegt nach Stand der Technik bei etwa 7 %. [45]

Bei TEG handelt es sich um Festkörpermodule, die ohne bewegliche Teile arbeiten und deshalb sehr robust sind. Sie können Abwärme, die sonst an die Umgebung abgegeben wird, direkt in elektrischen Strom umwandeln. Dadurch kann die im Rahmen von Prozessen entstandene Abwärme effizient genutzt und somit gleichzeitig die Umwelt entlastet werden. Der praxisorientierte Einsatz von TEG befindet sich derzeit noch in der Pilot- bzw. der F&E-Phase.

### 2.1.7.3 Thermochemische Rekuperation

Die Thermochemische Rekuperation (TCR) ist eine Technologie, die mit der Abgaswärme von motorischen KWK-Anlagen den Brennstoff dieser Anlagen veredelt, siehe Abbildung 13. Sie nutzt einen Teil der thermischen Energie des Abgases zur Erhöhung des Energieinhalts des zugeführten Brennstoffs durch Dampfreformierung um bis zu 25 %. Simulationen von KWK-Anlagen mit TCR ergaben mögliche Steigerungen des elektrischen Wirkungsgrads von bis zu 5 %-Punkten. Optional kann der Brennstoff vollständig bzw. nur teilweise dem TCR-Reaktor zugeführt oder der Brennstoff direkt dem Motor zudosiert werden. Somit kann mittels TCR die Stromkennzahl von motorischen KWK-Anlagen in Grenzen variiert werden. Die Technologie befindet sich zurzeit noch im Laborstadium.

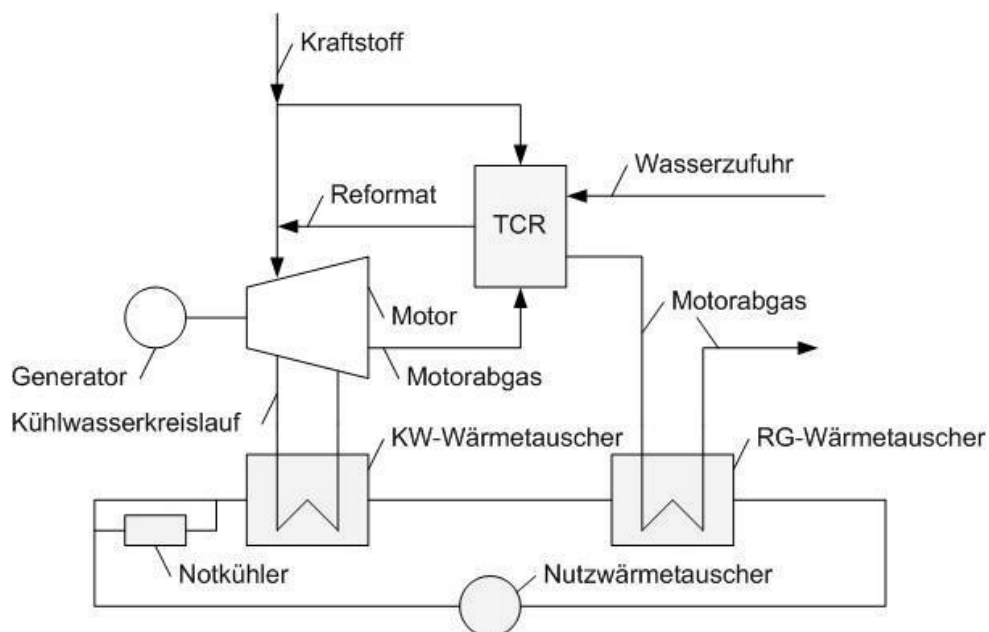


Abbildung 13: TCR-Prinzip [46]

## 2.2 Alternative Systeme zur Wärmebereitstellung

### 2.2.1 Heizwertkessel

Die im Gerätebestand dominierenden Heizwertkessel nutzen die bei der Verbrennung von Brennstoffen freigesetzte sensible Wärme – auch Heizwert genannt [47]. Bei den Heizwertkesseln werden zwei verschiedene Typen unterschieden, welche teilweise noch zulässig, jedoch technisch veraltet sind. Maßgeblicher Unterschied zwischen diesen Systemen, den Konstanttemperaturkesseln (auch Standardkessel) und den Niedertemperaturkesseln, ist ihre Kesselwassertemperatur. Die hier im Fokus stehenden Konstanttemperaturkessel werden ganzjährig, also auch bei mildem Wetter, mit gleichbleibend hoher Kesselwassertemperatur betrieben. Diese liegt über 60 °C, wobei auch Kesselwassertemperaturen von 80 bis 90 °C üblich sind. Auf diese Weise wird die Kondensation des Wasserdampfs im Kessel und Schornstein und somit deren Korrosion vermeiden. Jedoch resultieren daraus hohe Wärmeverluste an der Kesselwand, in den Rohrleitungen und im Schornstein. Ein hoher Anteil an Energie geht darüber hinaus mit den Abgasen verloren. Weitere Merkmale der Konstanttemperaturkessel, welche vorwiegend bis 1980 eingesetzt wurden, sind eine geringe Dämmung des Kessels und eine Überdimensionierung der Kesselleistung durch eine zum Zeitpunkt der Installation großzügige Auslegung oder zwischenzeitliche Dämmmaßnahmen am Gebäude [48]. Die Erwärmung des Heizungswassers auf über 60 °C ist des Weiteren energieaufwändiger als die Anhebung der Vorlauftemperatur auf 45 °C, wie sie bei Niedertemperaturkesseln üblich ist [49]. Entsprechend ist der Jahresnutzungsgrad dieser Geräte mit 60 bis 70 % vergleichsweise gering [49] [50]. Unter anderem aus diesem Grund kommen Konstanttemperaturkessel heute nur noch als Festbrennstoffkessel zum Einsatz [51]. [52][53]

Die geringen Nutzungsgrade waren ausschlaggebend dafür, dass Konstanttemperaturkessel seit dem 1.1.1998 gemäß der damals gültigen Heizanlagenverordnung in Ein- und Zweifamilienhäusern nicht mehr eingebaut werden durften [54]. Auch heute wirkt man mit der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) dem weiteren Betrieb dieser vergleichsweise ineffizienten Heizsysteme entgegen. Nach der Energieeinsparverordnung 2014 dürfen Konstanttemperaturkessel nicht mehr betrieben werden, wenn sie vor dem 1. Oktober 1978 eingebaut wurden. Geräte, die vor dem 1. Januar 1985 eingebaut wurden, müssen bis zum 1. Januar 2015 außer Betrieb genommen werden und jüngere Geräte nach einer Lebensdauer von 30 Jahren. Einige selbstgenutzte Ein- und Zweifamilienhäuser sind von dieser Pflicht ausgenommen. [55]

Für Festbrennstoffe, wie Koks, Gaskoks, Kohle, Scheitholz, Hackgut und Holzreste, sind heute Systeme in einem thermischen Leistungsbereich von 10 bis 56 kW verfügbar. Die Preisspanne reicht, basierend auf den öffentlich verfügbaren Preislisten entsprechender Hersteller, von rund 2.500 bis 6.500 EUR und ist abhängig von der Leistung der Geräte. Die spezifischen – auf die Leistung bezogenen – Kosten von Konstanttemperaturkesseln für den Festbrennstoff Holz sinken mit steigender Leistung und variieren laut Datenbasis zwischen 120 und 285 EUR/kW, siehe Anhang A2.

## 2.2.2 Niedertemperaturkessel

Ein Niedertemperaturkessel entspricht im Wesentlichen dem konventionellen Heizwertkessel, ist jedoch effizienter. Er hat die seit 1998 nicht mehr zulässigen Standard- und Konstanttemperaturkessel mit thermischen Leistungen unter 400 kW und Vorlauftemperaturen von mindestens 70 °C abgelöst. Niedertemperaturkessel gehören heute jedoch nicht mehr zum Stand der Technik. Seit 1990 ist daher der Marktanteil dieser Technologie zurückgegangen, zu Gunsten von Brennwertgeräten, Holzheizkesseln und der verstärkten Einbindung solarthermischer Technologien [56].

Der maßgebliche Unterschied zwischen Niedertemperatur- und Standard- bzw. Konstanttemperaturkesseln ist ihre Betriebstemperatur. Über eine Absenkung der Betriebstemperatur werden die hohen Wärmeübertragungsverluste verringert, wodurch eine Effizienzsteigerung erreicht wird. Die Betriebstemperatur kann dabei nur soweit gesenkt werden, dass es nicht zum Auskondensieren des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes (Korrosionsgefahr) kommt. Maßgeblich hierfür ist die Rücklauftemperatur. Sollte diese unter die Taupunkttemperatur des Wasserdampfes fallen, ist ein Auskondensieren nicht zu verhindern. In der Regel wird daher bei der hydraulischen Einbindung in das Hausnetz eine Rücklauftemperaturenanhebung vorgesehen. Diese sorgt mit einer Zumischung von Wasser aus dem Heizungsvorlauf für eine ausreichend hohe Rücklauftemperatur. Die Kesselregelung erfolgt üblicherweise über eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturenanpassung. Niedertemperaturheizkessel können prinzipiell in jedem Gebäude zur Beheizung eingesetzt werden. Im EFH-Bereich werden meist geräuscharme atmosphärische Brenner eingesetzt, welche die Verbrennungsluft aus dem Aufstellraum entnehmen. Große Kessel werden häufig mit Gasgebläsebrennern betrieben. [57]

Vorteile dieser Systeme sind die leichte Austauschbarkeit ohne bauliche Maßnahmen, die günstige Anschaffung sowie die Langlebigkeit, Robustheit und der geringe Wartungsaufwand. Standardprodukte sind daher preiswert, zuverlässig und bewährt. Nachteilig ist, dass die Investition für Niedertemperaturkessel von der KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) nicht mehr gefördert wird. Darüber hinaus entstehen durch schlechtere Wirkungsgrade – verglichen mit Brennwertgeräten – hohe Energiekosten und größere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Nutzungsgrade aktueller Geräte bewegen sich in einem Rahmen von 82 bis 94 %. Bei der Installation von Niedertemperaturkesseln muss auf die Eignung des Schornsteins geachtet werden. Bei einem Ersatz für einen Gaskessel mit Systemtemperaturen von 90 °C/70 °C ist der Kamin vom Schornsteinfeger zu überprüfen. Eine Modernisierung von Abgasanlagen ist mit der heutigen Technik in der Regel einfach, schnell und ohne hohe Kosten durchführbar. [57]

Niedertemperaturkessel sind, verglichen mit den übrigen verfügbaren Technologien, günstig in der Anschaffung. Die niedrigen Investitionskosten relativieren sich jedoch teilweise durch höhere Verbrauchskosten, welche vorwiegend durch geringere Nutzungsgrade entstehen. Grundlegend sind Niedertemperaturkessel für Flüssiggas teurer als für Erdgas [58]. Die Preisspanne für Kesselleistungen zwischen 50 bis 1.000 kW reicht von 3.300 bis 23.000 EUR. Die spezifischen, auf die thermische Leistung der Niedertemperaturkessel bezogenen Netto-Preise nehmen jedoch mit zunehmender Leistung ab. Im Mittel sind spezifische Kosten von rund 80 EUR/kW zu erwarten, siehe Anhang A2.

### 2.2.3 Brennwertkessel

Brennwertkessel nutzen im Vergleich zu den Niedertemperatur- und Konstanttemperaturkesseln auch die in den Verbrennungsabgasen enthaltene latente Wärme. Dabei werden die Abgase stärker abgekühlt, bis ein Teil des darin enthaltenden Wassers kondensiert. Die dabei frei werdende Kondensationswärme wird zur Vorwärmung des Wassers genutzt. Für die gewünschte Kondensation sind niedrige Rücklauftemperaturen erforderlich. Daher eignen sich insbesondere Heizsysteme mit niedrigen Vor- und Rücklauftemperaturen, wie z. B. Fußbodenheizungen. Witterungsgeführte Regelungen sowie modulierende Brenner fördern ebenfalls die Brennwertnutzung. Der Modulationsbereich kann zwischen 17 bis 100 % betragen [59]. Die Kondensation der Abgase erfordert konstruktive Maßnahmen am Heizkessel und am Abgassystem, wie z. B. ein Wärmeübertrager aus Edelstahl und Abgasleitungen aus Edelstahl oder Kunststoff.

Der Brennwertkessel kann in der heutigen Zeit als Referenzanlage gesehen werden. Nach fast 20 Jahren auf dem Markt und stetiger Weiterentwicklung kann mit der modernen Brennwerttechnik annähernd das physikalische Optimum bei der Verbrennung von Energieträgern erreicht werden. Auf den Heizwert des Energieträgers bezogene Wirkungsgrade von bis zu 111 % bei Gas und 106 % bei Heizöl sind möglich [59]–[61]. Brennwertkessel zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit und Zuverlässigkeit aus. Wandhängende Geräte liefern Leistungen bis zu 100 kW und können in Kaskaden hintereinandergeschaltet werden, um eine höhere Wärmeleistung für größere Wohngebäude bereitzustellen. Bodenstehende Brennwertkessel sind in der Lage mehr als 10.000 kW Wärmeleistung bereitzustellen. In Verbindung mit einer thermischen Solaranlage lässt sich der Energieeinsatz weiter verringern und macht dieses System auch bei Neubauten sowie als Modernisierung im Bestand interessant. [57]

In Deutschland ist diese Art der Gebäudebeheizung mit einem Marktanteil von 55 % und rund 336.000 verkauften Erdgas-Brennwertkesseln die zurzeit (im Jahr 2012) dominierende Technologie der zentralen Wärmeerzeuger[62].

Die Investitionskosten für Gas- und Öl-Brennwertkessel sind primär von deren thermischer Leistung abhängig. Prinzipiell gilt, dass für Systeme mit größerer Heizleistung ein höherer Kostenaufwand zu kalkulieren ist. Die spezifischen, auf die thermische Leistung der Brennwertkessel bezogenen Kosten nehmen jedoch mit zunehmender Leistung ab. Dazu wurden frei verfügbaren Brutto-Anschaffungspreise marktführender Hersteller im Zuge der Vergleichbarkeit auf die Netto-Preise und anschließend auf die maximale thermische Leistung der Brennwertkessel bezogen, siehe Anhang A2. Im Mittel beträgt der Grundpreis für Brennwertkessel rund 120 EUR/kW.

## 2.2.4 Solarkollektoren

### 2.2.4.1 Flachkollektoren

In Deutschland haben Flachkollektoren derzeit einen Marktanteil von etwa 90 % bezogen auf die insgesamt verbaute Kollektorfläche. Bei Flachkollektoren wird der Absorber in der Regel mit einem Gehäuse aus beschichtetem Stahlblech, Aluminium oder Edelstahl und einer Frontabdeckung aus eisenarmem Solarsicherheitsglas dauerhaft vor Witterungseinflüssen und Abkühlung durch Luftbewegungen geschützt. Eine Antireflex-Beschichtung des Glases kann zusätzlich die Reflexion reduzieren. Eine Wärmedämmung aus Mineralwolle mindert die Wärmeverluste. Als Absorbermaterial werden meist Kupferrohre verwendet. Bei Standard-Flachkollektoren hat sich eine Bruttokollektorfläche von ca. 2 bis 2,5 m<sup>2</sup> durchgesetzt. Flachkollektoren werden überwiegend zur solaren Trinkwarmwassererwärmung eingesetzt.

Als Richtwert für die Dimensionierung gilt für Flachkollektoren eine Kollektorfläche von 1,5 m<sup>2</sup>/Person. Wesentlich für den Kollektorwirkungsgrad sind neben spezifischen Kennwerten die Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Außenluft. Je größer die Temperaturdifferenz, desto größer werden die thermischen Verluste – der Wirkungsgrad sinkt also mit dem Ansteigen der Betriebstemperatur des Kollektors oder mit dem Fallen der Außenlufttemperatur. Weiterhin ist die Absorber-Beschichtung für die energetische Umwandlung von Strahlungsenergie in Wärme ausschlaggebend.

Die Kosten für Solarkollektoren sind maßgeblich von der Kollektorfläche abhängig. Größere Kollektoren sind in der Regel teurer. Des Weiteren können die Preise je nach Ausstattung und Verarbeitung variieren. Eine bessere Isolierung oder höhere Wirkungsgrade werden häufig durch qualitativ höherwertige Materialien erzielt, was sich im Preis niederschlägt. Für Flachkollektoren können Preise von 220 bis 540 €/m<sup>2</sup> [63] angegeben werden. Die Spreizung ergibt sich außerdem daher, dass teilweise bereits Anschlussteile oder weiteres Zubehör im Lieferumfang enthalten sind.

### 2.2.4.2 Röhrenkollektoren

Beim Röhrenkollektor ist der Absorber in einer unter Vakuum gesetzte (evakuierte) Glasröhre eingebaut. Das Vakuum besitzt gute Wärmedämmeigenschaften, sodass die Wärmeverluste – besonders bei hohen Temperaturen, speziell also unter Betriebsbedingungen, die bei der Gebäudeheizung oder Klimatisierung zu erwarten sind – geringer sind als bei Flachkollektoren. Voraussetzung für die Zuverlässigkeit und eine lange Nutzungsdauer von Vakuum-Röhrenkollektoren ist die langfristige Aufrechterhaltung des Vakuums durch eine sichere Abdichtung. Die minimalen Gasmengen (hauptsächlich Wasserstoff), die dennoch in die Röhre eintreten, werden durch einen dünnen Film aus Barium, der auf die Innenseite der Röhre aufgedampft wird, gebunden.

Vakuum-Röhrenkollektoren weisen durch die verbesserte Wärmedämmung einen 10 bis 15 % höheren Wirkungsgrad als Flachkollektoren auf. Die Glasröhren werden in Reihen nebeneinander befestigt und zu Kollektorfeldern auf dem Dach verschaltet.

Bei Vakuum-Röhrenkollektoren werden verschiedenen Arten von Absorbern unterschieden. Zum einen die Finnenabsorber und zum anderen die runden Glasabsorber (CPC-Kollektoren). Bei den Finnenabsorbern, einer flachen Finne mit einem darunter liegenden Absorberrohr, gibt es zwei unterschiedliche Bauformen. Bei direkt durchströmten Röhren wird ein Koaxialrohr eingesetzt. Im inneren Rohr wird der Wärmeträger vom Rücklauf in die Röhre geführt, über das äußere am Absorber verschweißte Rohr wird das Medium zurückgeführt und dabei erwärmt. Die direkt durchströmten Vakuum-Röhrenkollektoren eignen sich deshalb besonders gut für die lageunabhängige Montage. Der Begriff „Heat-Pipe-Prinzip“ beschreibt ein Konstruktionsprinzip von Vakuum-Röhrenkollektoren. Hierbei wird die Röhre nicht direkt vom Solarmedium durchströmt. In einem in sich geschlossenen Absorberrohr wird bei Solarstrahlung ein Trägermedium (meistens Wasser) verdampft. Am oberen Ende der Röhren kondensiert der Dampf im sogenannten Kondensator – hier wird die Energie an das Wärmeträgermedium weitergegeben. Damit eine Zirkulation der Verdampferflüssigkeit im Wärmerohr (Heat-Pipe) gewährleistet ist, müssen die Röhren mit einem Neigungswinkel von mindestens 25° schräg aufsteigend montiert werden. Das Wärmerohr ist an den Kondensator angeschlossen, der die Wärme in einem Doppelrohr-Wärmetauscher abgibt. Durch diese „trockene Anbindung“ ist ein Drehen oder Austauschen einzelner Röhren auch bei gefüllter, unter Druck stehender Anlage möglich. Abweichungen von der Südausrichtung können durch axiales Drehen der Vakuum-Röhren kompensiert werden.

Bei den sogenannten CPC-Vakuumröhren werden zwei Glasröhren ineinander geschoben, zwischen denen sich das Vakuum befindet. Die Absorberbeschichtung ist auf die innere Glasröhre aufgedampft. In das Rohr werden Wärmeleitbleche mit Röhren geschoben, welche die Solarwärme abtransportieren. Unter dem Begriff CPC (Compound Parabolic Concentrators) werden Spiegelsysteme verstanden, die mit parabolisch geformten Spiegelrinnen die direkte Sonneneinstrahlung auf die Glasröhren leiten und dadurch höhere Arbeitstemperaturen erreichen. CPC-Röhrenkollektoren müssen mit einem Neigungswinkel von mindestens 30° aufgestellt werden.

Entscheidend für die Auswahl des Kollektortyps ist – neben dem Platzangebot und den Aufstellbedingungen – der Ertrag der Solaranlage. Der Kollektorwirkungsgrad hängt von der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Kollektortemperatur und der Außenluft ab. Weiterhin ist das Preis-Leistungs-Verhältnis ausschlaggebend. Röhrenkollektoren sind aufwendiger herzustellen als Flachkollektoren und daher bezogen auf die Flächeneinheit teurer.

Vorteile von Röhrenkollektoren gegenüber Flachkollektoren

- Es können höhere Betriebstemperaturen erreicht werden
- Bei höheren Temperaturen sind die Verluste geringer als bei Flachkollektoren
- Bei gleicher effektiver Absorberfläche ist der Energieertrag höher

Die Kosten für Röhrenkollektoren sind ebenfalls von der Kollektorfläche abhängig. Auch bei diesen Kollektoren variieren die Preise je nach Ausstattung und Verarbeitung. Die Kosten für Röhrenkollektoren sind auf Grund der höheren Leistung gegenüber Flachkollektoren ebenfalls höher. Die Preisspanne reicht hier von 350 bis 850 €/m<sup>2</sup> [63]. Zu beachten ist wie bei den Flachkollektoren die mitgelieferte Ausstattung.

### 2.2.4.3 Brennwertkessel mit solarer Unterstützung

Die solare Energie soll vorrangig zur Deckung des Wärmebedarfes genutzt werden, solange keine hygienischen oder Komfort-Einbußen zu erwarten sind. Der Solarspeicher ist das zentrale Bauteil dieses Anlagentyps, sämtliche Wärmelieferanten und Wärmenutzer sind daran angeschlossen. Das Kollektorfeld wandelt die solare Strahlung in Wärme um und gibt diese an das zirkulierende Wärmeträgermedium ab.

Bei der Planung eines solchen Systems gibt es einige zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen, die bei einem konventionellen System nicht erforderlich sind. Beispielsweise der Speicher (s. Kapitel 0): Dieser sorgt für den Ausgleich der zeitlich versetzten Wärmebedarfe und Wärmelieferung und trägt somit einen großen Anteil an der Effizienz des Systems. Je nach System und Auslegung werden Warmwasserspeicher mit 300 l bis über 1.000 l notwendig.

Das Kollektorfeld und die damit erzielbare Leistung sind stark abhängig von dem Aufstellort, der Dachneigung, der Ausrichtung und zusätzlich von der Verschattung durch Bäume oder andere schattenbildende Gegenstände. Daher ist eine genaue Begutachtung des Aufstellortes dringend zu empfehlen.

Wie bereits beschrieben handelt es sich bei diesem System um eine Verbesserung des Brennwertgerätes. Wirk- und Nutzungsgrade werden ebenfalls auf den Heizwert des Brennstoffes bezogen und liegen bei einwandfreiem Einbau und einer gut durchdachten Regelstrategie über denen des reinen Brennwertgerätes. Bei gut gedämmten Gebäuden können die Deckungsanteile der Solaranlage 35 % des gesamten Wärmebedarfes betragen, dies verdeutlicht das Potenzial solcher Anlagen. Die gängige Praxis zeigt jedoch, dass die Wärmebedarfe von Gebäuden höher sind und die Deckungsanteile entsprechend geringer. Die Wirkungsgrade der Kollektoren geben zwar Aufschluss über die nutzbare solare Strahlung, jedoch lässt sich kein Rückschluss auf die erzielbaren Einsparungen treffen.

### 2.2.5 Holzpelletkessel

Holzpellets sind aus Sägemehl gepresste Briketts. Ihre Dicke liegt bei ca. 6 mm und die Länge variiert zwischen 5 und 40 mm. Ein wesentlicher Vorteil von Pellets ist ihre Homogenität. Durch die Mischung verschiedener Holzlieferungen kann bei der Produktion eine gleich bleibende durchschnittliche Qualität gewährleistet werden. Um die Verbrennungseigenschaften zu verbessern, werden unterschiedliche Produktionsteilprozesse umgesetzt. Dadurch werden eine gesteigerte volumetrische Energiedichte und somit logistische Vorteile erreicht. Die geringe Größe im Gegensatz zu Scheitholz und die größere Homogenität im Gegensatz zu Hackschnitzel ermöglicht eine konstantere und effizientere Betriebsweise entsprechender Kessel. Durch die Brennstoffeigenschaften sind Pelletkessel über einen größeren Leistungsbe- reich modulierbar und benötigen kleinere Wärmespeicher. Die Herstellung von Holzpellets ist jedoch kosten- und energieintensiver. [57]

Das Angebot der Pelletheizungen ist vielfältig, wobei das thermische Leistungsangebot von rund 4 bis 5.000 kW reicht [64]. Im häuslichen Bereich werden vorwiegend Systeme mit thermischen Nennleistungen von 6 bis 30 kW eingesetzt [65]. Grundsätzlich werden bei den

auf dem Markt befindlichen Pelletheizungen drei Bauarten unterschieden: Pelletöfen, Pellet-Zentralheizungen und Pellet-Brenneraufsätze. Pelletöfen sind für eine Aufstellung im Wohnbereich konzipiert und werden überwiegend zur Beheizung einzelner Räume und Häuser mit niedrigem Energieverbrauch eingesetzt. Pellet-Zentralheizungen werden im Heizungsraum installiert und dienen der Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser für ein gesamtes Gebäude. Im Falle einer Brennstoffumstellung bei noch gut erhaltenen Ölheizkesseln werden Pellet-Brenneraufsätze eingesetzt. Sie machen eine vergleichsweise einfache Umstellung des Brennstoffs von Heizöl auf Holzpellets möglich. Pelletöfen und Pellet-Zentralheizungen haben einen technologisch sehr hohen Entwicklungsstand erreicht [66]. Diese Anlagen sind ausgereift und entsprechen dem Stand der Technik [57][64]. [67]

Bei den überwiegend eingesetzten Pellet-Zentralheizungen werden Pellets in einem Tank gelagert und über ein Sauggebläse, eine Schneckenpumpe oder ein Förderband in den Feuerungsraum eingebracht. Die Pellets werden über ein Fallrohr oder einen Fallschacht von oben auf das Glutbett gegeben, welches sich entweder in einer Brennschale (Schalenfeuerung) oder auf einem Kipprost befindet. Dort wird Luft von unten bzw. seitlich ringförmig durch Düsenbohrungen eingeleitet. Pelletkessel werden mit Abwurfschacht, Unterschubfeuerungen oder Schrägrostfeuerungen mit Quereinschub angeboten. [65][57]

Die automatisierte Beschickung der Förderung hat einen positiven Effekt auf den Wirkungsgrad, da Bedienerfehler – wie beispielweise eine Überladung des Feuerraums – verhindert werden [57]. Pelletkessel weisen heute Kesselwirkungsgrade zwischen 75 und 95 % auf [65][57]. Die technische Optimierung hat drüber hinaus zu einer erheblichen Absenkung des Schadstoffausstoßes geführt. Weitere Wirkungsgradsteigerungen können zukünftig durch sekundäre Maßnahmen realisiert werden. Entsprechende Entwicklungen von serienmäßigen Pelletkesseln mit Brennwerttechnologie sind weit vorangeschritten und befinden sich in der Markteinführung. [66]

Um die Gesamtbrenndauer zu erhöhen und Ausfallzeiten zu verringern, werden Brauchwasserspeicher installiert. Im Neubau kommt wegen des geringeren und ungleichmäßigeren Wärmebedarfs oftmals ein zusätzlicher Pufferspeicher zum Einsatz [64]. Durch die damit erzielte Verbrennungsoptimierung und durch den in kleinen Einheiten dosierbaren Brennstoff können Pelletheizungen in einem weiten Leistungsbereich (bis herunter zu 20 % der Nennleistung) modulierend betrieben werden. Der modulierende Betrieb und die gleitende Kesseltemperaturregelung ermöglichen eine sehr gute Anpassung an die Anforderungen bezüglich Außentemperatur und Leistungsabruf. Ein Pufferspeicher kann dennoch zweckmäßig sein, um z. B. die Ein- und Ausschalthäufigkeit der Heizung zu reduzieren. Dies kann positiv auf den Pelletverbrauch, die Abgasemissionen und die Lebensdauer von Kessel und Schornstein wirken. [66]

Vorteil einer Pelletheizung ist die Umweltfreundlichkeit aufgrund der CO<sub>2</sub>-Neutralität und der kostengünstige Verbrauch. Nachteilig sind derzeit die hohen Anschaffungskosten, der erhöhte Platzbedarf für einen Heiz- und Lagerraum sowie die Wartung in Form diskontinuierlicher Entaschung. [65][57]



Wie bei konventionellen und anderen alternativen Heiztechnologien steigen die Anschaffungskosten für Holzpelletkessel mit zunehmender thermischer Leistung, siehe Anhang A2. Für Einzelgeräte im häuslichen Bereich (bis 30 kW) sind Netto-Preise bis ca. 13.500 EUR zu erwarten, im GHD-Sektor und zur Fernwärmeversorgung (bis 300 kW) liegt der maximale Netto-Preis bei rund 46.700 EUR. Die scheinbar hohen Anschaffungskosten relativieren sich bei Betrachtung der spezifischen – auf die thermische Nennleistung bezogenen – Netto-Preise. Im kleinen Leistungsbereich liegen diese im Mittel bei rund 540 EUR/kW, wohingegen die Leistungsklasse über 30 kW ein mittlerer spezifischer Netto-Preis von ca. 265 EUR/kW aufweist. Zusätzlich sind bei der Umstellung auf einen Pelletkessel Lagerungskosten zu berücksichtigen, welche ca. 4.200 EUR betragen<sup>1</sup> [68]. [66]

### 2.2.6 Holzhackschnitzelkessel

Hackschnitzel, auch als Holzhackschnitzel oder Hackgut bekannt, werden überwiegend aus Abfallprodukten der Land- und Forstwirtschaft gewonnen. Genutzt werden Waldrestholz und anderes Schwachholz, Holz aus Durchforstungs- und Landschaftspflegemaßnahmen sowie aus landwirtschaftlichen Kurzumtriebs-Plantagen, Industrierestholz und Gebrauchtholz. Wesentliche Eigenschaftsparameter von Hackschnitzeln sind der Wassergehalt, Aschegehalt, Korngrößenverteilung, Schüttraumdichte sowie der Heizwert. Die Qualität von Hackschnitzeln ist je nach äußeren Umständen, der Gewinnung und Lagerung von einem hohen Wassergehalt gekennzeichnet. Diese Faktoren führen bei ihrer Verbrennung zu einer sinkenden Effizienz der Hackschnitzelkessel. Demgegenüber steht jedoch eine konstante und genaue Betriebsweise aufgrund der vergleichsweise geringen Größe der Hackschnitzel. Verglichen mit anderen Brennstoffen sind Holzhackschnitzel ein preiswerter Brennstoff und zählen zu den günstigsten Möglichkeiten, mit Holz zu heizen [69][70]. [57][67]

Als feste biogene Brennstoffe finden Hackschnitzel Einsatz in Hackschnitzelheizungen von Ein- und Mehrfamilienhäusern, in kommunalen und gewerblichen Heizwerken und in Biomasse-Heizkraftwerken [69]. Aufgrund der starken Schwankungen von Qualität und Preis der Hackschnitzel erzeugen die Betreiber die benötigten Hackschnitzel überwiegend selbst. Daher sind land- und forstwirtschaftliche sowie holzbe- und -verarbeitende Betriebe besonders für den Einsatz von Hackschnitzelkesseln geeignet [70]. Hackschnitzelanlagen werden auch in Wohnhäusern, Betrieben und Einrichtungen genutzt, die im Umfeld der Land- und Forstwirtschaft liegen.[57][67]

Die Anforderungen an Anlagen und Betreiber sind aufgrund der schwankenden Qualität der Hackschnitzel hoch, sodass Hackschnitzelanlagen i. d. R. erst ab Nennleistungen über 30 kW wirtschaftlich betrieben werden [67]. Generell sind Hackschnitzelsysteme in einem Nennwärmebereich von 15 kW bis zu einem höheren zweistelligen MW-Bereich am Markt verfügbar [71]. Überwiegend werden dabei Systeme mit Nennleistungen zwischen 25 und 400 kW angeboten [67]. [57]

---

<sup>1</sup> Anteilige Kosten für Kellerraum, automatische Pelletzufuhr, Am Beispiel eines Einfamilienhauses mit etwa 150 Quadratmetern Wohnfläche [68]

Derzeit sind für Hackschnitzelheizungen drei Bauformen verbreitet: die Rostfeuerung, die Unterschubfeuerung und die Quereinschubfeuerung. Im Kleinanlagenbereich werden vorwiegend Rostfeuerungen und Unterschubfeuerungen angeboten. Im Leistungsbereich um und größer 1 MW sind ebenfalls Rostfeuerungen die dominierende Technologie. Derzeit werden im oberen Leistungssegment außerdem Vorschubrost-, Wanderrost- und Rückschubrostfeuerungen angeboten. Hackschnitzelheizungen verfügen über ein Brennstofflager, aus welchem der Brennstoff über ein Austragungssystem, z. B. eine Förderschnecke, in die Feuermulde des Heizkessels eingebracht wird. In der Feuermulde wird ein Teil der Verbrennungsluft als Primärluft eingeblasen. Dort finden die Trocknung, die pyrolytische Zersetzung, die Vergasung der Hackschnitzel sowie der Abbrand der Holzkohle statt. Dabei wird die Sekundärluft vor dem Eintritt in die heiße Nachbrennkammer mit den brennbaren Gasen vermischt, sodass alle brennbaren Gase vollständig oxidieren. Im anschließenden Wärmetauscher wird die Wärme der Gase an das Prozesswasser abgegeben. Oftmals dient ein Zyklon als Trägheitsentstauber, bevor die Abgase durch das Kaminsystem in die Atmosphäre gelangen. Die erforderlichen Ascheaustragungssysteme werden zunehmend mittels Austragsschnecke automatisiert ausgeführt, um eine Verbesserung des Bedienkomforts zu erzielen.[65] [69]. Durch die heute genutzte automatische und bedarfsgemäße Beschickung bieten Hackschnitzelheizungen den Komfort einer vollautomatisch geregelten konventionellen Heizungsanlage [70]. Eine Leistungs- und Verbrennungsluftregelung auf Basis der Kesselwasser- und Abgastemperatur-sensoren bzw. Lambdasonde sowie die integrierte Heizkreisregelung sind Stand der Technik [69]. So können Hackschnitzelanlagen ähnlich wie Pelletkessel in einem Lastbereich von 30 bis 100 % der Nennlast betrieben werden, wodurch der Einsatz von Wärmespeichern nicht zwingend erforderlich ist. Die Ergänzung eines Pufferspeichers steigert jedoch die Effizienz und Umweltverträglichkeit, da die Hackschnitzelkessel seltener ein- bzw. ausgeschaltet werden, wodurch der Brennstoffbedarf sowie die Emissionen sinken. Auch wird eine zu starke Drosselung der Kesselleistung in Übergangszeiten und bei der Nachtabenkung vermieden [70].[57]

Heute verfügbare Kleinanlagen weisen Wirkungsgrade zwischen 85 und 90 % auf, Großanlagen erzielen bereits Wirkungsgrade um 95 % [65]. Die Treibhausgasemissionen von Hackschnitzelsystemen sind vergleichbar mit denen der übrigen Systeme für Holzbrennstoffe, die Staubemissionen fallen aufgrund der Brennstoff- und Feuerungseigenschaften jedoch höher aus. Derzeit können die vergleichsweise großen Aschemengen, ein unvollständiger Ausbrand der Asche sowie die Bildung von Schlacke aufgrund zu hoher Wassergehalte Probleme bei der Nutzung von Hackschnitzeln darstellen. [72]

Auf Basis der Marktübersicht aus [69] kann eine Richtpreisfunktion für die spezifischen Netto-Preise von Hackschnitzelkesseln für das Jahr 2012 abgeleitet werden, siehe Anhang A2. Die spezifischen Anschaffungskosten für Einzelgeräte im Leistungsbereich von bis 50 kW variieren zwischen 300 und 600 EUR/kW [72]. Der maximale Anschaffungspreis für Hackschnitzelkessel mit 50 kW thermischer Leistung liegt bei ca. 900 EUR/kW [73]. Für eine Hackschnitzelanlage im Leistungsbereich um 100 kW sind etwa 550 EUR/kW zu erwarten, bei Leistungen um 500 kW fällt der spezifische Preis auf ca. 240 EUR/kW. Je nach baulichem Aufwand sind jedoch erhebliche Schwankungen möglich [73].

## 2.2.7 Scheitholzkessel

Als Scheitholz wird in handliche Stücke gesägtes und gespaltenes Rundholz bezeichnet [74]. Überwiegend wird dazu Holz verwendet, das für den Verkauf an weiterverarbeitende Betriebe nicht geeignet ist. Dies sind beispielsweise Abschnitte aus dem Erdstammstück oder Hölzer aus dem Wipfelbereich. Auch schwächeres Laubholz und Hölzer aus der Jungdurchforstung werden häufig zur Herstellung von Scheitholz genutzt [72]. Nach der 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung sind nur naturbelassenes stückiges Holz und Holzprodukte als Brennstoffe für Holz- und Holzvergaserkessel zugelassen. Für Endverbraucher ist Scheitholz ofenfertig in loser oder abgesackter Form, im Container oder folienverschweißt auf Einwegpaletten verfügbar [72]. [75][76]

Zur Wärmebereitstellung mittels Scheitholz werden Holzvergaserkessel genutzt. Dabei bestehen hohe Ansprüche an die Trockenheit des Holzes. Bei guter Trocknung ist eine Verdoppelung des Heizwertes möglich, wodurch der Holzverbrauch halbiert werden kann. Der maximal zulässige Wassergehalt von Scheitholz liegt daher bei 20 % [72]. Um Brennholz effektiv zu lagern, wird es auf Betriebs- bzw. Ofenlängen geschnitten und gespalten. Die kurze Länge und die offenen Innenflächen der Spaltstücke ermöglichen eine optimale Trocknung. Die Spaltstücke sollten einen Durchmesser von 15 cm nicht überschreiten. Maximal können Längen bis 110 cm verwertet werden. Der überwiegende Teil der in den letzten Jahren vorgestellten Anlagen ist für 50 cm langes Scheitholz ausgelegt. [75]

Scheitholzkessel zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zu anderen Holzheizungen Holz nachgelegt werden muss. Somit zählen auch alte Kaminöfen zu den Scheitholzfeuerungen. Scheitholzkessel werden entsprechend zyklisch betrieben, wobei eine Beladung am Stück verbrannt wird [77]. Das manuelle Nachlegen ist jedoch selten und auch im Winter nicht mehr als einmal pro Tag erforderlich [57]. Seit einigen Jahren sind Systeme mit automatischer Beschickung verfügbar, welche den Bedienkomfort erheblich steigern [75].

Die heutigen Kessel funktionieren nach dem Prinzip des unteren Abbrandes, wobei nur die untere Brennstoffschicht an der Verbrennung beteiligt ist. Merkmal dieser Technik ist, dass die Flamme nicht durch den Brennstoff, sondern in einer separaten Brennkammer brennt. Diese Art der Verbrennung hat den Vorteil, dass eine seltenere Nachfüllung als bei der normalen Durchbrandverbrennung stattfinden muss. Durchbrandfeuerungen sind heute kaum noch gebräuchlich und werden meist im kleinen Leistungsbereich unter 15 kW eingesetzt, da hier derzeit noch keine Messpflicht durch den Kaminkehrer besteht [72]. Weitere Merkmale moderner Scheitholzvergaserkessel mit unterem Abbrand sind neben der räumliche Trennung von Vergasung und Nachverbrennung der Einsatz separater Sekundärluftkanäle unmittelbar vor der Nachverbrennungszone und der Einsatz nicht gekühlter Hochtemperaturbrennkammern für die Endverbrennung der Holzgase. Kernelement ist die Hochtemperaturbrennkammer, in der frisch zugeführte Sekundärluft ausreichend Zeit hat, sich gut mit den noch unverbrannten Holzgasbestandteilen zu vermischen und diese bei hoher Temperatur zu verbrennen. Die konstruktiven Merkmale führen zu einer wesentlichen Verbesserung der Holzverbrennung, wodurch deutlich höhere Kesselwirkungsgrade und geringere Emissionen gegenüber

Oberbrandkesseln erzielt werden. Das untere Abbrandprinzip stellt auf Grund dieser Vorteile bei Stückholz-Zentralheizungen den heutigen Stand der Technik dar [72]. [57][75]

Moderne Scheitholzkessel verfügen i. d. R. über eine Leistungsregelung und eine abgasgeführte Verbrennungsluftregelung. Diese ermöglichen eine Lastvariabilität der Kessel von 50 bis 100 % der Nennlast [57]. Der Einsatz eines Pufferspeichers ist dennoch empfehlenswert, um häufige Ein- und Ausschaltvorgänge zu vermeiden. Aufgrund der fortgeschrittenen Verbrennungsregelung und durch den Einsatz gebläsegestützter Vergaserkessel erreichen Scheitholzkessel Wirkungsgrade bis 90 % [65]. Weitere Vorteile sind die ausgeglichene CO<sub>2</sub>-Bilanz durch den Einsatz biogener Brennstoffe und vergleichsweise geringe Betriebskosten. Trotz der genannten Vorteile ist zu beachten, dass das Heizen mit Scheitholz eine aktive Brennholz-Vorratshaltung auf einem geeigneten Grundstück mit einschließt. Diese Voraussetzungen sind i. d. R. im ländlichen Raum gegeben. [72][75] Typische Scheitholzkessel weisen Nennleistungen bis 50 kW auf [57]. Der größte Anteil der Scheitholzkessel liegt in einem Leistungsbereich von 20 bis 40 kW, wobei maximal Systeme mit 200 kW Leistung am Markt verfügbar sind [65]. Entsprechend werden sie vorwiegend in Wohngebäuden eingesetzt [77].

Scheitholzkessel mit Anlagennennleistungen zwischen 15 und 30 kW werden besonders häufig eingesetzt [72]. Hier liegen die spezifischen Anschaffungskosten zwischen rund 130 und 540 EUR/kW und betragen im Mittel ca. 300 EUR/kW [75]. Die große Preisspanne resultiert dabei aus den Unterschieden bezüglich des Vorhandenseins, der Art und des Umfangs der Regelung. Für Heizkessel inkl. Regelung sind in dieser Leistungsklasse spezifische Anschaffungskosten zwischen 200 und 350 EUR/kW zu erwarten [72]. Mit zunehmender thermischer Nennleistung sinken die spezifischen Kosten für Scheitholzkessel. So liegen die Anschaffungspreise für Kessel über 30 kW Nennleistung im Mittel bei ca. 200 EUR/kW, wobei maximal Kosten von rund 460 EUR/kW zu erwarten sind, siehe Anhang A2 [75].

## 2.2.8 Wärmepumpe

### 2.2.8.1 Elektrowärmepumpe

Wärmepumpen sind Anlagen, welche durch den Einsatz technischer Arbeit thermische Energie niedriger Temperatur aufnehmen und als Nutzwärme auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur (Raumheizung) übertragen. Der verwendete Prozess entspricht im Prinzip der Umkehrung eines Wärme-Kraft-Prozesses. Dazu wird zunächst durch einen Wärmeübertrager Umweltwärme aufgenommen. Diese wird im Wärmepumpenkreislauf auf ein Arbeitsmedium übertragen, wodurch dieses seine Siedetemperatur erreicht. Ein Verdichter saugt das verdampfte Arbeitsmedium ab, sodass mit steigendem Druck eine Anhebung der Temperatur erzielt wird. Von dem Verdichter gelangt der Dampf in den Verflüssiger, in welchem die aufgenommene Wärme sowie die durch das Verdichten zugeführte Energie an das Heizwasser abgegeben werden. Anschließend wird das Arbeitsmedium über ein Expansionsventil in den Verdampfer zurückgeführt und dabei auf einen niedrigen Druck entspannt und abgekühlt. Von hier beginnt der Prozess von neuem. Das Prinzip der Wärmepumpe kommt auch bei Kühlprozessen zum Einsatz, wobei der Begriff „Wärmepumpe“ nur für Heizaggregate genutzt wird. Bei Kühlprozessen wird die aus dem zu kühlenden Raum aufgenommene Wärme als Nutzenergie aufgenommen und zusammen mit der Antriebsenergie als Abwärme an die Umgebung abgeführt.

Die Effizienz der Wärmepumpe wird durch die Arbeitszahl angegeben. Diese Kennzahl beschreibt das Verhältnis von eingesetzter elektrischer Energie zu gewonnener Wärmeenergie. Eine Wärmepumpe mit einer Arbeitszahl 4 liefert also für je eine eingesetzte Kilowattstunde Strom bis zu 4 Kilowattstunden Wärme. Die Leistung einer Wärmepumpe ist in fast allen Fällen aus wirtschaftlichen Gründen nicht auf die Spitzenlast des Wärmebedarfs eines Objektes ausgelegt, sodass durch eine Stromheizung oder seltener durch einen Brennstoffkessel die Spitzenlast gedeckt werden muss. Eine Wärmepumpe wird im Idealfall mit großen Heizflächen und damit geringen Vorlauftemperaturen kombiniert. Bei kleinen Heizflächen sind höhere Vorlauftemperaturen erforderlich, die nur mit einer Effizienzeinbuße zu erreichen sind.

Als Wärmequellen können die Umgebungsluft, das Grundwasser oder das Erdreich dienen. Die Wärme aus dem Erdreich kann entweder mit einer Flächensonde oder über Tiefensonden erfolgen. Die Flächensonden werden dabei in einer Tiefe von ca. 1,20 m und über eine ungefähre Fläche der doppelten zu beheizenden Wohnfläche verlegt, während die Tiefensonde aus einigen Rohren besteht, die in einer bis zu 100 m tiefen Bohrung eingebracht werden.

Laut dem Bundesverband Wärmepumpe e.V. wurde im Jahr 2013 mit einer Stückzahl von rund 60.000 Wärmepumpen ein leichter Anstieg der Absatzzahlen gegenüber den Vorjahren verzeichnet. Dabei ziehen etwa 35,2 % der 2013 verkauften Heizungswärmepumpen Wärme aus Erdreich und Grundwasser und 64,8 % der verkauften Wärmepumpen nutzen die Wärme der Umgebungsluft. Im Jahr 2009 waren bisher rund 334.000 Wärmepumpen in Deutschland installiert.[78]

Die Kosten für Wärmepumpen hängen stark vom Aufbau der Wärmepumpe und der damit genutzten Wärmequelle ab. Je nachdem ob die Umgebungswärme aus der Luft, der Erde oder

aus dem Grundwasser bezogen wird fallen zu Erschließung der Wärmequelle mitunter hohe Kosten an. Am günstigsten ist in der Regel die Luft-Wärmepumpe da keine aufwendigen Erdarbeiten durchgeführt werden müssen. Am teuersten ist dagegen die Wasser-Wärmepumpe. Die Erd-Wärmepumpe liegt preislich zwischen beiden Alternativen.

Des Weiteren muss zwischen der Gas- und Elektrowärmepumpe unterschieden werden. Da die Gaswärmepumpen-Technologie vergleichsweise neu ist und bisher erst wenige Geräte am Markt verfügbar sind liegen die Kosten noch recht hoch. Eine vergleichende Kostenübersicht für Elektro- und Gaswärmepumpen ist in Anhang A2 angefügt.

### **2.2.8.2 Gaswärmepumpe**

Die Elektrowärmepumpe erzeugt mit elektrischer Energie Antriebsenergie, um das Kältemittel zu verdichten. Gasbetriebenen Wärmepumpen können nach demselben Prinzip aber auch nach dem Prinzip der Absorption bzw. der Adsorption arbeiten. Ein Vorteil der Gaswärmepumpen gegenüber Elektrowärmepumpen ist die Möglichkeit, den Spitzenlast- und Warmwasserbedarf durch eine Gasfeuerung anstatt mit einer Stromheizung zu decken.

Die Effizienz einer Gaswärmepumpe ist die Heizzahl analog zur Arbeitszahl, die das Verhältnis von eingesetzter externer Energie im Verhältnis zur gewonnenen Wärmeenergie beschreibt. Die Heizzahl ist i. d. R. kleiner als die Arbeitszahl, da unter anderem die Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung nicht berücksichtigt werden. Gaswärmepumpen sind in einem Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis in den Megawattbereich verfügbar und können somit sowohl in Einfamilienhäusern als auch in großen Betrieben eingesetzt werden. Eine gasbetriebene Wärmepumpe kann ein Gebäude heizen und kühlen. Das wird durch eine Umkehrung des Prozesses erreicht. Bei einer Anwendung, die sowohl Heiz- als auch Kühlleistung benötigt, kann ein Teil der sonst anfallenden Investitionskosten eingespart werden.

Bei der Adsorptionswärmepumpe wird die Umweltwärme mit Hilfe eines Adsorptionsprozesses in das Haus transportiert. Das Kältemittel wird durch die Umweltwärme verdampft und dann von einem Adsorbens aufgenommen. Dabei entsteht Adsorptionswärme, die zum Heizen genutzt werden kann. Zur Regeneration des Adsorbens wird ein Gasbrenner eingesetzt. Durch Erhitzung wird das Kältemittel wieder dampfförmig und der Kreislauf kann von neuem beginnen. Die üblichen Stoffe, die eingesetzt werden, sind Wasser als Kältemittel und Zeolith als Adsorbens. Damit Wasser bei Umgebungstemperaturen verdampft werden kann, wird der Prozess unter einem starken Unterdruck durchgeführt. Eine weitere Eigenschaft, welche die Adsorptionspumpe von den anderen Techniken unterscheidet, ist, dass der Prozess kein Kreisprozess ist, sondern ein periodischer Prozess. Darum werden mehrere einzelne Module zusammengeschaltet, wovon immer jeweils zwei versetzt arbeiten.

Mit einer Adsorptionswärmepumpe wird eine Heizzahl um 1,3 erreicht, allerdings sind noch weitere Steigerung zu erwarten. [79] Wird Helium als Hilfgas eingesetzt, ist es möglich, die Verdampfungstemperaturen zu senken, sodass das Kältemittel bis zu  $-25\text{ °C}$  verdampft werden kann. Die Heizzahl einer Absorptionswärmepumpe liegt in etwa bei einem Wert von 1,7. Die Kälteleistungszahl liegt meistens unter der Heizleistungszahl.

## 2.2.9 Stromheizung

Stromheizungen leiten Strom durch einen hohen Widerstand, der dadurch erwärmt wird. Sie werden daher unter anderem als elektrische Direktheizung bezeichnet. Elektrischer Strom wird zu Heizzwecken in Form von Nachtspeicherheizungen heute eher selten eingesetzt. Heizpatronen hingegen finden zur Spitzenlastabdeckung Verwendung. Die ökologische Bilanz von Stromheizungen ist primär abhängig vom verwendeten Strommix zur Bereitstellung der Antriebsenergie. Gleichzeitig ist elektrische Energie kostenintensiver als z. B. das Heizen mit fossilen Brennstoffen, wodurch die Betriebskosten für Stromheizungen vergleichsweise hoch sind. Bei einer rein elektrischen (monoenergetischen) Heiztechnik entfallen die Schornsteinfegerkosten, wodurch die Aufwendungen für den Strombezug teilweise ausgeglichen werden.

### 2.2.9.1 Nachtspeicherheizung

Die klassischen strombetriebenen Nachtspeicherheizungen speichern Wärme für einige Stunden oder wenige Tage z. B. in Schamottsteinen. Über diesen Zeitraum wird Wärme durch Wärmestrahlung und Konvektion an den Raum abgegeben. Dieses Konzept der Einzelraumheizung konnte vor einigen Jahren im Gegensatz zur „normalen“ Direktheizung mit Tagesstrom wirtschaftlich sein, wenn zu bestimmten Uhrzeiten preisgünstige elektrische Energie bezogen wurde. Der sogenannte Nachttarif wurde zu Zeiten geringer Abnahme angeboten, um durch die so generierte Nachfrage die Abregelung von Grundlast-Kraftwerken zu vermeiden. In Deutschland ist 2007 der vergünstigte Steuersatz für „Nachtstrom“ entfallen, sodass Stromheizungen bei Gebäudesanierungen oder Neubauten nur noch in selten genutzt werden. Nachtspeicherheizungen waren in den 1950er und 1960er Jahren eine günstig nachzurüstende und gleichzeitig staub- und geruchsfreie Alternative zu Kohle oder Öl [80]. Sie sind praktisch wartungsfrei und benötigen keinen Stauraum für Tanks oder Brennstofflager. Ein wesentlicher Nachteil bei der Nutzung von Nachtspeicheröfen ist die permanente und kaum regelbare Wärmeabgabe der Heizkörper, wodurch es zu einer Temperaturüberhöhung kommen kann. Des Weiteren kann die elektrische Leistungsaufnahme nur so weit geregelt werden, dass in Zeiten, zu denen kein Nachtstrom angeboten wird, eine gewisse Mindesttemperatur gehalten werden kann. Neben den klassischen Einzelraumheizungen sind heute auch Produkte mit integrierter Warmwasserbereitstellung oder Fußboden-Nachtspeicherheizungen verfügbar.

Aus den verfügbaren Preislisten von Anbietern für elektrische Nachtspeicherheizungen für das Jahr 2014 geht hervor, dass der Anschaffungspreis für Nachtspeichersysteme im Mittel bei 1.400 EUR  $\pm$  250 EUR liegt. Dabei steigt der Preis für die Systeme mit zunehmender thermischer Leistung. Der Bezug der Kosten auf die Leistung der Geräte verdeutlicht hingegen, dass der Investitionsaufwand pro kW Leistung bei kleineren Nachtspeicherheizungen größer ist als bei Geräten mit höherer Leistung. Die Darstellung der spezifischen Netto-Richtpreise für Nachtspeicherheizungen ist in Anhang A2 angefügt.

### 2.2.9.2 Heizpatrone

Im Gegensatz zu den Nachtspeicherheizungen erwärmen Heizpatronen Wasser in einem Pufferspeicher, aus welchem die Wärme bei Bedarf entnommen wird. Sie dienen im Wesentlichen der steuerbaren elektrischen Nacherwärmung im Heizungssystem [81]. Konventionelle Heizpatronen für die Gebäudeversorgung bestehen aus einem Heizdraht, welcher meist aus einer Nickellegierung gefertigt ist, einer Isolation, z. B. Magnesiumoxid, und einem Stahlmantel [82]. Die Leistung der Heizpatrone und das Volumen des Pufferspeichers richten sich dabei nach dem Heizwärme- und dem Trinkwasserwärmebedarf, welche im Wesentlichen durch die Anzahl der Personen im Haushalt beeinflusst werden. Ein Vorteil der Heizpatronen und Pufferspeicher ist die hohe Wasser-Abrufleistung bei konstanter Temperatur, sodass die Versorgung mehrere Zapfstellen mit höherer Abnahmemenge möglich ist [83]. Darüber hinaus sind Heizpatronen stufenweise regelbar und weisen ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis auf [84]. Der technologische Nachteil dieser Technik besteht in der eingeschränkten Schichtungsfähigkeit innerhalb des Speichers. Des Weiteren stellen die Strahlungsverluste an die Umgebung, der höhere Platzbedarf für den Speicher und die Wasserhygiene (Legionellen, Keime) Nachteile beim Einsatz von Heizpatronen in Pufferspeichern dar [83].

Heizpatronen werden derzeit hauptsächlich als Spitzenlast-Zusatzheizung eingesetzt. Moderne Technologien wie Wärmepumpen, Solarthermie-Anlagen oder Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung sowie der stetige Wandel zu Niedrigenergie- und Passivhäusern könnten diesen Trend verstärken. Des Weiteren werden Heizpatronen heute Potenziale zum Ausgleich von elektrischen Lastspitzen im Stromnetz durch fluktuierend einspeisende erneuerbare Energien zugesprochen. Der Einsatz als „Power-to-Heat“-Technologie im großtechnischen Maßstab wird in Form von Elektrokessel mit Heizwiderständen oder als Elektrodenheizkessel diskutiert [85]. Nachtspeicherheizungen stellen im Gegensatz zu Heizpatronen keine sinnvolle Flexibilitätsoption zum Ausgleich fluktuierender Erzeugung aus Wind und Photovoltaik dar, sondern verursachen zusätzliche Inflexibilitäten und Nachfrage nach konventioneller Kraftwerksleistung [86].

Derzeit werden etwa 2,3 % der Wohnungen in Deutschland mit Direktstrom beheizt [87]. Für die langfristige Perspektive ist zurzeit offen, ob der direkt-elektrisch gedeckte Wärmebedarf der Haushalte noch einmal eine Renaissance erlebt, um gezielt Lastspitzen aus dem zunehmend mit volatilen Einspeisern konfrontierten Stromnetz zu nehmen.

Die Investitionskosten für Heizpatronen steigen mit zunehmender Leistung der Geräte, die spezifischen, auf die Leistung bezogenen Kosten, nehmen jedoch ab. Für das typische Leistungsspektrum zur Wärmebereitstellung im Wohngebäudesektor (bis 20 kW) sind die spezifischen Netto-Richtpreise in Anhang A2 dargestellt. Der Grundpreis für Heizpatronen liegt im Zeitraum 2013/2014 bei rund 177 EUR/kW.



## 2.3 Thermische Speichersysteme

### 2.3.1 Sensible Speicher

Sensible Wärmespeicher sind Speicher, die beim Beladen mit Wärme fühlbar ihre Temperatur ändern. Die bekanntesten Varianten dieser Speicher finden sich in vielen Haushalten in Form von klassischen Puffer-, Kombi- oder Frischwarmwasserspeichern zur Warmwasserbereitstellung, aber auch in Fernwärmenetzen gibt es große Pufferspeicher. Unabhängig von Größe und Einsatzort des jeweiligen Speichers ist die Aufgabe jedes Speichers dieselbe. Neben der Bereitstellung einer ausreichenden Menge Warmwassers zu jeder Zeit und einer Effizienzsteigerung des gesamten Heizsystems gilt es vor allem zeitliche Differenzen zwischen Erzeugung und Nutzung von Warmwasser zu überbrücken. Insbesondere in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen ergibt sich eine gesteigerte Effizienz des Gesamtsystems.

Speicher mit vergleichsweise geringem Volumen von unter 100 Liter bis etwa 1.500 Liter werden in hoher Anzahl produziert und finden häufig Anwendung in Haushalten oder kleinen Betrieben. Sie bestehen in der Regel aus Stahl wobei Trinkwarmwasserspeicher entweder aus Edelstahl hergestellt oder zusätzlich emailliert werden. Großvolumige Speicher sind meist Sonderanfertigungen, die je nach Größe aus Stahl oder Beton bestehen.

Um hohen Wärmeverlusten entgegen zu wirken müssen sensible Speicher besonders isoliert werden. Dünne Stahlbleche oder Betonwände bieten keine ausreichende Dämmung und die gespeicherte Wärme würde bei geringerer Umgebungstemperatur über die gesamte Oberfläche des Speichers an die Umgebung abgegeben werden. Daher werden Speicher mit einer Wärmedämmung versehen, die möglichst gut vor Verlusten schützen soll. Die Dämmung besteht aus Stoffen wie Polyurethan, Hart- oder Weichschaum, Melaminharzschaumstoff, thermostabilisiertes EPS oder Polyesterfaservlies. Im Handel werden am häufigsten Hart- und Weichschaumdämmungen verwendet. Die wichtigste Eigenschaft der Dämmung ist die Wärmeleitfähigkeit, welche bei den am häufigsten verwendeten Dämmarten zwischen 0,024 und 0,041 W/(m·K) liegen. Dies wirkt sich unter anderem auf den Platzbedarf aus. Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit dämmen besser und benötigen aufgrund dessen für den gleichen Effekt eine geringere Schichtdicke. [88]

Abhängig von der Größe des Speichers sowie der Art der Dämmung sind die Wärmeverluste gemäß DIN EN 12977-3 und der Bereitschaftsenergieverbrauch nach DIN 4753-8 zu ermitteln. Beide Kennwerte geben an, wie viel Wärme ein Speicher verliert, also an seine Umgebung abgibt. Für Speicher in den gängigen Haushaltsgrößen liegt die Wärmeverlustrate bei 1,7 bis 5,7 W/K [89]. Der Bereitschaftswärmeverbrauch bezieht sich auf die Verluste innerhalb von 24 Stunden. Typische Wert liegen zwischen 1,2 und 6,3 kWh/24h [90], [91].

Kenngößen wie die Lade- bzw. Aufheizzeit werden ebenfalls von vielen Herstellern angegeben. Diese Daten lassen sich allerdings nur unzureichend vergleichen, da die Bedingungen zur Bestimmung nicht einheitlich festgelegt sind. Entscheidende Faktoren sind unter anderem die Leistung des Heizgeräts, die aktuelle und gewählte Speichertemperatur, die Umgebungstemperatur sowie das Volumen des Speichers. Angaben variieren daher von 2 bis 277 Minuten

[90], [92], [93]. Da ein thermisches Leistungsaufnahme- bzw. Leistungsabgabevermögen ebenfalls stark von dem Heizsystem und den gewählten Temperaturen abhängt, wird dieser Wert in der Regel nicht angegeben. Gleiches gilt für einen Wirkungsgrad oder Nutzungsgrad des Speichers. Diese Angaben lassen sich am besten durch die Wärmeverluste oder den Bereitschaftsenergieverbrauch beschreiben.

Schlussendlich sind die Speichereigenschaften eines sensiblen Warmwasserspeichers von dem im Speicher enthaltenen Medium abhängig. Die Wärmekapazität von Wasser liegt bei 4,182 kJ/(kg·K) [94] was einer Energiedichte von etwa 36 kWh/m<sup>3</sup> pro 30 Kelvin Temperaturdifferenz entspricht.

Die Kosten für klassische Warmwasserspeicher sind größtenteils abhängig von der Art des Speichers und von dessen Volumen. Zwar nehmen die Preise für Speicher mit steigendem Volumen zu, jedoch sinken die spezifischen Kosten je Liter deutlich. Die große Spreizung der Preise kommt durch die unterschiedlichen Bauarten der Speicher zustande. Es wird zwischen Pufferspeichern zur Bereitstellung von Heizwärme sowie Kombispeichern zur kombinierten Bereitstellung von Heizungswärme und Trinkwarmwasser unterschieden. Auf Grund einer erhöhten baulichen Komplexität der Kombispeicher sind diese in der Regel teurer. Sie besitzen, anders als Pufferspeicher, zusätzliche Wärmetauscher oder einen innen liegenden Tank.

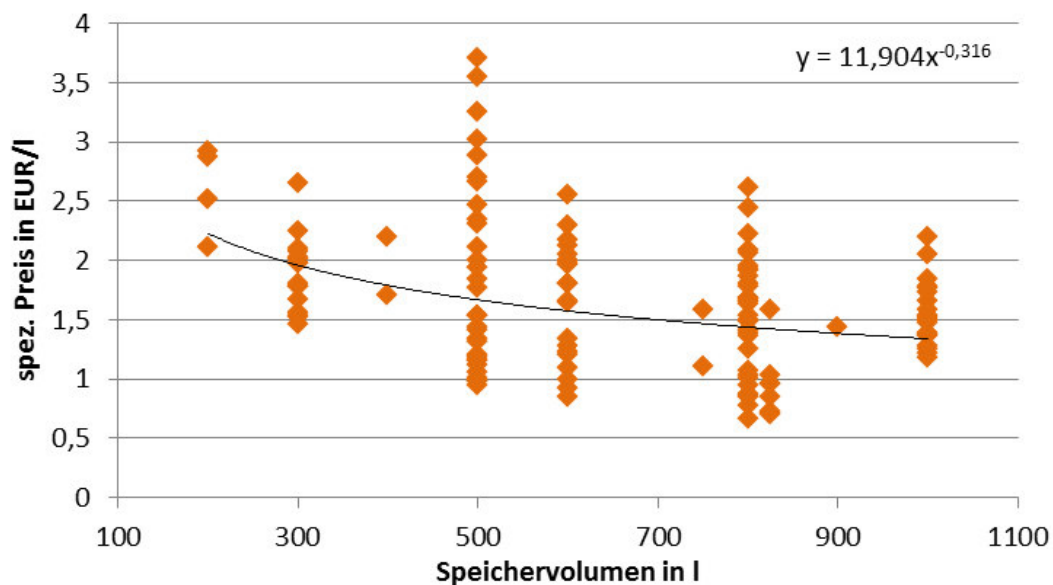


Abbildung 14: Spez. Netto-Richtpreis für wasserbasierte Wärmespeicher (Datenbasis: [95]–[102])

### 2.3.2 Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher eignen sich zur verlustarmen Speicherung von Wärme über längere Zeiträume, wozu das Arbeitsmedium einem Wechsel des Aggregatzustands unterzogen wird. Die dafür geeigneten Materialien werden phase change materials (PCM), also phasenwechselnde Materialien genannt. Abhängig von der gewünschten Anwendung kann jeglicher Phasenübergang genutzt werden, jedoch wird häufig der Übergang von fest zu flüssig und umgekehrt genutzt. Wesentlicher Unterschied für die Speicheranwendung ist die beinahe gleichbleibende Temperatur über die gesamte Betriebszeit. Die zugeführte Energie in Form von Wärme wird größtenteils für den Phasenwechsel genutzt. Aufgrund der stoffspezifischen Schmelztemperatur lassen sich unterschiedlichste Temperaturbereiche und damit Einsatzgebiete durch unterschiedliche Materialien erzeugen, wodurch sich PCMs auch zum Kühlen eignen. Für Kältespeicher wird beispielsweise Wasser oder eine Salzlösung verwendet, für Temperaturen zwischen 5 und 130 °C eignen sich besonders Paraffine und Salzhydrate. Temperaturen über 130 °C lassen sich mit Hilfe verschiedener Salze wie Nitraten, Chloriden, Carbonaten, Fluoriden oder Mischungen aus diesen Stoffen erreichen [103]. In Zukunft werden Temperaturen bis ca. 330 °C möglich sein, die weitere Einsatzbereiche eröffnen.

Anwendungen für Latentwärmespeicher befinden sich größtenteils noch in der Versuchsphase. Vielversprechendes Anwendungsgebiet ist dabei die Raum- und Gebäudeklimatisierung. Dazu können beispielweise mit einem PCM gefüllte Mikrokapseln in Wände, Decken oder Böden eingebracht werden. In größeren Makrokapseln lässt sich das Material in Speichern einsetzen die äußerlich den klassischen Warmwasserspeichern ähneln und so beispielweise in ein Heiz- oder Kühlsystem integriert werden. Entscheidender Vorteil von Latentwärmespeichern gegenüber sensiblen Warmwasserspeichern ist die höhere Energiedichte, die bei Wasser bei rund 36 kWh/m<sup>3</sup> liegt und bei latenten Wärmespeichern bis zu 150 kWh/m<sup>3</sup> reichen kann [104]. Abhängig von dem jeweiligen Einsatzgebiet kann es von Nutzen sein, den latenten Speicher zu dämmen. Anwendungen wie der Einbau in Wände und Decken benötigen keine Dämmung da diese den Wärmefluss im Raum stören würde. Nutzt man allerdings ein Heizungssystem mit zentralem Wärmespeicher, ähnlich den klassischen Pufferspeichern, ist eine Dämmung von Nutzen. Die Ausführung der Dämmung sowie die verwendete Dämmmaterialien können dabei von klassischen Speichern übernommen werden. Lediglich für Anwendungen mit Temperaturen über 100 °C ist auf eine nicht brennbare und hitzebeständige Dämmung zu achten.

Die Bauformen von Latentwärmespeichern können sehr unterschiedlich sein. Vom Einsatz in – mit sensiblen Wärmespeichern vergleichbaren – Bauformen als Makroverkapselung bis hin zur direkten Integration von PCM-Modulen in Bauteilen als Mikroverkapselung sind etliche Formen denkbar. Da sich latente Wärmespeicher immer noch in der Entwicklung und Erprobung befinden sind zukünftig weitaus mehr Bauformen denkbar. Aus diesem Grund können keine allgemeinen Preise für Latentwärmespeicher-Systeme angegeben werden. Die Kosten für das eigentliche Speichermaterial können allerdings recht präzise angegeben werden und liegen oberhalb von 0,5 EUR/kg [105].

### 2.3.3 Thermochemische Speicher

Thermochemische Speicher nutzen eine exotherme Reaktion des Speichermediums, um Wärme abzugeben. Dazu werden Materialien wie Zeolithe, Silicagele oder Metallhydride, welche vollkommen umweltverträglich und nicht brennbar sind, mit Wasser oder Wasserdampf in Berührung gebracht. Das Material adsorbiert das Wasser und gibt dabei Wärme ab. Ist das Material vollständig mit Wasser gesättigt stellt sich die Reaktion ein. Um das Material anschließend erneut nutzen zu können, muss zunächst das Wasser entzogen werden. Bei diesem Vorgang wird es dafür stark erwärmt, sodass das enthaltene Wasser verdampft und abgeführt werden kann. Man spricht von Desorption. Im wasserlosen Zustand ist das Material ein nahezu verlustfreier Wärmespeicher, solange es nicht mit Wasser oder Wasserdampf aus der Umgebungsluft in Berührung kommt. Dazu ist der Prozess beliebig oft wiederholbar, da er komplett reversibel ist und sich das Speichermedium nicht abnutzt.

Anwendungen mit thermochemischen Speichern befinden sich größtenteils noch in der Entwicklungsphase. Aufgrund der hohen Energiedichte von bis zu 500 kWh/m<sup>3</sup> bietet diese Technik ein großes Potenzial für die Wärmespeicherung, da beispielsweise klassische Warmwasserspeicher gerade einmal eine Energiedichte von rund 36 kWh/m<sup>3</sup> aufweisen [106]. Zum Einsatz kommt das Prinzip allerdings bereits in Anlagen mit kleinerem Leistungsbereich [107][108] oder in Spülmaschinen [109], um dort ein wenig Energie einzusparen. Bei diesen Anwendungen werden bisher üblicherweise Zeolithe verwendet, da diese in einem passenden und einfach zu kontrollierende Temperaturbereich arbeiten.

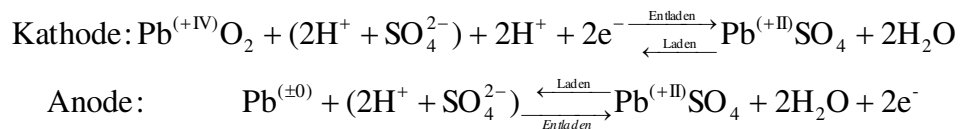
Auf die Temperaturen muss auch bei der Dämmung geachtet werden. Speicher, die Silicagele als Medium verwenden, können genauso gedämmt werden wie herkömmliche Warmwasserspeicher, da die Temperaturbereiche ähnlich sind. Für andere Materialien, bei denen die Temperatur auf bis zu 500 °C steigen kann, ist eine Dämmung aus besonders hitzebeständigen Materialien vorzusehen.

Die Kosten für thermochemische Speicher lassen sich aktuell nicht abschätzen, da derzeit kaum Anwendungen am Markt verfügbar sind. Entscheidend für die Kosten ist neben der Größe besonders die Bauart des Speichers. Bisher gibt es kein einheitliches Reaktordesign, wodurch die Kosten für den Speicher an sich nicht angegeben werden können. Die Art der Dämmung schlägt sich ebenfalls auf die Kosten nieder. Aufgrund der extrem hohen Temperaturen können leicht brennbare oder unzureichend hitzebeständige Stoffe nicht verwendet werden. Anders sieht es für das Speichermedium an sich aus. Zum Einsatz kommen Zeolithe, Silicagele und Metallhydride. Zeolith ist dabei ein am marktverfügbares Material und liegt preislich bei etwa 22 EUR/kg [110].

## 2.4 Elektrische Speichersysteme

### 2.4.1 Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Akkumulatoren gehören zu den ältesten und am weitesten entwickelten Akkumulatoren, die kommerziell erhältlich sind. Sie werden vorwiegend als „Starterbatterien“ in Autos sowie als Notstromversorgung eingesetzt. Blei-Säure Batterien bestehen aus zwei verschiedenen, sehr porösen Elektroden, die aus einem Metall und einem Metalloxid bestehen. Beim Elektrolyt handelt es sich um verdünnte Schwefelsäurelösung (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.) Beim Entladen nimmt das metallische Bleioxid (PbO<sub>2</sub>) an der Kathode zwei Elektroden auf und reagiert zu Bleisulfat (PbSO<sub>4</sub>), während bei der Anoden-Reaktion, in der Blei (Pb) zu Bleisulfat umgewandelt wird, zwei Elektroden freiwerden. Beim Laden wird der Prozess rückgeführt. Beim Entladungsprozess dürfen Pb bzw. PbO<sub>2</sub> nicht vollständig umgesetzt werden, da beides für die Startreaktion als Ausgangsstoff vorliegen muss.



Eine neuere Entwicklung sind Blei-Gel-Akkumulatoren. Hierbei ist der Elektrolyt (Schwefelsäure) nicht flüssig, sondern wurde eingedickt. Der Vorteil von diesen Akkumulatoren ist, dass sie in verschiedenen Positionen verbaut werden können.

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus der Multiplikation von Ladungswirkungsgrad des Speichermediums, Ladewirkungsgrad des Umrichters, Entladewirkungsgrad des Speichermediums und Entladewirkungsgrad des Umrichters. Der Wirkungsgrad des Umrichters ist dabei mit je 95 % (Prognose: 98 %) in Lade- und Entladerichtung angenommen [111].

Tabelle 3: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Blei-Säure Batterie [111]

	Stärken	Schwächen
<b>Intern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bereits heute große Stückzahlen</li> <li>▪ Akzeptable Energie- und Leistungsdichte für stationäre Anwendungen</li> <li>▪ Inhärente Sicherheit durch kontrollierte Überladerreaktion</li> <li>▪ Kein komplexes Zellmanagement erforderlich</li> <li>▪ Erfahrung mit großen Speichern</li> <li>▪ Kurze Amortisationsperioden und relativ geringe Anfangsinvestition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lade- und Entladefähigkeit sind nicht symmetrisch</li> <li>▪ Begrenzte Entladetiefe</li> <li>▪ Batterieraumlüftung erforderlich</li> <li>▪ Begrenzte Zyklenlebensdauer</li> <li>▪ Industriebatterien werden noch nicht in vollautomatischer Fertigung gebaut</li> </ul>
	Möglichkeiten	Hindernisse
<b>Extern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch vollautomatisierte Massenproduktion ist eine deutliche Kostensenkung möglich</li> <li>▪ Unabhängig von Standortbedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbot von Verwendung des Schwermetalls Blei</li> <li>▪ Extreme Kostensenkung bei Lithium-Ionen-Batterien (betrifft das selbe Anwendungsegment)</li> <li>▪ Begrenzte Bleilagerstätten, unzureichende F&amp;E-Kapazitäten, kein erfahrenes Personal verfügbar</li> </ul>

### 2.4.2 Lithium-Ionen-Batterien

Bei einer Lithium-Ionen-Batterie besteht die Kathode aus einem Lithium-dotierten Metalloxid auf einer beschichteten Aluminiumfolie als Stromsammler und die Anode (negative Elektrode) aus Graphit auf einer beschichteten Kupferfolie, siehe Abbildung 15. Bei der Kathode können unterschiedliche Metalloxide, wie z. B. Lithiummanganoxid ( $\text{LiMnO}_4$ ), Lithiumeisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) oder Lithiumcobaltoxid ( $\text{LiCoO}_4$ ) eingesetzt werden. Als Elektrolyt lassen sich verschiedenste Kombinationen verwenden. Meist wird ein Gemisch aus organischen Carbonaten, wie z. B. Dimethylcarbonat (DMC) oder Ethylencarbonat (EC), das mit einem Leitsalz, wie z. B. Lithiumhexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ ) versetzt wurde, genutzt. Es gibt aber auch Bestrebungen, die organischen Carbonate durch ionische Flüssigkeiten zu ersetzen. Während des Ladevorganges werden die Lithiumionen aus dem Metalloxidgitter gelöst und wandern durch den Separator zu dem Graphitgitter der Anode und werden dort eingelagert.

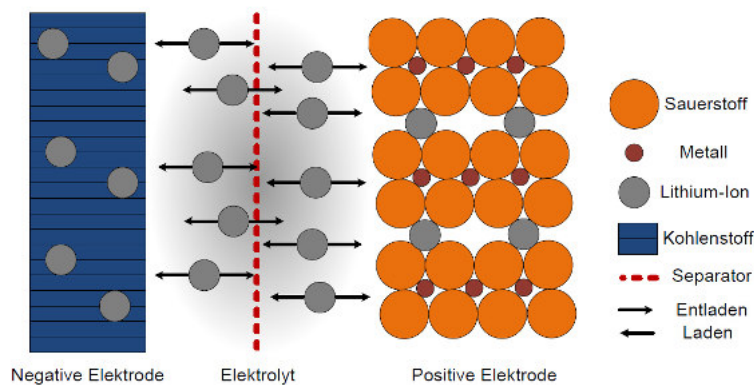


Abbildung 15: Funktionsschema einer Lithium-Ionen-Batterie [111]

Die Vorteile von Lithium-Ionen-Batterien gegenüber Blei-Säure-Batterien sind eine höhere Energiedichte und eine geringere Selbstentladungsrate. Ein Nachteil ist zu dem heutigen Zeitpunkt der hohe Preis. Es gibt jedoch durch die verschiedenen Kombinationen der Kathodenmaterialien und Elektrolytzusammensetzungen noch viel Forschungspotenzial, um Lithium-Ionen-Batterien kostengünstiger herzustellen und für die verschiedenen Speicheranforderungen optimieren zu können.

Tabelle 4: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Lithium-Ionen-Batterie [111]

	Stärken	Schwächen
Intern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Energiedichte</li> <li>Lange Lebensdauer</li> <li>Hohe Leistungsfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine inhärente Sicherheit (thermisches Durchgehen, thermal runaway)</li> <li>Aufwändiges Batteriemanagementsystem erforderlich (Einzelzellspannungsüberwachung)</li> <li>Packaging und Kühlung aufwändig, abhängig vom Zelltyp</li> <li>Hohe Kosten</li> </ul>
	Möglichkeiten	Hindernisse
Extern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Stückzahlen in der Automobilindustrie führen zu schneller Kostensenkung</li> <li>Keine speziellen Anforderungen an Speicherstandorte (keine Gasentwicklung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Probleme bei der sozialen Akzeptanz auf Grund des Lithiumabbaus in einigen Ländern möglich</li> <li>Lithiumvorkommen sind nur auf wenige Länder begrenzt</li> <li>Hohe Energie- und Leistungsdichten stellen einen geringen Wertzuwachs in den meisten stationären Anwendungen dar</li> </ul>

### 2.4.3 Hochtemperatur-Batterien

Hochtemperaturbatterien, wie z. B. Natrium-Schwefel (NaS)- und Natrium-Nickelchlorid (NaNiCl<sub>2</sub>)-Batterien unterscheiden sich durch den festen Elektrolyten von anderen Batterien, die mit einem flüssigen Elektrolyten funktionieren.

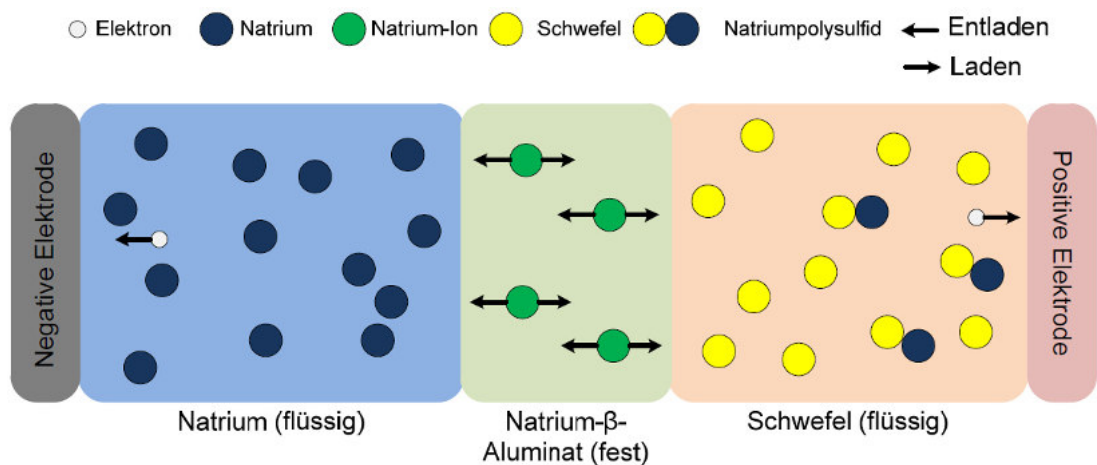


Abbildung 16: Schema einer Natrium-Schwefel-Batterie [111]

Um die aktiven Massen in einen flüssigen Zustand zu versetzen und somit eine ausreichend hohe Ionenleitfähigkeit zu erzielen, ist eine Betriebstemperatur von 270 bis 350 °C notwendig. Unterhalb dieses Temperaturbereichs findet kein Laden und Entladen statt. Im Falle der Abkühlung der Batterie kann es zur Rissbildung innerhalb der Elektroden und dem Elektrolyten kommen. Die Betriebstemperatur muss daher konstant eingestellt und gehalten werden. Aus diesem Grunde ist diese Speichertechnologie nicht als Langzeitspeicher geeignet. In Japan sind NaS-Batterien kommerziell verfügbar und werden u. a. als Lastausgleich von Windfarmen eingesetzt. In Europa sind NaNiCl<sub>2</sub>-Batterien kommerziell verfügbar [111].

Tabelle 5: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Natrium-Schwefel-Batterie [111]

	<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<b>Intern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe spezifische Energie</li> <li>Hohe Zyklenlebensdauer, lange kalendarische Lebensdauer</li> <li>Günstige Rohstoffe (NaS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe thermische Standby-Verluste</li> <li>Gefahrenpotenzial aufgrund der hohen Betriebstemperatur</li> <li>Hohe Kosten für Nickelmaterial in Zebra-Batterien</li> </ul>
	<b>Möglichkeiten</b>	<b>Hindernisse</b>
<b>Extern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Viele auslaufende Patente, die neue Hersteller auf den Markt bringen</li> <li>Keine speziellen lokalen Voraussetzungen</li> <li>Keine bzw. kaum Einschränkungen in der Verfügbarkeit der Rohstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nur ein Hersteller je Technologie</li> <li>Konkurrenz zu Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien</li> <li>Sicherheitsprobleme speziell mit NaS-Batterien (Brandfall)</li> </ul>

## 2.4.4 Redox-Flow-Batterien

Eine Redox-Flow-Batterie ist ein elektrochemisches System, das aus zwei Elektrolyten mit verschiedenen Redoxpaaren, wie z. B. Brom ( $\text{Br}_3^-$ ) / Sulfid ( $\text{S}_2^{2-}$ ), Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) / Chrom ( $\text{Cr}^{2+}$ ) oder Vanadium ( $\text{V}^{2+}$ ) / Vanadium(IV)-Oxid ( $\text{VO}_2^+$ ), besteht, in denen Energie gespeichert werden kann. Der positive Elektrolyt (Katholyt) und der negative Elektrolyt (Anolyt) werden in zwei separaten Vorratsbehältern gelagert. Für die Energieumwandlung werden beide Elektrolyte mit Hilfe von zwei Pumpen durch eine elektrochemische Zelle geleitet, die aus zwei Halbzellen besteht, getrennt durch eine Membran. In jeder Halbzelle befindet sich eine Elektrode aus Graphitfilz, an der die jeweilige Redoxreaktion stattfindet.

Eine schematische Darstellung einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VRF-Batterie), die kommerziell bedeutsamste der Redox-Flow-Batterien, ist in der Abbildung 17 zu sehen.

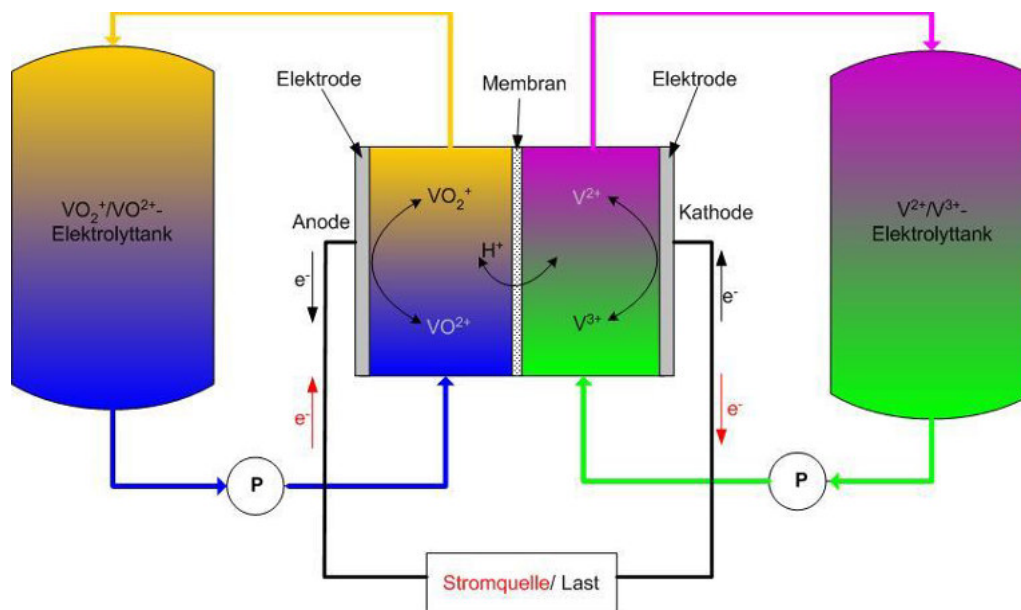
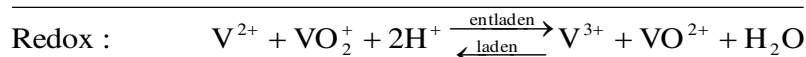
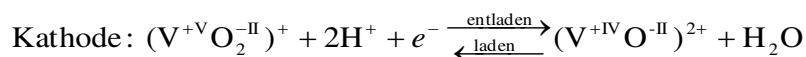


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Redox-Flow-Batterie (eigene Zeichnung nach [112])

Bei einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie bestehen beide Elektrolyte aus einer Vanadiumlösung, jedoch besitzen die Vanadiumionen unterschiedliche Oxidationsstufen. Als Lösungsmittel lässt sich z. B. eine Schwefelsäurelösung mit einem Massenanteil von 25 % einsetzen.



Bei der Entladung werden die  $\text{V}^{5+}$ -Ionen des Katholyten zu  $\text{V}^{4+}$ -Ionen reduziert und die  $\text{V}^{2+}$ -Ionen des Anolyten zu  $\text{V}^{3+}$ -Ionen oxidiert. Zum Ladungsausgleich der Reaktionen wandern  $\text{H}^+$ -Ionen der Säure jeweils durch die Membran, die beide Halbzellen trennt. Beim Laden der VRF-Batterie erfolgt die Redoxreaktion entgegengesetzt. Die Forschung beschäftigt sich mit Redox-Flow-Batterien seit den 1970er Jahren. Die VRF-Batterie wurde 1984 größtenteils von der Arbeitsgruppe Kazackos an der University of North South Wales in Australien entwickelt.



Diese Arbeitsgruppe beschäftigte sich seitdem mit Forschungsthemen rund um die VRF-Batterie [113]. Der Vorteil einer Redox-Flow-Zelle liegt in der voneinander unabhängigen Skalierbarkeit von Leistung und Energie. Durch die Verwendung von Vanadiumlösungen auf beiden Seiten der Zelle, führen sogenannte Crossover-Effekte nur zu geringen Energieeffizienzverlusten, und der Ausgangszustand einer VRF-Batterie lässt sich durch die Oxidation oder Reduktion sehr leicht wiederherstellen. Da die Energie im Elektrolyten gespeichert wird und die Ladung bzw. Entladung in einer Durchflusszelle erfolgen, können die Kapazität und die Leistung der Batterie unabhängig voneinander skaliert werden. Dies ermöglicht im Vergleich zu anderen Batteriearten eine hohe Flexibilität und gute Anpassungsmöglichkeiten an die gewünschte Anwendung. Die Wartungskosten einer Flow-Batterie sind sehr hoch, da der Elektrolyt ein säurehaltiges Medium ist und sehr schnell Leckagen verursachen kann. Auch sind die Rohstoffe Vanadium, Zink und Brom sehr teuer. Daher liegt der Fokus der Forschung auf kostengünstigen Redoxpaaren mit einer hohen Energie- und Leistungsdichte.

Tabelle 6: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Redox-Flow-Batterie [111]

	<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<b>Intern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie und Leistung sind unabhängig voneinander skalierbar</li> <li>▪ Hohe Zyklenlebensdauer</li> <li>▪ Einsatz unterschiedlicher Redoxpaare möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Säurehaltige Flüssigkeiten verursachen Leckagen</li> <li>▪ Begrenzte Lebensdauer der Zellstacks</li> <li>▪ Vanadium-basierte Speichermedien sind zu teuer</li> <li>▪ Pumpen und Ventile sind stör anfällig und teuer in der Wartung</li> </ul>
	<b>Möglichkeiten</b>	<b>Hindernisse</b>
<b>Extern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch größer angelegte Zellstacks können die Kosten reduziert werden</li> <li>▪ Unbeschränkte Speicherstandorte</li> <li>▪ Keine Alternativen am Markt, die für mehrere Tage wirtschaftlich arbeiten können</li> <li>▪ Viele auslaufende Projekte, sodass neue Hersteller den Wettbewerbsdruck erhöhen können</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rechtliche Probleme mit Genehmigungen bei großen Systemen mit hohen Säuremengen</li> <li>▪ Gegenwärtige Vanadium-Systeme sind für die Speicherperioden von wenigen Tagen zu teuer</li> <li>▪ Vanadium ist ein knapper Rohstoff</li> <li>▪ Bei der Speicherung für wenige Stunden ergeben sich gegenüber Blei-Säure- oder Hochtemperaturbatterien keine Vorteile</li> <li>▪ Zur Erforschung geeigneter Redoxpaare sind Anstrengungen in F+E notwendig</li> </ul>



### 3 Ermittlung der Bedarfsstrukturen

*Für die Sektoren Wohngebäude, GHD und Industrie wurden Methoden zur Ermittlung der Wärmebedarfsstruktur entwickelt. Dazu wurden aktuelle Studien, Richtlinien und Statistiken ausgewertet und zusammengeführt.*

*Die Energiebedarfe für Wohngebäude basieren auf den jährlichen Heizwärme-, Trinkwarmwasser- und Strombedarfen. Objektspezifische Einflussgrößen sind der Gebäudetyp, die Baualtersklasse, der Sanierungszustand und der Standort zur Bewertung des Witterungseinflusses. Strom- und Trinkwarmwasserbedarfe sind über das Jahr als konstant und mit der quantitativen Nutzung des Wohnraumes oder der Wohnfläche kalkulierbar. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung wurde eine direkte Korrelation des Wärmebedarfs zur Bevölkerungsdichte und zur quantitativen Nutzung des Wohnraumes herausgearbeitet.*

*Die Ermittlung der Energiebedarfe des GHD-Sektors erfolgte über die spezifischen Brennstoff-, Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauchswerte für unterschiedliche Wirtschaftsgruppen. Die Ermittlung der jeweiligen Bezugseinheit für NRW ermöglichte die Bestimmung der absoluten Bedarfe, woraus ein gesamter Wärmebedarf des GHD-Sektors von ca. 44 TWh/a resultiert. Die räumliche Verteilung des Wärmebedarfs steht in Zusammenhang mit der Erwerbstätigenzahl. Das größte Potenzial liegt demnach in den Städten Köln, Düsseldorf, Essen und Dortmund.*

*Basierend auf deutschland- und NRW-spezifischen Statistiken ergibt sich der gesamte Wärmebedarf der Industrie in NRW zu ca. 160 TWh/a. Die Bewertung der derzeitigen KWK-Erzeugung der Industrie in NRW bestätigt das Potenzial, welches in [145] ausgewiesen wurde und sich auf ca. 7,4 TWh (2030) beläuft. Die Analyse der räumlichen Bedarfsstruktur des Industriesektors basiert auf den veröffentlichten CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten emissionspflichtiger Anlagen. Daraus wurde eine Wärmebedarfskarte entwickelt, welche eine hohe Bedarfsdichte in den Kreisen Duisburg, Gelsenkirchen, Rhein-Erft und Köln aufzeigt.*

*Zur Bewertung der Strombedarfe bei fluktuierender Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wurden die aktuelle und zukünftige Stromerzeugung sowie die Residuallast in NRW analysiert. Darauf basierend wurde der Einfluss der fluktuierenden Einspeisung von EE-Strom auf die Erzeugungsstruktur sowie die Strompreise untersucht.*

## 3.1 Energiebedarfe im Wohngebäude-Sektor

### 3.1.1 Ermittlung der Jahresenergiebedarfe

Der Gesamtwärmebedarf für Wohngebäude ist die Summe aus Heiz- und Trinkwasserwärmebedarf. Dieser ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig, welche in unterschiedlichsten Studien, Veröffentlichungen und Richtlinien analysiert und bewertet wurden.

#### 3.1.1.1 Jahresheizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf eines Objektes wird von dessen bauphysikalischen Objekteigenschaften bestimmt. Wesentliche Faktoren sind in diesem Zusammenhang der Gebäudetyp, die Baualtersklasse (BAK) und der Sanierungszustand des Gebäudes. Das Institut Wohnen und Umwelt hat 2011 in [114] „Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden“ die vier folgenden Größenklassen definiert: Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), Mehrfamilienhäuser (MFH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH). Darüber hinaus wurden 10 Baualtersklassen festgelegt, welche einen Wärmedämm- und somit ein Wärmebedarfsstandard für eine Bauepoche beschrieben. Die Gebäudetypen und Baualtersklassen ergeben zusammen 36 „Basis-Typen“, wobei weitere energierelevante Merkmale den sogenannten „Sub-Typen“ zugeordnet sind [115]. Die Merkmale der verschiedenen Bauepochen und energierelevante Merkmale der Gebäudetypen sind in [114] detailliert erläutert. Darauf basierend wurde in [114] eine Energiebilanzberechnung für Mustergebäude aller Typen im Ist-Zustand und in zwei Sanierungs- bzw. Modernisierungszuständen durchgeführt. Die definierte Sanierungsmaßnahme umfasst dabei die Dämmung der Gebäudehülle, die Modernisierung den Austausch der Heizungsanlage. Die Ergebnisse der Bilanzrechnung sind der jährliche Heizwärmebedarf und der Jahresenergiebedarf für Heizung und Brauchwasser (pro m<sup>2</sup> beheizte Wohnfläche). Die Methodik und Eckdaten zur Bilanzierung sind in [114] im zugehörigen Anhang B.1 erläutert, die Ergebnisse der Berechnung sind tabellarisch in [114] im zugehörigen Anhang C.3 dargestellt. Das dazu genutzte TABULA-Verfahren wurde im Rahmen des EU-Projekts TABULA („Typology Approach for Building Stock Energy Assessment“) entwickelt. Grundlage der Berechnung sind die europäischen Normen, insbesondere EN ISO 13790 für die Berechnung der Heizwärmebilanz auf Basis der saisonalen Methode (Heizperiodenbilanz) und EN 15316 / Level B (tabellierte Werte für die Heizsystem-Komponenten). Die Datensätze der Mustergebäude der nationalen Gebäudetypologien der Projektpartner wurden dazu in ein einheitliches Datenformat des Referenz-Rechenverfahrens transformiert. Für Deutschland sind 132 Referenzgebäude definiert, welche nach Region, Größenklasse, Baualtersklasse und Zusatzkategorie differenziert werden. Daten und Bilanzberechnungen wurden in ein Web-Tool und eine Excel-Version implementiert<sup>2</sup> und stehen somit für weitere Berechnungszwecke zur Verfügung. Damit kann der Einfluss von Dämmmaßnahmen auf den Heizwärmebedarf eines Gebäudes durch die Variation der Dämmstärken und der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) bzw. Wärmewiderstände ermittelt werden. [114]

---

<sup>2</sup> verfügbar unter: <http://www.iwu.de/forschung/energie/abgeschlossen/tabula/>

Der Jahresenergiebedarf für Heizwärme kann darüber hinaus nach DIN EN 832, welche durch DIN EN ISO 13790:2008-09 ersetzt wurde festgelegt werden. Die Norm legt Berechnungsverfahren für die Ermittlung des Jahresenergiebedarfs für die Raumheizung und -kühlung von Wohngebäuden, Nichtwohngebäuden oder Teilen davon fest.

Der Einfluss des baulichen Wärmeschutzes auf den Endenergiebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser wurde ebenfalls in der Shell BDH Hauswärme-Studie [47] untersucht. Dabei wurden drei Zustände des baulichen Wärmeschutzes definiert, welche die Gebäudedämmung und Modernisierung von Fenstern einschließen. Gebäude, die den Wärmestandard der Wärmeschutzverordnung von 1995 erfüllen, werden als saniert bezeichnet, Gebäude, die diesen Standard nicht erfüllen, als unsaniert. Gebäude, die den im Entwurf vorliegenden Standard der EnEV 2016 erfüllen, werden der Kategorie vollsaniert zugeordnet. Die Untersuchung unterscheidet dabei zwei Kategorien: Ein- und Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser. Die relative Reduktion des Endenergiebedarfs für Heizung und Trinkwarmwasser wurde des Weiteren in Abhängigkeit von der Wärmeerzeugungstechnologie bewertet. Auf Basis der in [47] ermittelten Endenergieverbräuche für die drei Sanierungszustände kann die relative Reduktion durch den baulichen Wärmeschutz ermittelt werden, siehe Tabelle 7. Im Gebäudesektor der Ein- und Zweifamilienhäuser wird der Endenergiebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser im Mittel um 13 % gemindert, wenn vom Standard der WSchVO 78 auf WSchVO 95 saniert wird. Bei einer Vollsaniierung von WSchVO 95 auf EnEV 2016 beträgt die mittlere Einsparung rund 29 %. Im Bereich der Mehrfamilienhäuser fällt die Reduktion des Endenergiebedarfs größer aus. Durch die erste Sanierungsstufe wird im Mittel eine Einsparung von 17 % und durch die Vollsaniierung von 33 % erzielt.

Tabelle 7: Relative Reduktion des Endenergieverbrauchs durch baulichen Wärmeschutz nach [47]<sup>3</sup>

Reduktion des Endenergieverbrauchs für Heizung und Trinkwassererwärmung durch baulichen Wärmeschutz	EFH / ZFH			MFH		
	Unsaniert (WSchVO78)	Saniert (WSchVO95)	Vollsaniert (EnEV 2016)	Unsaniert (WSchVO78)	Saniert (WSchVO95)	Vollsaniert (EnEV 2016)
Ausgangszustand: Wärmeerzeuger und TWE						
Öl-/Gas-Niedertemperatur		35%			31%	
Sanierungsvariante: Wärmeerzeuger und TWE (indirekt beheizter Speicher), in kWh/m² Wfl.a						
Öl-/Gas-Niedertemperatur		13%			16%	
Öl-/Gas-Brennwert		12%	28%		16%	32%
Luft-Wasser-Wärmepumpe			35%			37%
Sole-Wasser-Wärmepumpe			31%			37%
Pellet-/Hackschnitzelanlagen		13%	28%		16%	33%
Holzvergaserkessel (Scheit-/Stückholz)		13%	28%			
Fernwärme		13%	26%		16%	32%
Mikro-/Mini-KWK mit Gas-BW -Zusatzkessel		11%	24%		21%	33%
Adsorptions-Gas-WP (Zeolith-Gas-WP mit solarer TWE)			30%			
Absorptions-Gas-WP (ohne solare TWE)			30%			29%
<b>Mittelwert *</b>		<b>13%</b>	<b>29%</b>		<b>17%</b>	<b>33%</b>
<b>mittlere Abweichung *</b>		<b>1%</b>	<b>3%</b>		<b>2%</b>	<b>2%</b>

Im Rahmen der Studie „Wohnungsbau in Deutschland – 2011: Modernisierung oder Bestandersatz“ der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. wurde der Einfluss der energetischen Gebäudemodernisierung in Abhängigkeit zur Ausgangslage und zum angestrebten

<sup>3</sup> Exklusive „Ausgangszustand“ Öl-/Gas-Niedertemperatur

energetischen Standard für ausgewählte Gebäudetypen untersucht [116]. Die dazu festgelegten Modernisierungsmaßnahmen umfassen neben dem baulichen Wärmeschutz auch die Modernisierung der Anlagentechnik. Durch die Modernisierung auf den Standard der WSchVO von 1977 wird im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser eine mittlere Einsparung von 12 % des Endenergiebedarfs für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung erzielt. Durch eine weitere Modernisierung nach WSchVO 1995 wird der Endenergiebedarf um 18 % – bezogen auf den gering modernisierten Zustand – reduziert. Die Analyse für den Gebäudetyp Mehrfamilienhaus weist für den ersten Modernisierungsschritt eine größere mittlere Reduktion des Endenergiebedarfs von 14 % auf. Durch die Modernisierung nach Anforderungen der WSchVO 1995 wird verglichen mit dem Gebäudetyp Ein- und Zweifamilienhaus eine geringe Minderung des Endenergiebedarfs erzielt. Diese beträgt im Mittel 15 %.

Tabelle 8: Relative Reduktion des Endenergiebedarfs durch Modernisierungsmaßnahmen nach [116]

relative Reduktion des Endenergiebedarfs für Heizung und Trinkwassererwärmung		nicht modernisiert (vor WSchVO 1977)	gering modernisiert (nach WSchVO 1977)	mittel/größtenteils modernisiert (nach WSchVO 1995)
EFH / ZFH	Z 18	-	13%	16%
	E 68	-	12%	19%
	E 78	-	11%	18%
<b>Mittelwert</b>		-	<b>12%</b>	<b>18%</b>
<b>mittlere Abweichung</b>		-	<b>1%</b>	<b>1%</b>
MFH	M 18	-	15%	16%
	M 68	-	14%	15%
<b>Mittelwert</b>		-	<b>14%</b>	<b>15%</b>
<b>mittlere Abweichung</b>		-	<b>0%</b>	<b>0%</b>

### 3.1.1.2 Jahrestrinkwasserwärmebedarf

Durch die Steigerung der Gebäudeeffizienz nimmt die Bedeutung der Warmwasserbereitung zu. Durch die Verbesserung der Wärmedämmung und durch Reduzierung von Lüftungswärmeverlusten steigt der relative Anteil des Energiebedarfes für Trinkwarmwasser am gesamten Energiebedarf eines Gebäudes. Der Bedarf für die Trinkwassererwärmung (TWE) wird maßgeblich durch die Bewohneranzahl beeinflusst. In der Literatur werden zur Bewertung dieses Faktors unterschiedliche Methoden genutzt, die den Jahresenergiebedarf zur Trinkwassererwärmung in Abhängigkeit von Personenanzahl, dem Gebäudetyp oder der Wohnfläche ermitteln.

Der Warmwasserbedarf wird im TABULA-Verfahren nach [114] abhängig vom Gebäudetyp und bezogen auf die Nettogrundfläche der beheizten Geschosse bestimmt. Der jährliche Warmwasserbedarf beträgt demnach 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Einfamilienhaus und 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Mehrfamilienhaus. Nach VDI-Richtlinie 4655 wird der Jahresenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung in Anlehnung an die Energieeinsparverordnung (EnEV 2007, EnEV 2009, EnEV 2014, EnEV 2016 (Entwurf)) ermittelt. Demnach werden die Energiebedarfe für die Gebäudetypen Ein- und Mehrfamilienhaus differenziert. Für Einfamilienhäuser ergibt sich der Jahresenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung in Abhängigkeit von der Bewohneranzahl und für Mehrfamilienhäuser in Abhängigkeit der Wohneinheiten. Aus den Auswertungen der

für die EnEV 2007 zugrunde gelegten Messdaten ergibt sich ein Jahresenergiebedarf zur Trinkwassererwärmung von 500 kWh/Pers. im Einfamilienhaus und von 1.000 kWh/WE im Mehrfamilienhaus.

Im Rahmen der Shell BDH Hauswärme-Studie [47] wurde neben der Entwicklung der Energieverbräuche für Warmwasser und Raumwärme für den Zeitraum von 1995 bis 2011 auch der relative Warmwasseranteil am jährlichen spezifischen Gesamtwärmebedarf analysiert. Dieser wurde für Gebäude mit unterschiedlichen Energiekennwerten bestimmt. Demnach steigt der relative Anteil des Warmwassers bei abnehmendem Gesamtwärmebedarf. Anhand der tabellarischen Datenpunkte kann eine Funktion zur Korrelation von spezifischem Gesamtwärmebedarf und relativem Warmwasseranteil ermittelt werden. Ist der spezifische Gesamtwärmebedarf eines Gebäudes bekannt, können über die Gleichung aus Abbildung 18 der relative Warmwasseranteil und somit der absolute Warmwasserbedarf ermittelt werden.

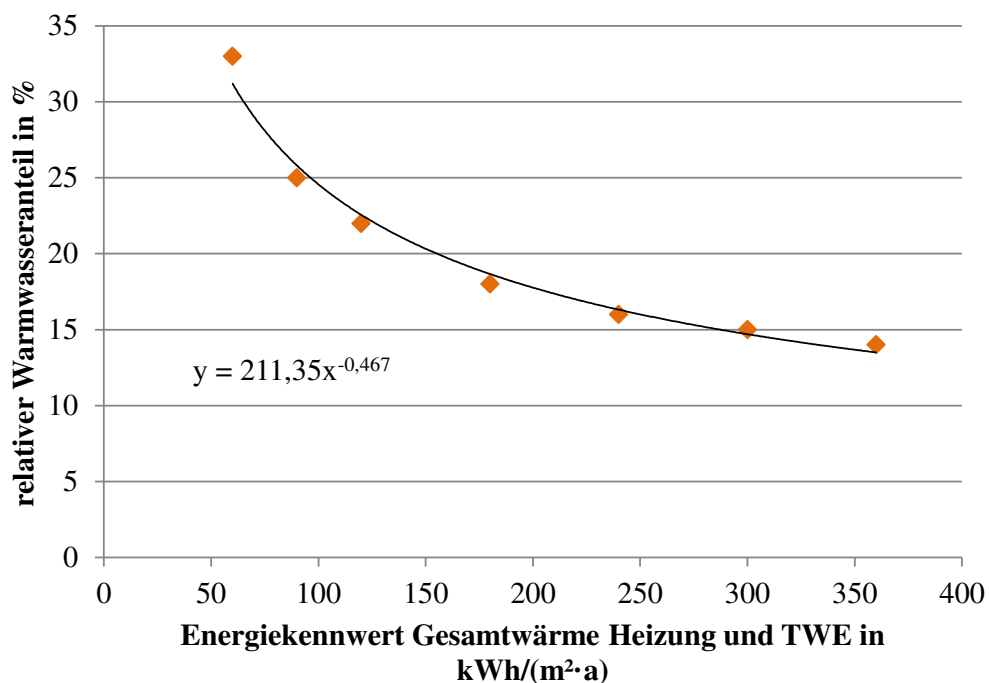


Abbildung 18: Relativer Warmwasseranteil in Abhängigkeit des Energiekennwertes

### 3.1.1.3 Jahresstrombedarf

Hinsichtlich des Einsatzes von KWK-Anlagen ist neben den Wärmebedarfen auch der Strombedarf zu berücksichtigen. Der Jahresenergiebedarf ergibt sich entsprechend aus den drei Energieformen Heizwärme, Trinkwassererwärmung und elektrischer Strom.

Nach VDI-Richtlinie 4655 erfolgt die Festlegung des Strombedarfs nur als Haushaltsstrombedarf und nicht für Trinkwassererwärmung und Heizung. Bei bestehenden Gebäuden werden Verbrauchswerte des Vorjahres zum Vergleich herangezogen. Dabei ist ein gegebenenfalls vorliegender Stromverbrauch für Heizzwecke und Trinkwassererwärmung zu berücksichtigen. Den Jahresenergiebedarf für Strom nach VDI 4655 zeigt Tabelle 9. Einflussfaktoren für die Ermittlung von Strombedarfen in Wohnhäusern sind der Gebäudetyp und die Personenzahl im Einfamilienhaus bzw. die Wohneinheiten im Mehrfamilienhaus. Einfamilienhäuser im

Sinne der VDI 4655 sind Wohngebäude mit bis zu drei Wohneinheiten und einer gemeinsamen Heizungsanlage. Mehrfamilienhäuser sind Wohngebäude mit mindestens vier Wohneinheiten und einer gemeinsamen Heizungsanlage. Die Annahmen der Richtlinie basieren auf ein- bis zwei-jährige Messdaten von Ein- und Mehrfamilienhäusern für Strom-, Heizwärme- und Warmwasserlastgänge.

Tabelle 9: Jährlicher Strombedarf nach [117]

	EFH			MFH
	< 3 Personen	3 - 6 Personen	> 6 Personen	
<b>jährl. Strombedarf</b>	2.000 kWh/Pers	1.750 kWh/Pers	1.500 kWh/Pers	3.000 kWh/WE

Im Rahmen der Studie „Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)“ wurde der Einfluss des Gebäudetyps, des Einkommens und der Ausstattung von Elektrogeräten auf den Stromverbrauch untersucht. In EFH beträgt der mittlere Stromverbrauch – auf Basis der Datenerhebung<sup>4</sup> – 4.120 kWh/a pro Haushalt. Für den Bereich der MFH wurde ein mittlerer Stromverbrauch von 2.420 kWh/a pro Haushalt ermittelt. Bezogen auf die Person beträgt der Stromverbrauch in privaten Haushalten 1.840 kWh/a pro Person. [118]

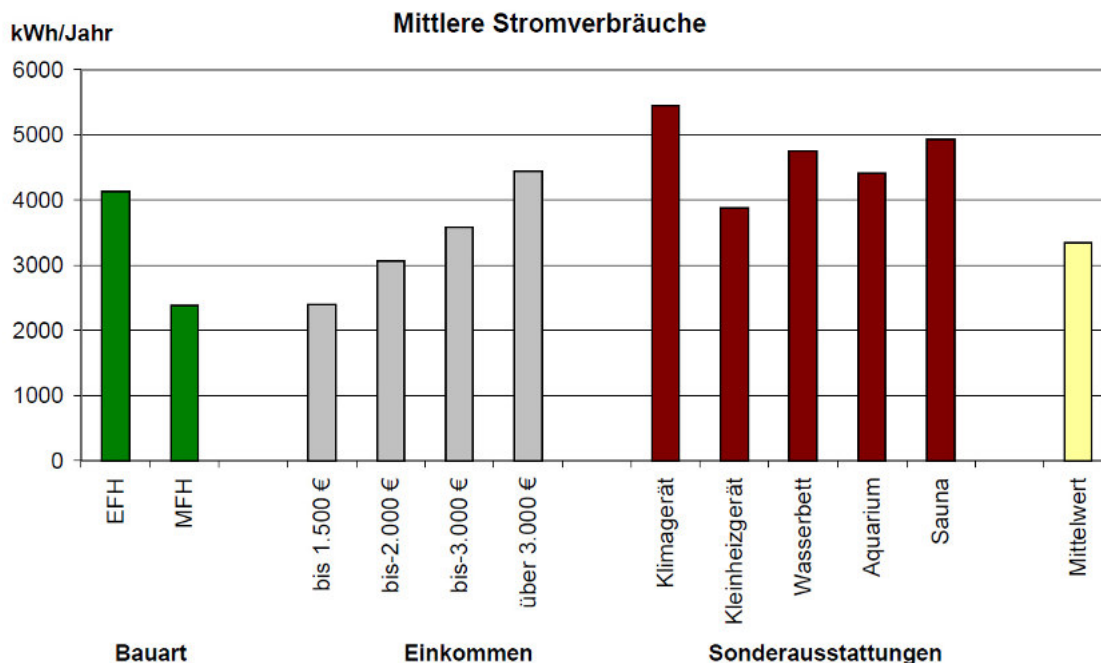


Abbildung 19: Einflüsse auf den Stromverbrauch [118]

<sup>4</sup> Die schriftliche Datenerhebung erfolgt im Dezember 2002. Die generierte Datenbasis umfasst insgesamt 20.325 Haushalte. Die Datenbasis zur Ermittlung der Stromverbräuche umfasst ausschließlich Haushalte ohne Stromheizung.



### 3.1.2 Beschreibung von Jahreslastgängen

Der Wärmebedarf von Wohngebäuden ist abhängig von der Witterung, welche durch den Gebäudestandort bestimmt wird. Der Strombedarf hingegen kann über das Jahr als konstant betrachtet werden, da dieser nicht von Parametern wie Außentemperatur und Wind beeinflusst wird.

Die VDI-Richtlinie 4655 berücksichtigt den Einfluss der Witterung auf den Wärmebedarf durch die Zuordnung des Gebäudestandortes zu einer der Klimazonen in Deutschland. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) teilt Deutschland auf Basis von [119] in 15 Klimaregionen ein. Die Testreferenzjahre (TRY) jeder Klimaregion sind Datensätze ausgewählter meteorologischer Messgrößen für jede Stunde eines Jahres. Sie liefern die klimatologischen Randbedingungen und charakterisieren den Witterungsverlauf eines kompletten Jahres. Anhand der Karte, welche die räumliche Einteilung der Bundesrepublik Deutschland in die 15 Klimazonen zeigt sowie den Tabellen zur Einordnung der Großstädte über 100.000 Einwohner aus [120], kann jeder Standort in Deutschland eindeutig einer Klimazone zugeordnet werden. [117][120]

Der Jahreslastgang ergibt sich aus der Aufteilung der Testreferenzjahre in Typtagkategorien<sup>5</sup>. Dazu sind in VDI 4655 in den enthaltenen Tabelle 4 und Tabelle 5 Angaben über die Anzahl der Typtage<sup>6</sup> je TRY-Klimazone und Typtagkategorie sowie über die mittlere Temperatur der Typtage unter Berücksichtigung des Bedeckungsgrades und der gesetzlichen Feiertage enthalten. Darauf basierend sind in VDI 4655 in den enthaltenen Tabellen 10 bis 24 die Faktoren zur Ermittlung des Tagesenergiebedarfs für Ein- und Mehrfamilienhäuser für die 15 Klimazonen angegeben. [117]

Neben der Außenlufttemperatur und dem Bedeckungsgrad, wie sie in die Testreferenzjahre nach [120] einfließen, stellt auch der Wind einen wesentlichen Klimafaktor dar. Dieser wurden in der Veröffentlichung „Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nichtleistungsgemessener Kunden“ vom Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft und dem Verband kommunaler Unternehmen e.V. beschrieben. Für den regional unterschiedlichen Windanfall während der Heizperiode wurde für Deutschland eine Windkarte entwickelt, aus welcher Gebiete mit überdurchschnittlichen Lüftungswärmeverlusten bei der Raumheizung von Gebäuden entnommen werden können [121]. In der enthaltenen Tabelle 1 der Veröffentlichung ist der Windeinfluss für die Gebäudetypen EFH und MFH für zwei definierte Baualtersklassen dargestellt. Grundlage für die Anwendung ist der Leitfaden „Abwicklung von Standardlastprofilen Gas“, welcher die Anleitung für die Handhabung von analytischen und synthetischen Lastprofilverfahren gemäß Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen vom 29. Juli 2005 (GasNZV) darstellt [122]. Grundlage dafür sind acht verschiedene Lastprofile für Haushaltskunden und vierzehn verschiedene Lastprofile des Bereiches Gewerbe / Handel / Dienstleistungen, welche vom Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München entwickelt wurden.

---

<sup>5</sup> Typtagkategorie: Eine Typtagkategorie bezeichnet eine zusammengehörige Art von Tagen, wobei die Tageslastgänge nach den Kriterien Werktag/Sonntag, heiter/bewölkt und Übergang/Sommer/Winter in zehn Kategorien unterteilt werden.

<sup>6</sup> Typtag: Der Typtag repräsentiert den Energiebedarf des Gebäudes an einem Tag der Typtagkategorie.

### 3.1.3 Tageslastgänge

Neben den jahreszeitlichen Unterschieden bestehen auch tageszeitliche Charakteristiken beim Energiebedarf für die Wärmebereitstellung in Wohngebäuden.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Tagesenergiebedarfs und der Tageslastganges bietet die Anwendung der VDI 4655. Hierin wird der Tagesenergiebedarf der Typtage als Anteil vom Jahresenergiebedarf für Heizung, elektrischen Strom und Trinkwarmwasser bestimmt. In VDI 4655 stehen darüber hinaus für EFH und MFH je zehn verschiedene Referenzlastprofile des normierten Energiebedarfs der drei Energieformen elektrischer Strom, Heizwärme und Trinkwassererwärmungswärme grafisch als auch in Tabellenform zur Verfügung. Die Referenzlastprofile sind als Quotient aus momentanem Energiebedarf und Tagesenergiebedarf, getrennt für jede der drei Energieformen, normiert angegeben. Die vollständigen Datensätze sind in minutengenauer Auflösung zusätzlich als MS-Excel<sup>®</sup>-Datei verfügbar.

Ein weiterer Ansatz stellt das SLP-Verfahren nach „Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nichtleistungsgemessener Kunden“ aus [121] dar. Für den Bereich der Wohngebäude liegen Standardlastprofile für EFH und MFH in zwei unterschiedlichen Sanierungszuständen vor.

### 3.1.4 Räumliche Bedarfsverteilung

Für eine Analyse der räumlichen Verteilung des Wärmebedarfs für Wohngebäude in Nordrhein-Westfalen bietet es sich an, die räumliche Verteilung der Bevölkerungsstruktur zu Grunde zu legen. Der Wärmebedarf ist direkt abhängig von der Bevölkerungsdichte und von der Personenanzahl pro Wohneinheit bzw. Bewohner pro Wohnfläche. Hierbei wird primär auf Daten der Bevölkerungs-, Gebäude- und Wohnungszählung, den sogenannten Zensus 2011, zurückgegriffen [123].

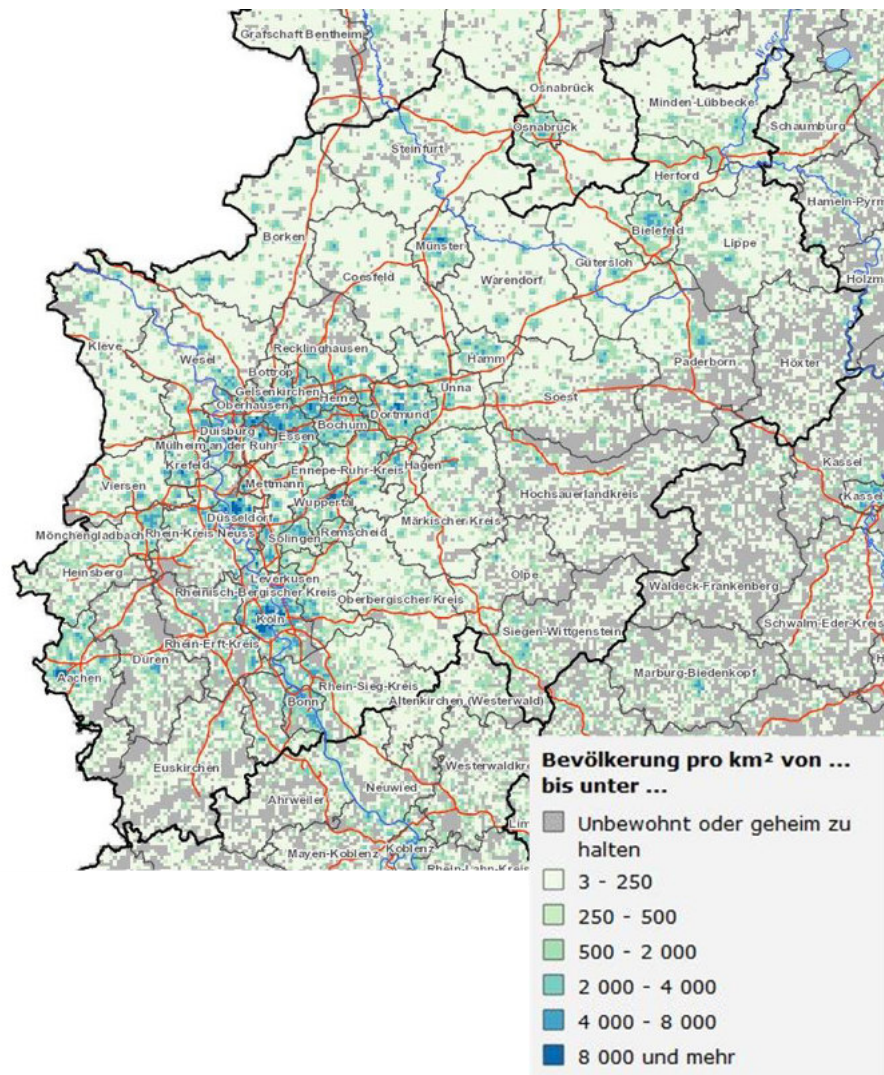


Abbildung 20: Verteilung der Bevölkerung pro km<sup>2</sup> in Nordrhein-Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123]

In Abbildung 20 ist erkennbar, dass der größte Anteil der Bevölkerung auf die Großstädte an der Rhein-Schiene, Bonn, Köln und Düsseldorf sowie auf das Ruhrgebiet verteilt ist. In den ländlicheren Bereichen herrscht, bis auf das Sauerland und die Eifel, eine recht homogene Verteilung der Bevölkerung. Die beiden zuletzt genannten Regionen weisen eine deutlich geringere Bevölkerungsdichte als der Rest Nordrhein-Westfalens auf. Da der Wärmebedarf von Wohngebäuden jedoch nicht ausschließlich von der Anzahl der Einwohner abhängig ist, ist auch eine Betrachtung der quantitativen Nutzung des Wohnraumes notwendig.

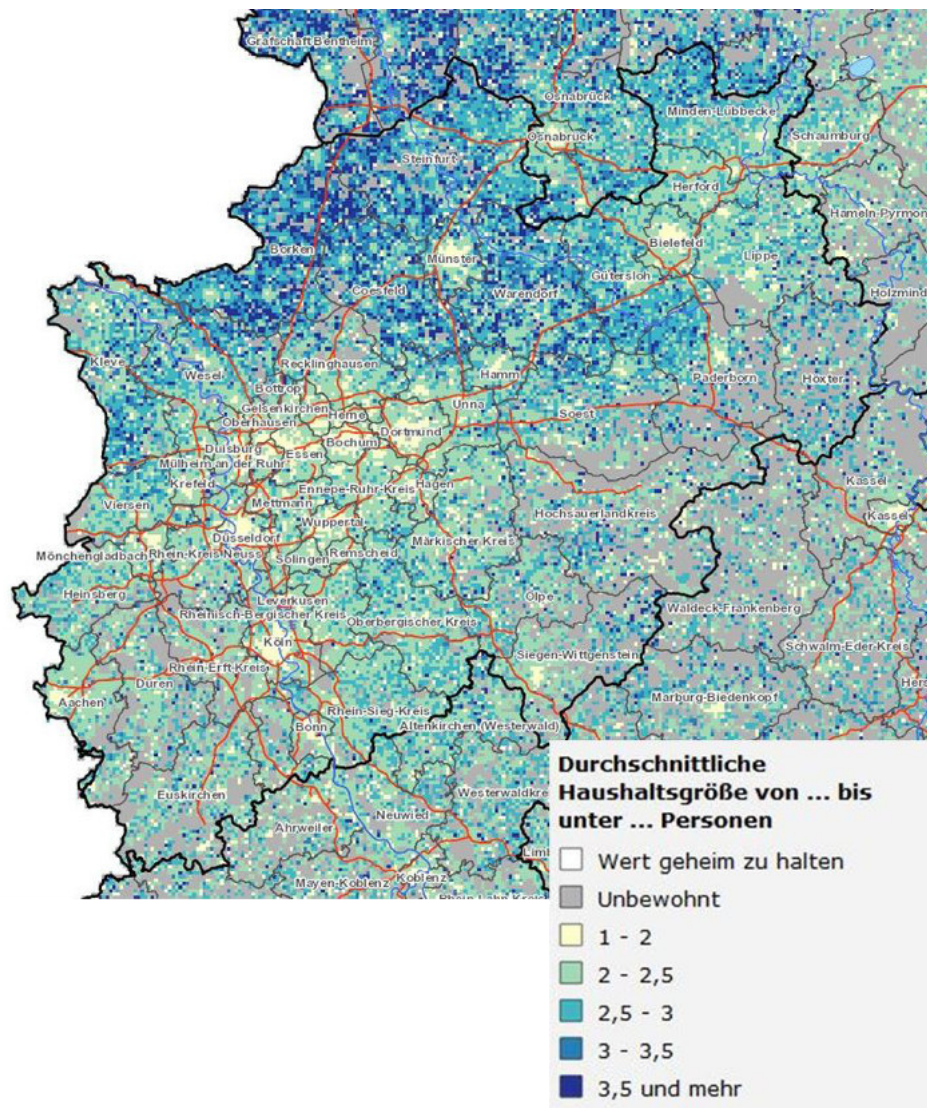


Abbildung 21: Verteilung der durchschnittlichen Haushaltsgröße in Nordrhein-Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123]

Wie in Abbildung 21 ersichtlich, ist eine starke unterschiedliche regionale Verteilung der durchschnittlichen Haushaltsgrößen in Nordrhein-Westfalen vorhanden. In den dicht besiedelten Gebieten sind kleine Haushaltsgrößen stärker vertreten als im ländlichen Bereich. Besonders hervorzuheben ist der nördliche Teil von NRW, hier sind – bedingt durch die örtlichen Strukturen – viele Ein- und kleine Mehrfamilienhäuser Teil der Wohnungswirtschaft, was sich in der hohen Anzahl der Personen pro Haushalt widerspiegelt.

Als weitere Einflussgröße auf den Wärmebedarf von Wohngebäuden ist die durchschnittliche Wohnfläche je Bewohner anzugeben. Diese ist in Abbildung 22 dargestellt. Ersichtlich ist, dass in dicht besiedelten Gebieten, wie in den schon erwähnten Ballungsgebieten, die durchschnittliche Wohnfläche je Bewohner geringer ist als im Vergleich zu ländlichen Regionen. Dies lässt sich mit dem Verhältnis der Mietwohnungen in Mehrfamilienhäusern in Städten und den Einfamilienhäusern und kleineren Mehrfamilienhäusern in ländlichen Regionen begründen.

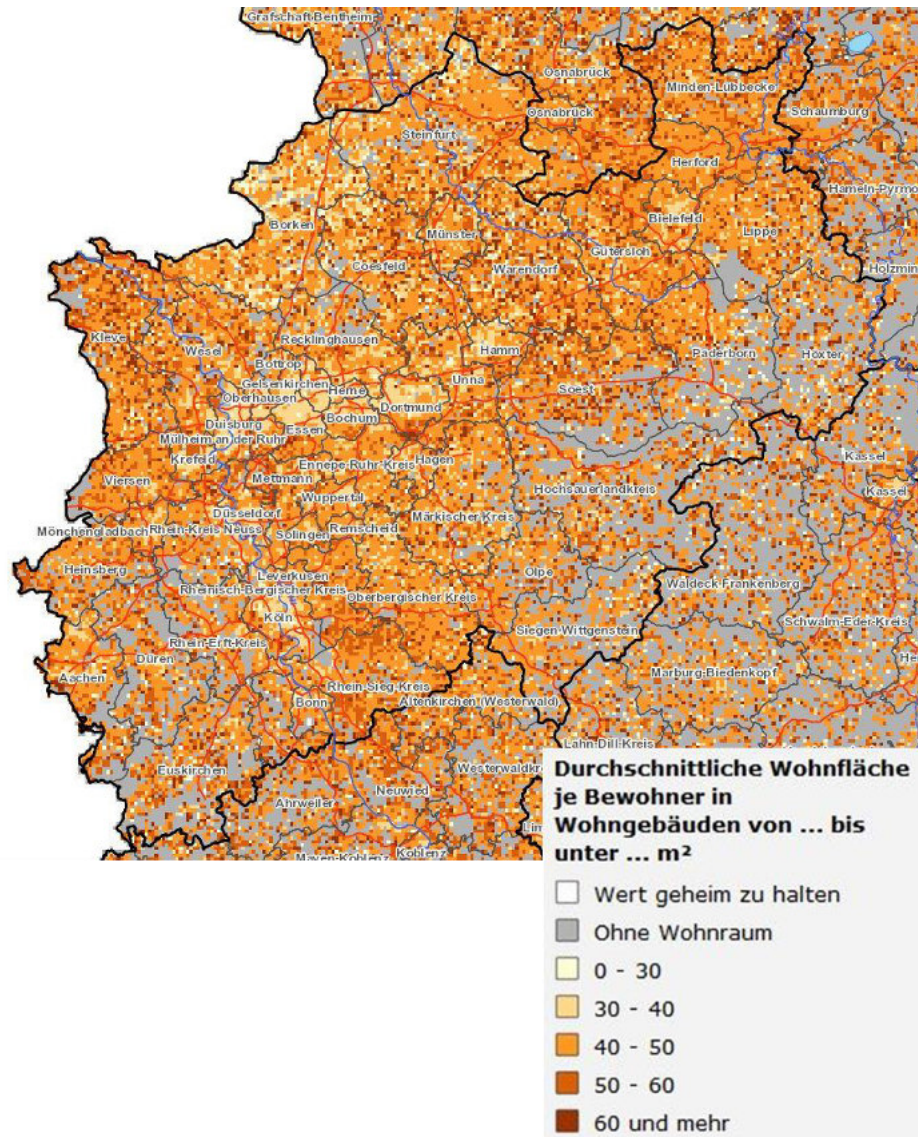


Abbildung 22: Verteilung der durchschnittlichen Wohnfläche je Bewohner in Wohngebäuden in Nordrhein-Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123]

Nach einer Studie der „ARGE, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.“ sinkt der spezifische Wärmebedarf durch die fortschreitende Effizienzsteigerung und Gebäudedämmung. In dieser Studie vom 31.05.2012 werden für Nordrhein-Westfalen die durchschnittlichen Energieverbrauchskennwerte für ein Einfamilienhaus mit 175,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und für ein Mehrfamilienhaus mit 153,0 kWh/(m<sup>2</sup>·a) angegeben. Aus diesen statistisch ermittelten Werten lässt sich ein überschlägiger Mittelwert des Energieverbrauchskennwertes berechnen. Er liegt in Nordrhein-Westfalen bei 165,0 kWh/(m<sup>2</sup>·a)[124].

Als Ergebnis zeigt sich, dass es eine inhomogene Verteilung des Wärmebedarfs für die Raumheizung und für die Erwärmung von Trinkwasser in Nordrhein-Westfalen gibt. Dies ist bedingt durch strukturelle Unterschiede innerhalb Nordrhein-Westfalens. Des Weiteren wird dargestellt, dass der spezifische Energiebedarf von Einfamilienhäusern im Vergleich zu dem spezifischen Energiebedarf von Mehrfamilienhäusern höher ist.

## 3.2 Wärmebedarfe im GHD-Sektor

Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (im Folgenden GHD) ist durch eine sehr heterogene Struktur gekennzeichnet. Aus diesem Grund ist der GHD-Sektor in vielen Energiestatistiken nur unzureichend erfasst. Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die ungleichmäßigen Wärmeabnahmestrukturen, resultierend aus Heiz- und Trinkwarmwasserbedarfen sowie teilweise aus Prozesswärmebedarfen, für das Land Nordrhein-Westfalen abzuschätzen und somit Potenziale für die Kraft-Wärme-Kopplung im GHD-Sektor aufzuzeigen.

Der Energieverbrauch des GHD-Sektors ist im Rahmen der Studie “Energieverbrauch des Sektors GHD in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013“ [125] bereits ausführlich ermittelt worden. Die Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) durch das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), den Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) der Technischen Universität München, der GfK Retail and Technology GmbH und das Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) durchgeführt. Die Studie gibt neben dem Gesamtenergieverbrauch auch den Strom- bzw. Brennstoff-, Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauch - bezogen auf den GHD-Sektor - für Deutschland an. Das Besondere dieser Studie ist, dass für die einzelnen Bereiche des GHD-Sektors, die im Rahmen der Studie zunächst strukturiert wurden, spezifische Energieverbrauchswerte ermittelt wurden. So ist es bei Kenntnis des jeweiligen Bezugswertes möglich, für einen beliebigen Bereich in Deutschland den Strom- und Wärmeverbrauch grob zu ermitteln. Die Vorgehensweise wird auf die Kenndaten für NRW übertragen.

### 3.2.1 Strukturierung des GHD-Sektors

Um die verschiedenen Wirtschaftsbereiche in Deutschland differenzieren zu können, wurden diese im Rahmen der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008) [126] in einzelne Bereiche bzw. Untergruppen unterteilt, die im Folgenden dargestellt sind:

- Abschnitte Abteilungen
- Gruppen
- Klassen
- Unterklassen

Auf diese Weise kommt man beispielsweise auf die Unterklasse Herstellung von Bergwerksmaschinen (28.92.1) über die Klasse Herstellung von Bergwerks-, Bau- und Baustoffmaschinen (28.92), die Gruppe Herstellung von Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige (28.9), die Abteilung Maschinenbau (28) und den Abschnitt Verarbeitendes Gewerbe (C).

Viele statistische Dienste nutzen die Klassifizierung der Wirtschaftszweige, deren aktuelle Version aus dem Jahr 2008 stammt, um statistische Daten wie beispielsweise die Anzahl der Beschäftigten in einem bestimmten Bereich genau zuordnen zu können. Im Rahmen der oben erwähnten Studie wurde der Sektor GHD in 14 verschiedene Bereiche eingeteilt, die im Folgenden mit den entsprechenden Abteilungen bzw. Gruppen der WZ 2008 dargestellt sind:

- 1. Baugewerbe (42, 43)
- 2. Büroähnliche Betriebe (53, 58, 60, 61, 64 - 66, 84, 4-Steller aus 38, 39,..., 96)
- 3. Herstellungsbetriebe (16.2, 17.2, 18, 25 - 29, 30.9, 31, 32, 33.17, 45.2, 95.24)
- 4. Handel (45.1, 45.3, 45.4, 46.2 - 46.9, 47.1 - 47.7)
- 5. Krankenhäuser, Schulen, Bäder (85, 86.1, 96.04.0)
- 6. Beherbergung, Gaststätten, Heime (55, 56, 87, 88.9, 91, 93, 94)
- 7. Nahrungsmittelgewerbe (10.1 - 10.9, 11.0)
- 8. Wäschereien (96.01)
- 9. Landwirtschaft (01.1, 01.2, 01.4, 01.5)
- 10. Gartenbau (01.3, 01.61, 81.30)
- 11. Flughäfen (52.23)
- 12. Bekleidung, Leder, Spedition (13 - 15, 49.4, 52.1, 52.2)
- 13. Nicht über FB (Fragebögen) erfasste Betriebe (22, 23, 47.8)
- 14. Übrige

Diese Gruppen sind in Anlehnung an die Klassifizierung der WZ 2008 erstellt, da teilweise ähnliche Bereiche zusammengefasst wurden (so beinhaltet der Bereich 2 beispielsweise die Untergruppen Kreditinstitute und Versicherungen, Verlagsgewerbe, sonstige betriebliche Dienstleistungen, Gebietskörperschaften und Sozialversicherungen, Deutsche Bundespost / Postdienste, Telekommunikation und Deutsche Bahn AG).

Durch die Gruppen 1 bis 12 werden ca. 94 % aller Erwerbstätigen im GHD-Sektor erfasst. Unter anderem auf Basis der Beschäftigtenzahl, die bei vielen Statistikdiensten auf Länderebene angegeben ist, kann der Wärmebedarf der einzelnen Gruppen ermittelt werden.

### 3.2.2 Vorgehensweise bei der Ermittlung des Wärmebedarfs

Im Rahmen der oben angesprochenen Studie wurden Breitenerhebungen für die Kalenderjahre 2008, 2010 und 2012 durchgeführt. Hierzu wurden Fragebögen an mehr als 2.000 Arbeitsstätten gegeben.

II. Allgemeiner Teil – Energieverbrauch						
Die folgenden Fragen dienen der Ermittlung des Energieverbrauches in diesem Betrieb für das <u>Abrechnungsjahr 2012!</u>						
5a) Bitte nennen Sie uns zunächst alle vom Betrieb genutzten Energiearten.						
5b) Bitte nennen Sie uns für alle genutzten Energiearten den Verbrauch für das Abrechnungsjahr 2012. Geben Sie dazu bitte die verbrauchte Menge, die Einheit, auf die sich die Mengenangabe bezieht, und die Kosten (in Euro; inkl. MwSt) für jede verbrauchte Energieart an. <i>Int.: Sollten nur Einzelrechnungen vorliegen, ermitteln Sie daraus bitte den ges. Jahresverbrauch für 2012.</i>						
5c) Bitte geben Sie zusätzlich an, wozu die genutzte Energieart verwendet wurde.						
5d) Bitte geben Sie auch den Bestand für die lagerfähigen Energieträger zum Stichtag 31.12.2012 an.						
5 a)		5 b)			5 c)	
Energieart/Anlagenart	Jährliche Menge	Einheit	Gesamtkosten für 2012 in Euro (inkl. MwSt)	Heizen	Warmwasser	Prozesswärme
03 (bitte ankreuzen) 1	04 (bitte eintragen)	05 (bitte ankreuzen)	06 (bitte eintragen)	07 (bitte ankreuzen) 1	1	1
30 <input type="checkbox"/> Strom für Speicherheizung	9-17	63 kWh <input type="checkbox"/> 1 (Kilowattstunden)	€ 9-14	27 <input type="checkbox"/>	-	-
31 <input type="checkbox"/> Strom	18-26	64 kWh <input type="checkbox"/> 1 (Kilowattstunden)	€ 15-20	28 <input type="checkbox"/>	43 <input type="checkbox"/>	58 <input type="checkbox"/>
32 <input type="checkbox"/> Erdgas	27-35	65 <input type="checkbox"/> kWh <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> cbm <input type="checkbox"/> 2	€ 21-26	29 <input type="checkbox"/>	44 <input type="checkbox"/>	59 <input type="checkbox"/>
33 <input type="checkbox"/> Flaschengas	36-44	66 <input type="checkbox"/> Liter <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 2	€ 27-32	30 <input type="checkbox"/>	45 <input type="checkbox"/>	60 <input type="checkbox"/>
34 <input type="checkbox"/> Flüssiggas	45-53	67 <input type="checkbox"/> Liter <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> cbm <input type="checkbox"/> 2	€ 33-38	31 <input type="checkbox"/>	46 <input type="checkbox"/>	61 <input type="checkbox"/>
35 <input type="checkbox"/> Heizöl	54-62	68 <input type="checkbox"/> Liter <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> kWh <input type="checkbox"/> 2	€ 39-44	32 <input type="checkbox"/>	47 <input type="checkbox"/>	62 <input type="checkbox"/>
36 <input type="checkbox"/> Fernwärme (inkl. Nahwärme)	63-71	69 <input type="checkbox"/> kWh <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> MWh <input type="checkbox"/> 2	€ 45-50	33 <input type="checkbox"/>	48 <input type="checkbox"/>	63 <input type="checkbox"/>
37 <input type="checkbox"/> Steinkohle	72-80	70 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Tonne <input type="checkbox"/> 2	€ 51-56	34 <input type="checkbox"/>	49 <input type="checkbox"/>	64 <input type="checkbox"/>
38 <input type="checkbox"/> Braunkohle	05 9-17	71 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Tonne <input type="checkbox"/> 2	€ 57-62	35 <input type="checkbox"/>	50 <input type="checkbox"/>	65 <input type="checkbox"/>
39 <input type="checkbox"/> Stückholz	18-26	72 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Festmeter <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> Ster <input type="checkbox"/> 3	€ 63-68	36 <input type="checkbox"/>	51 <input type="checkbox"/>	66 <input type="checkbox"/>
40 <input type="checkbox"/> Hackschnitzel	27-35	73 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Festmeter <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> Schüttm <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> 3	€ 69-74	37 <input type="checkbox"/>	52 <input type="checkbox"/>	67 <input type="checkbox"/>
41 <input type="checkbox"/> Sonstiges Holz	36-44	74 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Festmeter <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> Ster <input type="checkbox"/> 3	€ 75-80	38 <input type="checkbox"/>	53 <input type="checkbox"/>	68 <input type="checkbox"/>
42 <input type="checkbox"/> Pellets	45-53	75 <input type="checkbox"/> kg <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> Schüttm <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> 2	07 € 9-14	39 <input type="checkbox"/>	54 <input type="checkbox"/>	69 <input type="checkbox"/>
43 <input type="checkbox"/> Biogas	54-62	76 <input type="checkbox"/> cbm <input type="checkbox"/> 1 (Kubikmeter)	€ 15-20	40 <input type="checkbox"/>	55 <input type="checkbox"/>	70 <input type="checkbox"/>
44 <input type="checkbox"/> Energieträger nicht bekannt			€ 21-26	41 <input type="checkbox"/>	56 <input type="checkbox"/>	71 <input type="checkbox"/>
„Heizkostenabrechnung“			08			
45 <input type="checkbox"/> nur Heizung			€ 09-14	27 <input type="checkbox"/>		
46 <input type="checkbox"/> nur Warmwasser			€ 15-20		29 <input type="checkbox"/>	31 <input type="checkbox"/>
47 <input type="checkbox"/> Heizung und Warmwasser			€ 21-26	28 <input type="checkbox"/>	30 <input type="checkbox"/>	32 <input type="checkbox"/>

Abbildung 23: Ausschnitt aus einem Fragebogen zur Verbrauchsermittlung [125]

In Abbildung 23 ist ein Ausschnitt aus einem Fragebogen für die Verbrauchsermittlung dargestellt. Neben Fragen zum Energieverbrauch werden zu Beginn Informationen zu dem entsprechenden Unternehmen (Gruppe, Branche, Branchenbereich und Anzahl der Mitarbeiter) und der genutzten Arbeitsfläche gesammelt. Darüber hinaus werden Angaben über mögliche Energiemanagementmaßnahmen sowie zu branchenspezifischen Eigenschaften (beispielsweise die Nutzung von Kühltheken etc.) zusammengetragen. Für die Jahre, in denen keine Breitenerhebung durchgeführt wird, werden zur realistischeren Abschätzung weitere Einflussgrößen



ßen hinzugezogen (Witterungseinfluss, Auslastung der Heizungsanlagen etc.). Zudem können für diese Jahre die Energiebedarfe anhand von Inter- oder Extrapolation ermittelt werden.

Die Struktur der Breiterhebung ermöglicht somit repräsentative Aussagen zum Energieverbrauch (sowohl Strom als auch Wärme) im GHD-Sektor.

Abbildung 24 zeigt die spezifischen Verbrauchswerte des Brennstoff-, Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauchs für die einzelnen Gruppen und deren Unterkategorien aus dem Jahr 2012 in *kWh/BZE*, wobei die Abkürzung BZE für *Bezugseinheit* steht. Diese Bezugseinheit ist in den meisten Fällen die Anzahl der in der jeweiligen Gruppe Beschäftigten. So ist es folglich möglich, mit Hilfe von Informationen statistischer Dienste die Beschäftigten in den oben angegebenen Abteilungen und Gruppen in NRW zu ermitteln und anschließend den Wärmebedarf zu berechnen. In gesonderten Fällen sind andere Bezugsgrößen zu verwenden, die nachfolgend dargestellt sind:

- Krankenhäuser: kWh/Planbett
- Schulen / Universitäten: kWh/Schüler bzw. Student
- Bäder: kWh/m<sup>2</sup> Wasserfläche
- Flughäfen: kWh/Verkehrseinheit (eine Verkehrseinheit entspricht einem Passagier mit Gepäck bzw. 100 kg Masse für Fracht oder Post [127] S. 918)

So ist es über die für Deutschland berechneten spezifischen Verbräuche mit den erforderlichen Informationen über die entsprechende Bezugseinheit möglich, den Strom- und Wärmeverbrauch für einen beliebigen Bereich zu ermitteln. Es gilt zu berücksichtigen, dass es sich dabei immer um eine Abschätzung handelt, die jedoch je nach Stand der eingehenden Informationen sehr präzise sein kann.

Die Anzahl der Erwerbstätigen in den einzelnen Sektoren kann anhand der auf der Internetpräsenz der Landesdatenbank Nordrhein-Westfalen zu findenden Auflistung “Unternehmen und deren Beschäftigte nach Wirtschaftsgruppen der WZ 2008“ [3] ermittelt werden. Hier sind für das Jahr 2012 für den Großteil der im GHD-Sektor enthaltenen Gruppen die Anzahl der Unternehmen inklusive der Anzahl der Erwerbstätigen aufgeführt. So konnten über 85 % der benötigten Bezugseinheiten ermittelt werden.

Grp. No. Split	2012 Untern.Reg. 2010 spez. Verbr. [kWh/BZE]
<b>1 Baugewerbe</b>	<b>5.167</b>
9 Baugewerbe	5.167
<b>2 Büroähnliche Betriebe</b>	<b>4.669</b>
14 Kreditinstitute u. Versicherungen	5.520
17 Verlagsgewerbe	5.759
18 Sonst. betr. Dienstleistungen	4.400
20 Gebietskörpersch. u. Sozialversich.	5.280
30 Deutsche Bundespost / Postdienste	2.904
31 Telekommunikation	4.296
32 Deutsche Bahn AG	5.980
<b>3 Herstellungsbetriebe</b>	<b>8.096</b>
1 Metallgewerbe	6.578
2 KFZ-Gewerbe	10.374
3 Holzgewerbe	8.921
4 Papier- u. Druckgewerbe	7.118
<b>4 Handel</b>	<b>7.129</b>
24 Einzelhandel - food	6.556
25 Einzelhandel - nonfood	7.336
26 Großhandel - food	6.293
27 Großhandel - nonfood	7.210
29 Handelsvermittlungen	7.544
<b>5 Krankenhäuser, Schulen, Bäder</b>	
21 Krankenhäuser	16.826
22 Schulen	1.311
23 Bäder	957
<b>6 Beherbergung, Gaststätten, Heime</b>	<b>11.481</b>
15 Beherbergungsgewerbe	20.026
16 Gaststättengewerbe	9.829
19 Org. ohne Erwerbszweck und Heime	10.546
<b>7 Nahrungsmittelgewerbe</b>	
5 Backgewerbe	11.310
6 Fleischereien	7.733
7 Restl. Nahrungsmittelgewerbe	10.528
<b>8 Wäschereien</b>	<b>12.392</b>
8 Wäschereien u. (chem.) Reinigungen	391
<b>9 Landwirtschaft</b>	<b>59.511</b>
10 Landwirtschaft	5.663
<b>10 Gartenbau</b>	<b>21.697</b>
11 Gartenbau u. Gärtnereien	520
<b>11 Flughäfen</b>	<b>68.882</b>
33 Flughäfen	1.647
<b>12 Textil, Bekleidung, Spedition</b>	<b>3.777</b>
28 Bekleidung, Leder, Textil	110
34 Spedit., Lagerei, Verkehrsvermittlung	775
<b>Summe Gruppen 1 - 12 (über FB erfasste Betriebe)</b>	
<b>13 Nicht über FB erfasste Betriebe</b>	<b>154</b>
35 Marktstände u. ä.	0
36 NE-Metalle, Kunststoffe, Gummi	8.033
37 nicht Berücksichtigte des GHD-Sektors	0
IN Industrie	0
<b>14 Übrige</b>	
38 Straßenbeleuchtung	
39 Gemeinschaftliche Anlagen MFH	
40 Militär	
41 Sonstige	
<b>Gesamt</b>	

Abbildung 24: Spezifische Brenn-, Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauchswerte, Quelle: [3]

Da in der oben erwähnten Statistik “Unternehmen und deren Beschäftigte nach Wirtschaftsgruppen der WZ 2008“ nicht für jede Gruppe der oben dargestellten Struktur des GHD-Sektors entsprechende Angaben über die Anzahl der Erwerbstätigen gemacht wurden, mussten für einige Bereiche des GHD-Sektors in NRW über weitere Quellen verwertbare Zahlen gefunden werden. Hierbei handelt es sich um die im Folgenden aufgeführten Bereiche:

- Sonstige betriebliche Dienstleistungen
- Deutsche Post (53)
- Deutsche Bahn AG
- Campingplätze (55.3)
- Wäscherei und chemische Reinigungen (96.01)
- Landwirtschaft (01.1, 01.2, 01.4, 01.5)
- Gartenbau (01.3, 01.61, 81.30)

Wenn keine Angabe (auch auf Anfrage) zu der Anzahl der Beschäftigten in NRW in bestimmten Bereichen ermittelt werden konnte, wurde der Gesamtverbrauch für Deutschland aus der Studie “Energieverbrauch des Sektors GHD in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013“ zu Grunde gelegt und mit dem Faktor 0,2176 verrechnet, der das Verhältnis der Erwerbstätigen in NRW zu den Erwerbstätigen in Deutschland widerspiegelt. Der Faktor wurde für die Bereiche sonstige betriebliche Dienstleistungen, Deutsche Post und Wäscherei und chemische Reinigungen verwendet [128]. Die Anzahl der Mitarbeiter der Deutschen Bahn AG in NRW konnte auf Anfrage mit 31.000 beziffert werden. Eine Übersicht über alle in NRW befindlichen Campingplätze gibt eine Anzahl von 188 Plätzen an [129]. Basierend auf Erfahrungswerten wurde mit durchschnittlich 2 Mitarbeitern pro Campingplatz gerechnet. Eine Ungenauigkeit an dieser Stelle spielt eine untergeordnete Rolle, da der Wärmebedarf in diesem Bereich äußerst gering ist. Für den Bereich Landwirtschaft konnten über die Landwirtschaftskammer NRW 123.732 Beschäftigte im Jahr 2011 ermittelt werden [130]. Zudem wurden 23.000 Beschäftigte im Gartenbau in NRW auf Anfrage vom Verband der Garten- und Landschaftsbauer in NRW genannt.

Wie bereits erwähnt, sind nicht alle spezifischen Wärmeverbräuche auf die Anzahl der Beschäftigten bezogen. So galt es, für die Abweichungen verwertbares Zahlenmaterial zu ermitteln. Für Krankenhäuser konnte hier wieder auf den Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein Westfalen (IT.NRW) zurückgegriffen werden. Hier ist die Anzahl der Betten in Krankenhäusern in NRW mit knapp 120.250 im Jahresdurchschnitt für 2013 angegeben [131]. Des Weiteren konnte die Anzahl der Schüler in NRW für das Jahr 2013/2014 mit Hilfe des Ministeriums für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen mit 2.583.286 Schülern exakt ermittelt werden [132]. Für Studenten von Universitäten und Hochschulen lagen lediglich verlässliche Zahlen vom Landesbetrieb IT.NRW für das Wintersemester 2013/2014 vor. Diese belaufen sich auf insgesamt 636.766 Studenten, die in der Berechnung des Wärmebedarfs berücksichtigt werden [133]. Für den Wärmebedarf der Bäder musste die Wasserfläche aller Bäder in NRW ermittelt werden. Da dies sich bei mehr als 1.000 Bädern im Bundesland als deutlich zu umfangreich erwies, wurde für die beiden repräsentativen Städte Mülheim an der Ruhr und Essen der Mittelwert der Wasserfläche aller großen Bäder

ermittelt. Hierbei handelt es sich unter der Berücksichtigung von 12 Bädern um eine durchschnittliche Wasserfläche von 330 m<sup>2</sup> (nach [134], [135]). Diese konnte anschließend mit der Gesamtzahl der Lehr- und Hallenbäder in NRW (572, [136]) verrechnet werden, was zu einer absoluten Wasserfläche von ca. 189.200 m<sup>2</sup> führt. Zudem mussten die Mitarbeiter der 188 Campingplätze in NRW [129] abgeschätzt werden. Für die Flughäfen war es möglich, den genauen Wärmebedarf für die größten Flughäfen in NRW (Düsseldorf, Köln/Bonn, Dortmund und Münster/Osnabrück) zu berücksichtigen. Der Flughafen Düsseldorf betreibt zur Wärme- und Stromversorgung zwei Blockheizkraftwerke, die im Rahmen des “BHKW des Monats“ von der Zeitung ENERGIE&MANAGEMENT ausgezeichnet wurden. Hier ist im entsprechenden Artikel ein Wärmebedarf in Höhe von 69.000 MWh genannt [137]. Für den Flughafen Köln/Bonn wurde der Wärmebedarf auf Anfrage mit 60.843 MWh beziffert [138]. Des Weiteren war es möglich, den Umwelt-/ Nachhaltigkeitsberichten der Flughäfen Dortmund und Münster/Osnabrück die gewünschten Zahlen zu entnehmen (8.632 MWh für Dortmund und 5.131 MWh für Münster/Osnabrück) [139], [140]. Um die Wärmebedarfe für die zwei fehlenden Flughäfen Weeze und Paderborn/Lippstadt zu berechnen, wurde über den Gesamtwärmebedarf und die Anzahl aller jährlichen Fluggäste der oben genannten Flughäfen ein spezifischer Verbrauch von 4,3175 kWh/Passagier ermittelt (nach [141], [142], [143], [144]). Mit den Angaben der Passagiere für die Flughäfen Weeze und Paderborn/Lippstadt konnten auch hier die Wärmebedarfe mit 10.751 MWh und 3.432 MWh bestimmt werden [145], [146].

### 3.2.3 Wärmebedarfe der verschiedenen Bereiche

Nachdem alle benötigten Bezugseinheiten ermittelt werden konnten, war es möglich, den absoluten Verbrauch aller einzelnen Untergruppen des GHD-Sektors zu ermitteln. Eine genaue Aufschlüsselung bis teilweise auf Unterklassenebene ist in der entsprechenden Excel-Datei einzusehen.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich um einen überschlägigen Wert handelt. Die Berechnung ist zwar an einigen Stellen sehr genau (beispielsweise genaue Anzahl der Schüler in NRW), jedoch sind auch an anderen Stellen durch die Verrechnung mit dem oben angesprochenen Faktor von 0,2176 gewisse Ungenauigkeiten zu finden.

Die Wärmeverbräuche für die oben angesprochenen übergeordneten Bereiche sind in absoluten und prozentualen Werten in Tabelle 10 dargestellt. Hier wird deutlich, dass der Bereich “Büroähnliche Betriebe“ mit fast 30 % den größten Anteil am Wärmebedarf ausmacht. Die Bereiche “Wäschereien“, “Gartenbau“ und “Flughäfen“ sind mit weniger als 0,5 % fast vernachlässigbar. Des Weiteren wird ersichtlich, dass es keine gleichmäßige Verteilung gibt. Vielmehr sind ein besonders großer Verbraucher, mehrere Bereiche mit einem mittleren sowie weitere mit geringem bis sehr geringem Bedarf zu erkennen.

Tabelle 10: Absolute Verbräuche der einzelnen Bereiche des GHD-Sektors

Nr.	Bezeichnung	Verbrauch in MWh	Anteil in %
1	Baugewerbe	1.332.554	3,02
2	Büroähnliche Betriebe	12.722.136	28,80
3	Herstellungsbetriebe	5.441.396	12,32
4	Handel	7.204.881	17,62
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder	6.425.858	14,55
6	Beherbergung, Gaststätten, Heime	6.433.783	14,57
7	Nahrungsmittelgewerbe	2.032.288	4,60
8	Wäschereien	2.382	0,01
9	Landwirtschaft	700.694	1,59
10	Gartenbau	11.960	0,03
11	Flughäfen	157.789	0,36
12	Bekleidung, Leder, Spedition	145.403	0,33
13	Nicht über FB* erfasste Betriebe	978.925	2,20
$\Sigma$		43.590.049	100

Abschließend kann der gesamte Wärmeverbrauch des GHD-Sektors überschlägig auf ca. 44 TWh im Jahr beziffert werden, was knapp 157 PJ entspricht.

### 3.2.4 Potenziale für die Kraft-Wärme-Kopplung im GHD-Sektor

Grundvoraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz von KWK-Anlagen sind ein möglichst gleichzeitiger und gleichmäßiger Strom- und Wärmebedarf. Diese Eigenschaft der Bedarfe ermöglicht lange Betriebszeiten der Anlage sowie einen hohen Anteil eigengenutzten Stroms. Solche Anforderungen erfüllen insbesondere Bereiche des GHD-Sektors, deren Betriebszeiten sich nicht nach Werktagen und Wochenenden richten. So sind beispielsweise Krankenhäuser, Hallenbäder und Hotels für den Einsatz von KWK-Anlagen besonders gut geeignet.

In Krankenhäusern wird neben der Raumwärme zusätzlich Prozesswärme teilweise für eigene Wäschereien sowie für zentrale Sterilisation bzw. Desinfektion benötigt. Strom wird neben der Beleuchtung für die Nutzung von medizinischen Geräten und für die Klimatisierung verwendet.

Ebenfalls einen hohen Strom- und Wärmeverbrauch weisen Hallenbäder durch die Beheizung der Wasserfläche und die Nutzung von Umwälzpumpen für die Wasserreinigung sowie die Belüftung der Bäder auf. Zudem sind viele solcher Einrichtungen mit Saunas und Solarien ausgestattet, was den Energiebedarf nochmals erhöht.

Hotels sind wie die anderen oben genannten Einrichtungen ebenfalls an Wochenenden geöffnet. Hier ist ein Großteil des Strom- und Wärmebedarf auf die Beleuchtung, die Klimatisierung und die Nutzung von Kühleinheiten in den Restaurants zurückzuführen. Des Weiteren sind viele große Hotels mit Wellnessbereichen (Hallenbädern, Saunas und Solarien) ausgestattet, die wie bereits angesprochen den Strom- und Wärmebedarf stark beeinflussen.

### 3.2.5 Räumliche Bedarfsverteilung

Im vorangehenden Abschnitt 3.2 wurde bereits der absolute Verbrauch an Wärme im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung ermittelt. Dafür ist der Sektor zunächst mit verschiedenen Bereichen definiert worden. Als komplementäre Information wird in diesem Kapitel die räumliche Verteilung des Wärmebedarfs aufgezeigt.

In der Datenverarbeitung von German.Site (Realisation GmbH) wird der Sektor GHD in nur drei Bereiche unterteilt: Handel, Finanzdienstleistungen und Öffentliche Einrichtungen.[147]

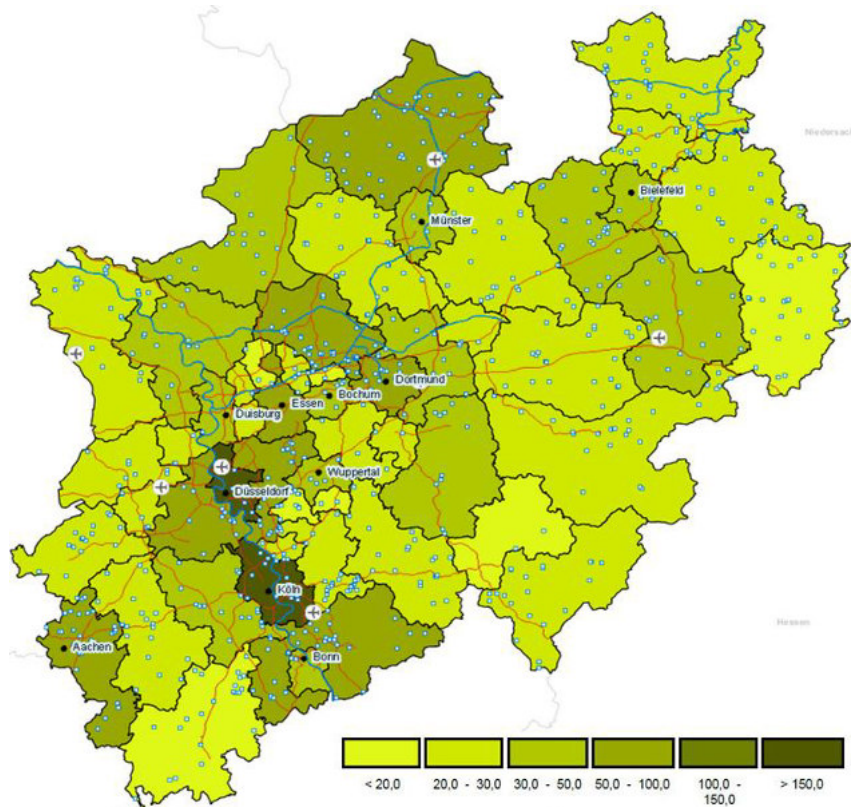


Abbildung 25: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Handel in NRW, Quelle: [147]

Zur direkten Wärmeermittlung liegen keine verlässlichen und präzisen Daten vor. In Anlehnung an die Vorgehensweise zur Bestimmung des Wärmebedarfs wird auch in diesem Arbeitspaket die Erwerbstätigenzahl als Bezugseinheit herangezogen. Die Erwerbstätigenzahl hat sich in Bezug auf den Sektor GHD in vielen Studien als eine erfolgreiche Stütze erwiesen. Hier wird als Bezugseinheit Erwerbstätige pro 1.000 Einwohner herangezogen. Deutschlandweit sind 41,5 Mio. Erwerbstätige bei einer Einwohnerzahl von 82 Mio. Menschen in der Statistik registriert. Da hier die Zahlen auf Erwerbstätige pro 1.000 Einwohner definiert sind, kann man durch eine Verdopplung der Zahlen auf die Aufteilung der Erwerbstätigen untereinander, d. h. ohne die Nicht-Erwerbstätigen, schließen.

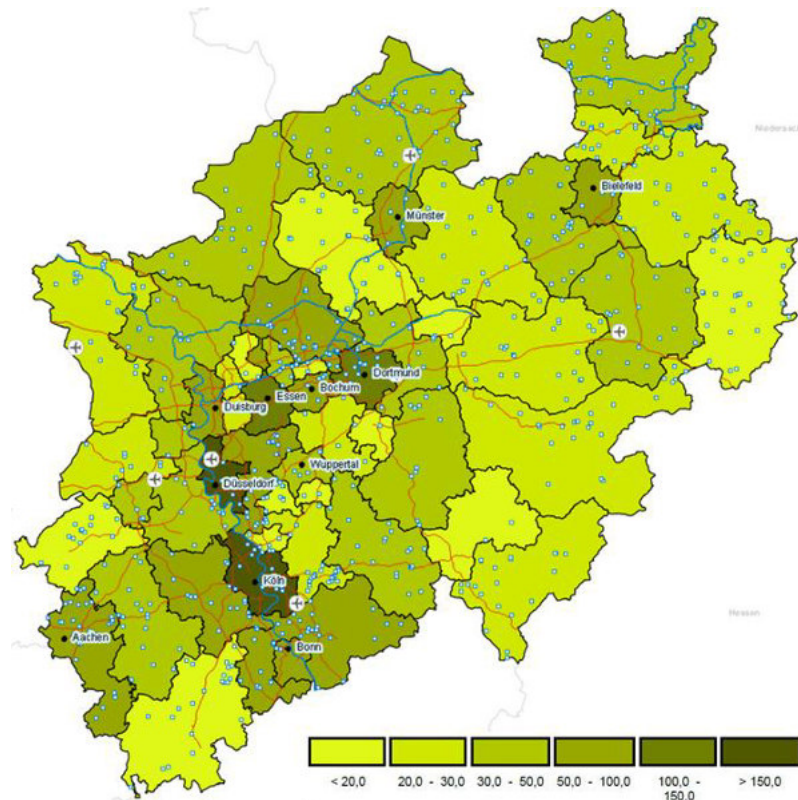


Abbildung 26: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Finanzdienstleistungen in NRW, Quelle: [147]

Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner für den Bereich Handel in NRW. Unter dem Bereich Handel werden Handel, Verkehr, Gastgewerbe und Informations- und Kommunikationstechnik verstanden. Dunkle Bereiche markieren hier Gemeinden, die pro 1.000 Einwohner besonders viele Erwerbstätige in diesem Bereich aufweisen. Hier sind allen voran die Städte Köln und Düsseldorf zu nennen, die als Handelszentren in NRW fungieren. Ähnlich hohe Zahlen, also 10 bis 15 % der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner weisen die Städteregion Aachen, Neuss, der Rhein-Sieg-Kreis, Mettmann, Essen, Dortmund, Recklinghausen und der Kreis Steinfurt auf. Zusammenfassend lässt sich hier sagen, dass Düsseldorf und Köln als bedeutende Handels- und Verkehrszentren in NRW agieren, was einen erhöhten Wärmebedarf suggeriert. Weitere Ansammlungen sind über NRW gestreut und lassen sich nur schwer clustern. Im Einzelfall ist die Struktur einer Stadt/Gemeinde zu prüfen, ob ein erhöhtes Absatzpotenzial vorliegt.

Der Bereich Finanzdienstleistungen deckt die Branchen Finanz-, Versicherungs- und Unternehmensdienstleistungen ab und ist in Abbildung 26 dargestellt. Verglichen mit Abbildung 25 lässt sich feststellen, dass die Farbgebung in Abbildung 26 dunkler ausfällt und somit auf mehr Erwerbstätige in diesem Sektor schließen lässt. Dies lässt sich beispielsweise an den Farben der Städte Essen und Dortmund sowie Münster und Bielefeld nachvollziehen. Besonders viele Erwerbstätige in diesem Sektor arbeiten wie auch im Sektor Handel in Köln und Düsseldorf, wobei Essen und Dortmund dicht gefolgt auf der darunterliegenden Stufe aufwarten. Dementsprechend kann hier vereinfacht von einer Konzentration auf die obere Rheinschiene und das Ruhrgebiet ausgegangen werden.

Der dritte Bereich beinhaltet Öffentliche Einrichtungen, private Dienstleistungen, Erziehung und Gesundheit. Gemessen an der Farbgebung aller drei Abbildungen weist dieser Sektor die meisten Erwerbstätigen auf. Neben der Rheinschiene (Düsseldorf, Köln und hier auch Bonn) weist das Ruhrgebiet mit den Städten Essen und Dortmund sowie die Städteregion Aachen einen sehr hohen Anteil an Erwerbstätigen auf. Auffallend ist in dieser Betrachtung, dass Düsseldorf als Landeshauptstadt und Regierungsbezirk nicht den höchsten Anteil inne hat. Köln beherbergt mit mehr als 15 % die meisten Erwerbstätigen in diesem Sektor. Kölns größte Arbeitgeber im Bereich GHD sind die Stadt Köln, die Stadtwerke Köln und die REWE Group. In Düsseldorf ist der Flughafen der größte Arbeitgeber, gefolgt von der Metro AG, Henkel AG, Vodafone, Droege und Gea.

Werden die Erkenntnisse aus den drei Sektoren übereinander gelegt, ist der größte Wärmebedarf und das größte Potenzial aus dem Sektor GHD in den Metropolen Köln und Düsseldorf zu finden wie in Abbildung 28 zu erkennen. Darüber hinaus ist im Ruhrgebiet vor allem eine Konzentration auf die Städte Essen und Dortmund zu nennen. Ein geringerer Wärmebedarf des GHD Sektors ist in den Städten Aachen, Münster und Bielefeld bestimmt worden. Im Allgemeinen ist das Potenzial in ländlich gelegenen Regionen als gering einzuschätzen [147].

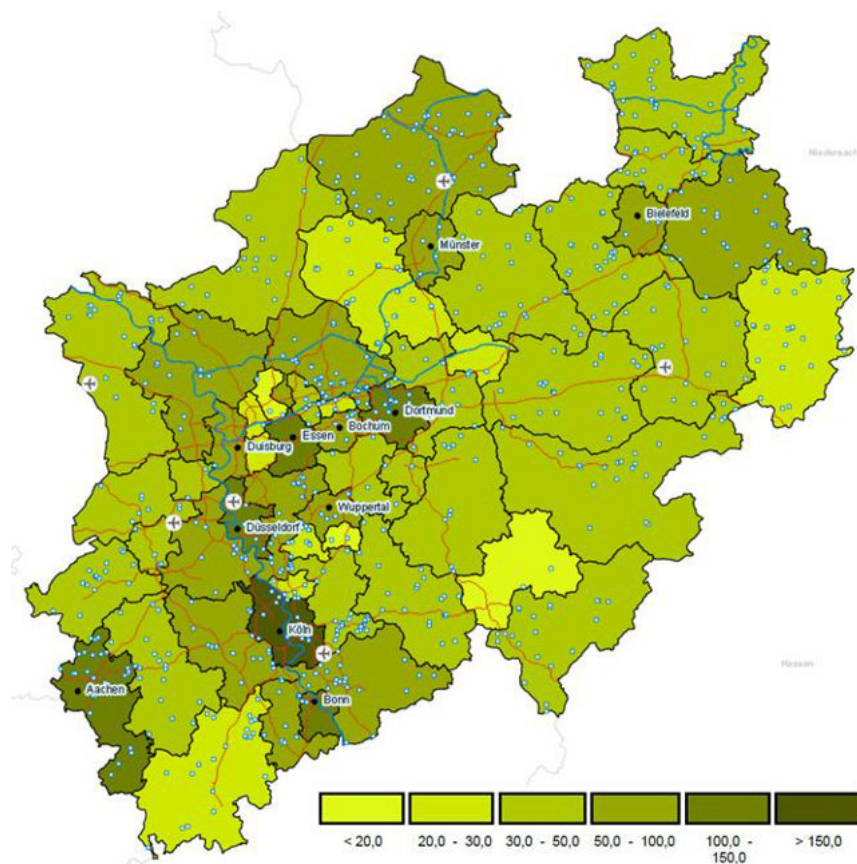


Abbildung 27: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Öffentliche Einrichtungen in NRW, Quelle: [147]



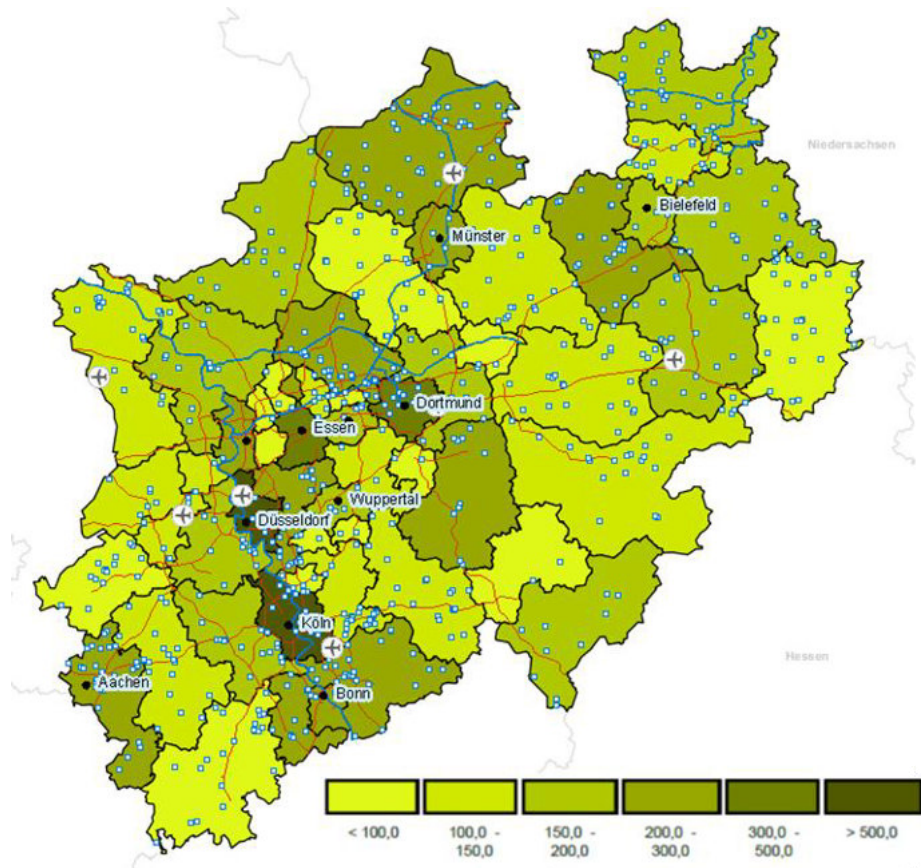


Abbildung 28: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Finanzdienstleistungen, Handel und öffentliche Einrichtungen in NRW

### 3.3 Wärmebedarfe im Industrie-Sektor

Im Rahmen dieses Arbeitspakt es wurde der Wärmebedarf im Industrie-Sektor in NRW mit Hilfe von verschiedenen statistischen Quellen durchleuchtet. Parallel dazu wurden relevante Studien mitberücksichtigt. Ziel war es, sowohl den aktuellen Bedarf nach Branche als auch die Entwicklung des Bedarfes in den letzten Jahren zu ermitteln, damit der Trend besser dargestellt werden kann.

#### 3.3.1 Wärmebedarfsermittlung aus Endenergieverbrauch im Jahr 2012

Für den Bereich „Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau und verarbeitendes Gewerbe“ wurden die statistischen Daten von IT.NRW 2012 für den Endenergieverbrauch der Industriebranchen [148] analysiert und geclustert. Die Clusterung entspricht derjenigen, die in der PROGNOSE Studie 2014 [149] enthalten ist. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Endenergieverbrauch nach Industriezweigen in NRW für 2012 (Angabe in TWh/a), Quelle: [148], eigene Berechnungen

Industriebranchen	Brennstoffe*)	Strom	Fernwärme	Andere	Energieträger insgesamt
Ernährung und Tabak	7,00	3,57	0,48	0,00	11,04
Fahrzeugbau	1,72	2,03	0,72	0,00	4,47
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	0,49	0,36	0,00	0,00	0,86
Glas u. Keramik	4,20	1,00	0,01	0,00	5,21
Grundstoffchemie	32,57	16,91	11,39	6,92	67,80
Gummi- und Kunststoffwaren	1,35	2,59	0,04	0,00	3,98
Maschinenbau	2,29	2,36	0,55	0,00	5,21
Metallbearbeitung	6,77	5,35	0,28	0,00	12,39
Metallerzeugung	50,54	7,53	0,36	0,00	58,43
NE-Metalle. -gießereien	5,43	7,04	0,04	0,00	12,50
Papiergewerbe	4,65	4,31	2,00	0,06	11,03
Sonstige chemische Industrie	2,21	1,39	1,23	0,06	4,90
Sonstige Wirtschaftszweige	6,82	7,30	0,53	0,09	14,74
Verarbeitung v. Steinen u. Erden	10,03	1,74	0,05	2,32	14,13
<b>summe</b>	<b>136,07</b>	<b>63,47</b>	<b>17,68</b>	<b>9,46</b>	<b>226,67</b>
*) inkl. Biomasse					

Für die Berechnung des Wärmebedarfs wurde weiterhin die Statistik des BMWi 2014 für den Endenergieverbrauch in der Industrie nach Anwendungsbereichen [150] genutzt. Dazu wurden die Jahre 2011, 2012 und 2013 ausgewertet. Somit konnte der Anteil eines jeden Energieträgers bestimmt werden, der zu Raumwärme, Prozesswärme, Klimakälte und Prozesskälte beiträgt.

Tabelle 12: Anteil des jeweiligen Energieträgers (in %) für die Erzeugung von Raumwärme, Prozesswärme sowie Kälte und Prozesskälte für Industrie in der BRD

Quelle: [150], eigene Berechnungen

	Raumwärme	Prozesswärme	Klimakälte	Prozesskälte
Kohle	2,3	97,7	-	-
Öl	23,0	73,1	-	-
Gas	14,3	84,6	-	-
Strom	0,4	19,7	2,3	2,6
Fernwärme	17,9	82,1	-	-
Erneuerbare	24,4	75,6	-	-
Sonstige	2,4	97,6	-	-

Mit der Annahme, dass diese Anteile gleich groß für NRW und BRD sind, lassen sich die Raumwärme, die Prozesswärme sowie Klimakälte und Prozesskälte für die Industrie aus dem oben angegebenen Endenergiebedarf berechnen. Für die Wärmeerzeugung mit Brennstoffen wurde ein Wirkungsgrad von 90 % angenommen. Es ergeben sich ein Wärmebedarf von 18,8 TWh/a für Raumwärme und 141,1 TWh/a für Prozesswärme, d. h. insgesamt ein Wärmebedarf von 159,9 TWh/a. Dabei ist die Fernwärme mit 17,7 TWh/a darin enthalten.

Der Wärmebedarf nach Industriebranchen kann weiterhin in Raumwärme und Prozesswärme bei unterschiedlichem Temperaturniveau aufgeteilt werden. Dazu dient die Darstellung nach PROGNOSE 2014 [149], die wiederum auf Wagner 2002 basiert [151] (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Aufteilung des Wärmebedarfs nach Industriebranchen und Temperaturniveau. Angabe in % Quelle: [151], [149], eigene Berechnungen

Industriebranchen	Raumwärme + Warmwasser	< 100 °C	100 - 200 °C	200 - 300 °C	300 - 500 °C	> 500 °C
Ernährung und Tabak	20	37	41	2	0	0
Fahrzeugbau	33	26	23	0	0	18
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	4	85	5	5	1	0
Glas u. Keramik	4	3	0	0	4	89
Grundstoffchemie	7	16	11	6	4	56
Gummi- und Kunststoffwaren	22	16	12	50	0	0
Maschinenbau	33	20	16	0	0	31
Metallbearbeitung	17	0	1	1	0	81
Metallerzeugung	3	1	1	1	0	95
NE-Metalle. -gießereien	20	4	4	4	11	57
Papiergewerbe	15	20	65	0	0	0
Sonstige chemische Industrie	7	42	25	15	11	0
Sonstige Wirtschaftszweige	33	19	12	17	0	19
Verarbeitung v. Steinen u. Erden	4	0	5	1	0	90

Lediglich die Werte für Metallerzeugung wurden aus der Darstellung von Wagner übernommen, da dies realistischer zu sein schien. Außerdem ergab sich mit den angepassten Faktoren für die Metallerzeugung eine bessere Übereinstimmung mit der Studie des Bremer Institutes für NRW [41].

Mit Hilfe dieser Faktoren aus Tabelle 13 konnten die Wärmebedarfe für alle Industriebranchen nach dem Temperaturniveau ermittelt werden. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 29 dargestellt.

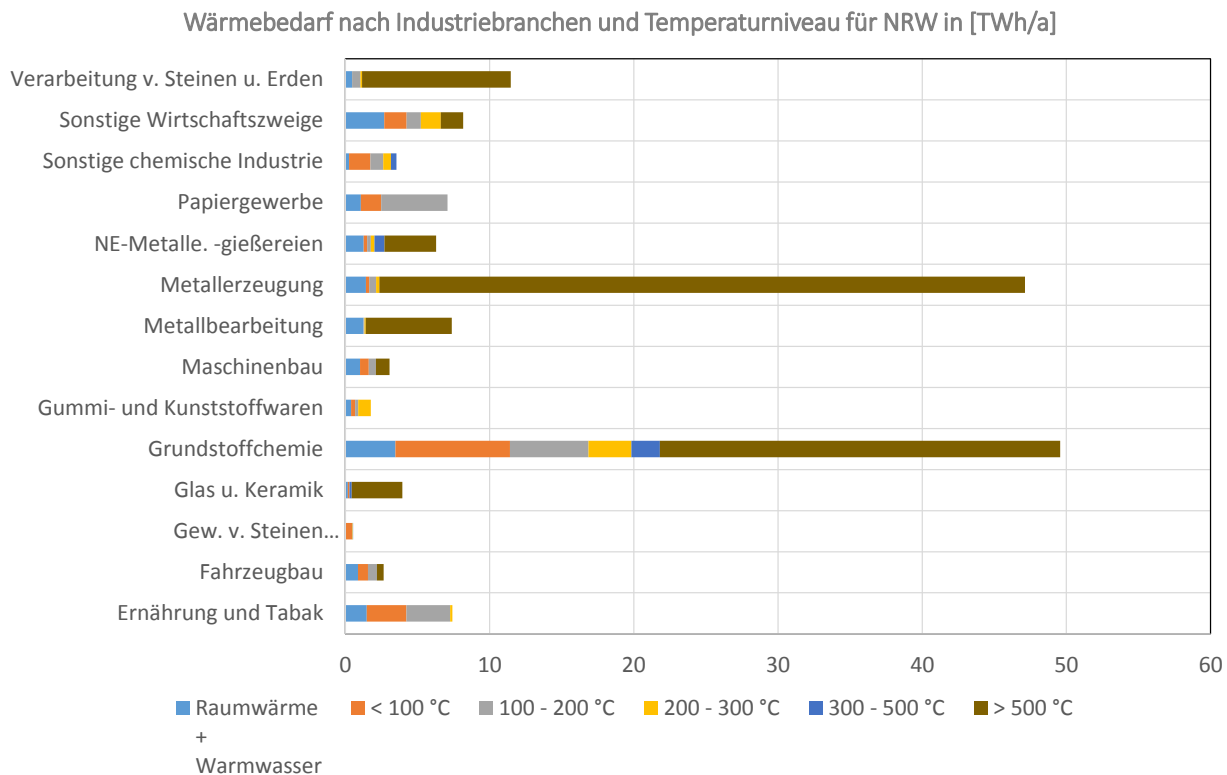


Abbildung 29: Wärmebedarf nach Industriebranchen und Temperaturniveau für NRW in TWh/a Quelle: eigene Berechnungen

Da bei der KWK Potenzialanalyse der Wärmebedarf bis 300 °C bzw. bis 500 °C von Interesse ist, wurden diese Werte separat graphisch angegeben. Dabei ist die Fernwärme von 17,7 TWh/a darin nicht enthalten (s. Abbildung 30). Der Gesamtwärmebedarf ohne Fernwärme beläuft sich auf 40,1 bzw. 43,4 TWh/a. Der Unterschied an Wärmebedarf zwischen 300 °C und 500° C ist gering. Lediglich in der chemischen Industrie und der Branche „NE-Metallgießereien“ lässt sich ein höherer Bedarf bis 500 °C rechnerisch ermitteln.

Aus dem Diagramm ist eindeutig ersichtlich, welche Rolle bei der Darstellung des Wärmebedarfes bis 300 °C/500 °C die Industriebranchen Ernährung, Chemie und Papiergewerbe spielen.

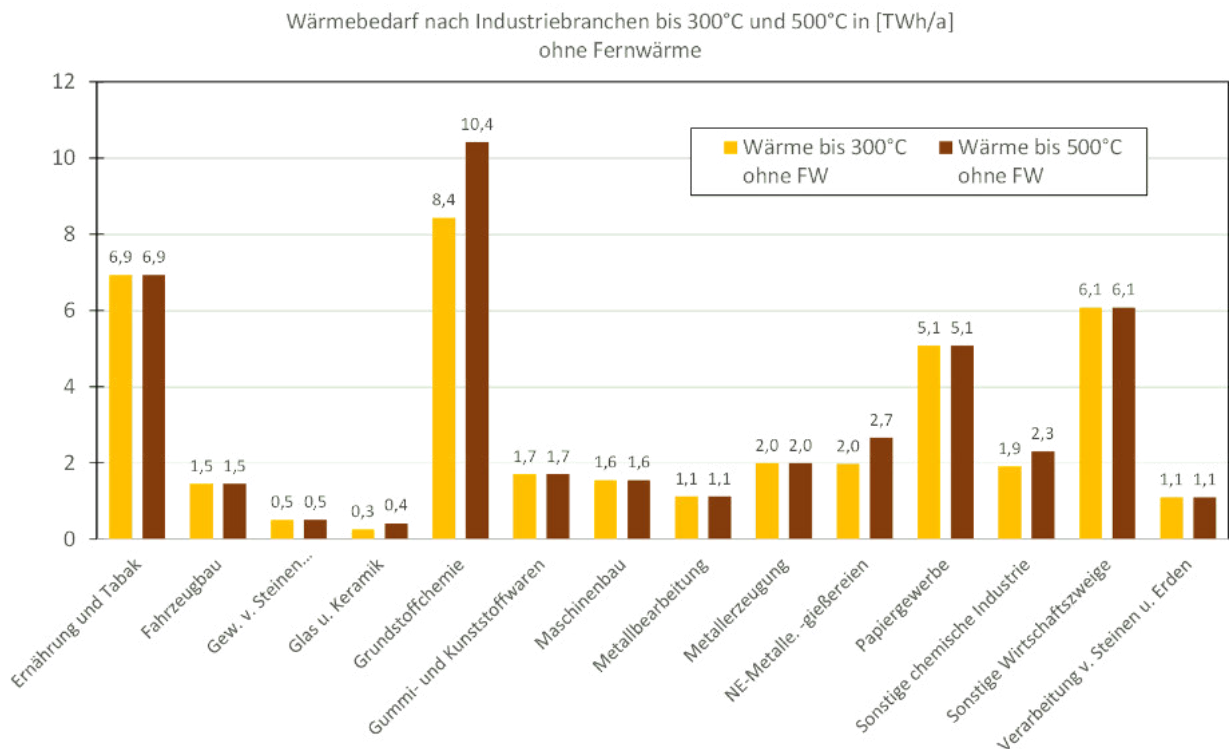


Abbildung 30: Wärmebedarf nach Industriebranchen für NRW bis 300 und 500 °C in TWh/a ohne Fernwärme Quelle: eigene Berechnungen

### 3.3.2 Wärmebedarfsermittlung aus Wärmebedarfen für BRD

Weiterhin wurde die Berechnung des Wärmebedarfes für NRW mittels des ermittelten Wärmebedarfes für die Industrie in der Bundesrepublik aus der PROGNOSE Studie 2014 [149] abgeleitet. Diese Methode basiert auf dem Endenergieverbrauch der Industrie in NRW und BRD. Dazu wurden die Verhältnisse der Endenergien nach Industriebranchen für NRW und BRD mittels Daten aus der VIK Statistik, Ausgabe 2014 [152] und NRW Statistik [148] für 2011 ermittelt (s. Abbildung 31). Multipliziert man die Wärmebedarfe der Tabelle 31 aus der PROGNOSE Studie [149] mit den entsprechenden passenden Faktoren, so ergeben sich die Wärmebedarfe nach Industriebranchen für NRW. Diese indirekte Methode dient zur Absicherung des unter 3.3.1 berechneten Wärmebedarfes. Der so errechnete Wärmebedarf der Industrie bis 300 °C nach Industriebranchen ist in Tabelle 14 aufgelistet. In Summe ergibt sich ein um ca. 24 % höherer Wärmebedarf als unter 3.3.1. Die Abweichung lässt sich erklären durch den hohen Anteil an Wärmebedarf bis 300 °C für die Branche Metallerzeugung. Zwar ist der Wärmebedarf für die beiden anderen metallverarbeitenden Branchen eher zu niedrig, jedoch ist die Summe für die Metallbranche nach der PROGNOSE Studie [149] zu hoch. Da der Anteil der Metallerzeugung in NRW im Vergleich zum Bund besonders hoch ist, ist der Effekt besonders gravierend. Diese Diskrepanz ist noch zu klären. Dazu sind Detaildaten von den Betrieben erforderlich, um die Wärme dem richtigen Temperaturniveau zuzuordnen zu können.

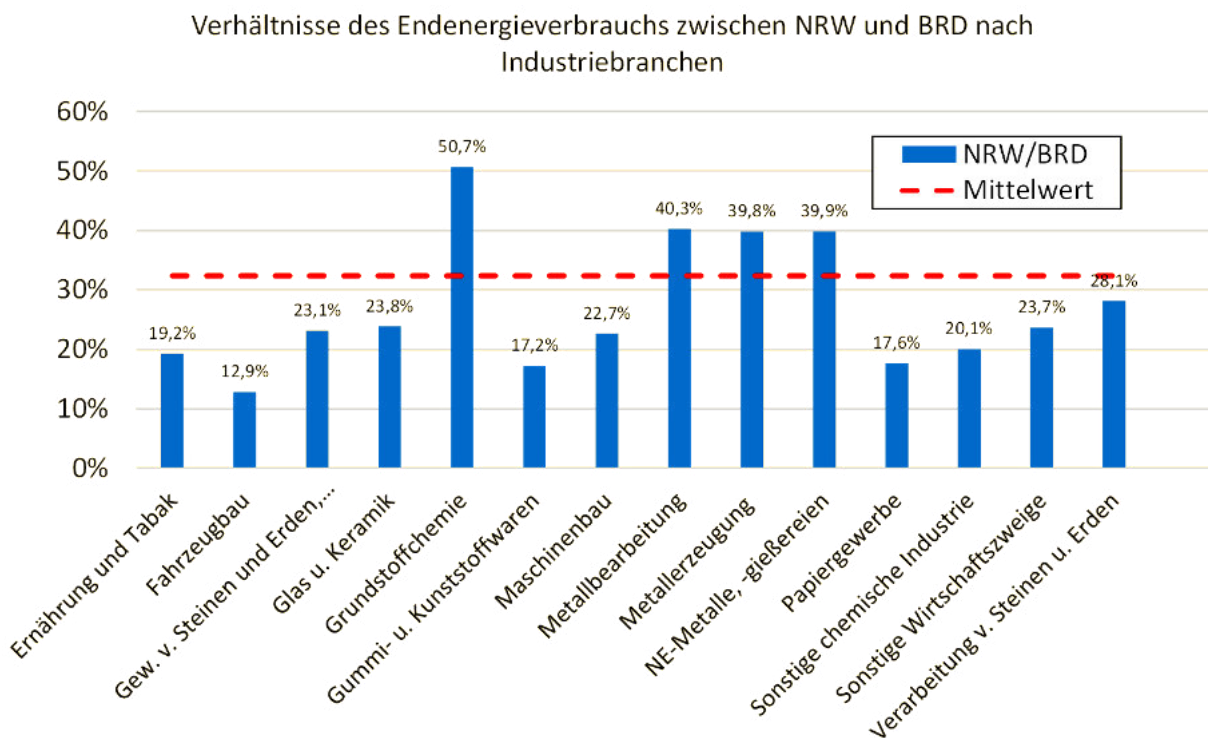


Abbildung 31: Verhältnisse des Endenergieverbrauchs zwischen NRW und BRD nach Industriebranchen für das Jahr 2011 Quelle: [152], [148]

Tabelle 14: Wärmebedarf bis 300 °C nach Industriebranchen in TWh/a abgeleitet von statistischen Daten für NRW und BRD Quelle: [159], eigene Berechnungen

	Wärmebedarf in TWh <300°C		
	BRD 2012	NRW/BRD	NRW 2012
Ernährung und Tabak	25,9	19,2%	5,0
Fahrzeugbau	7,4	12,9%	1,0
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	1,9	23,1%	0,4
Glas u. Keramik	0,5	23,8%	0,1
Grundstoffchemie	28,2	50,7%	14,3
Gummi- und Kunststoffwaren	12,4	17,2%	2,1
Maschinenbau	3,6	22,7%	0,8
Metallbearbeitung	0,3	40,3%	0,1
Metallerzeugung	32,9	39,8%	13,1
NE-Metalle. -gießereien	1,6	39,9%	0,7
Papiergewerbe	32,0	17,6%	5,6
Sonstige chemische Industrie	13,8	20,1%	2,8
Sonstige Wirtschaftszweige	12,5	23,7%	3,0
Verarbeitung v. Steinen u. Erden	2,7	28,1%	0,8
<b>summe</b>	<b>175,5</b>	<b>28,3%</b>	<b>49,7</b>

### 3.3.3 Endenergieverbrauch einzelner Industriebranchen in NRW

Da sich die Studie des Bremer Energieinstitutes auf Daten von 2007 bezieht, wurde der Verlauf des Endenergiebedarfs der verschiedenen Branchen von 2007 bis 2012 analysiert.

In der Abbildung 32 ist der Verlauf des Brennstoffbedarfes (Endenergie), des Stromes und der Fernwärme der gesamten Industrie in NRW von 2007 bis 2012 dargestellt.

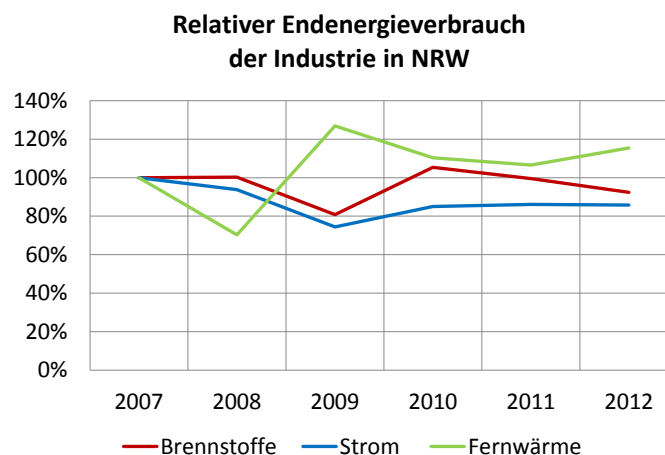


Abbildung 32: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Industrie in NRW von 2007 bis 2012 in [%]  
Quelle: [149], eigene Berechnungen

Während bei Brennstoffen (inkl. Biomasse) eine leichte (ca. 8 %) und bei Strom eine deutlichere Abnahme (ca. 15 %) des Endenergieverbrauchs zwischen 2007 und 2012 festzustellen ist, stellt man bei der Fernwärme als Endenergieträger eine Zunahme von ca. 15 % fest. Der Verlauf von 2007 bis 2012 ist allerdings nicht kontinuierlich, bedingt durch die Industriekrise von 2008 bis 2009. Diese Tendenz spiegelt sich auch im berechneten Wärmebedarf wider. Der berechnete Wärmebedarf in 3.3.1 ist auch ca. 8 % geringer als bei der Studie des Bremer Energieinstitutes [41].

Im Anhang sind die Verläufe der relativen Endenergieverbräuche für die verschiedenen Industriebranchen dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Verläufe teilweise eine andere Tendenz zeigen, als die des gesamten Energieverbrauchs. Diese Feststellung führt dazu, dass die einzelnen Branchen im Hinblick auf das Potenzial separat untersucht werden müssen. Auffällig ist die unterschiedliche Nutzung der Fernwärme, die nicht mit dem Verlauf der Brennstoffe und des Stromes korreliert. Dies könnte daran liegen, dass die Fernwärme hauptsächlich von den Wetterbedingungen und teilweise von diversen Prozessen bei Temperaturen von 100 bis 120 °C abhängt.

### 3.3.4 KWK Wärmeerzeugung in der Industrie

Bei der Ermittlung der KWK-Potenziale ist die Entwicklung der KWK in der Industrie zu berücksichtigen. Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Wärmeerzeugung mit KWK-Anlagen der Industrie von 2007 bis 2012. Es ist eher eine kleine Abnahme der erzeugten Wärme mittels KWK festzustellen. Berücksichtigt man allerdings den Verlauf des Endenergieverbrauchs (s. Abbildung 32), dann stellt man auch da eine kleine Abnahme fest.

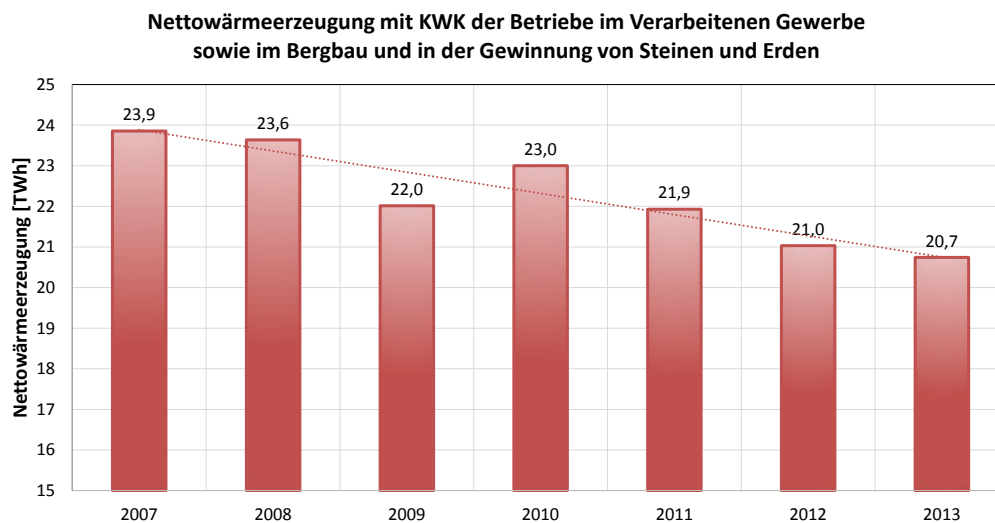


Abbildung 33: Entwicklung der industriellen KWK-Wärmeerzeugung in NRW von 2007 bis 2012  
Quelle: [148], eigene Berechnungen

Betrachtet man insgesamt die energetische Entwicklung von 2007 bis 2012 in der Industrie in NRW, dann lässt sich in Summe kein gravierender Einschnitt erkennen. Somit kann das gesamte Potenzial, das in der Studie des Bremer Institutes [41] ausgewiesen wurde, weiterhin als gültig angesehen werden. Allerdings sind aufgrund der unterschiedlichen Verläufe des Endenergiebedarfs in den einzelnen Branchen spezifische Daten direkt von den Unternehmen zum Wärmebedarf erforderlich, um belastbare Aussagen über den Wärmebedarf der einzelnen Branchen und letzten Endes über das KWK-Potenzial treffen zu können.

### 3.3.5 Entwicklung des Wärmebedarfes bis 2020 und 2030

Die Entwicklung des Wärmebedarfes wurde sowohl in der Bremer Studie für NRW [41] als auch in der aktuellen PROGNOSE Studie 2014 [149] für die Bundesrepublik durch verschiedene Ansätze prognostiziert.

Durch Verknüpfung der Annahmen zur Bruttowertschöpfung und zur Entwicklung der Energieintensitäten der Industriebranchen ergibt sich nach PROGNOSE ein Bild der Entwicklung des Wärmebedarfes nach Branche. Diese Tendenzen lassen sich grundsätzlich auch auf NRW übertragen, da eine ähnliche Industriestruktur existiert, jedoch sind die Auswirkungen aufgrund spezifischer Unterschiede differenzierter auszuwerten. Die Anteile am Endenergieverbrauch der Industriebranchen für NRW und BRD sind teilweise je nach Branche sehr unterschiedlich (s. Abbildung 31). Die Bereiche Grundstoffchemie, Metallerzeugung und -bearbeitung haben in NRW einen deutlich höheren Anteil als im Bund während die Bereiche Fahrzeugbau, Papiergewerbe, sonstige chemische Industrie und Gummi- u. Kunststoffwaren einen unterdurchschnittlichen Anteil aufweisen (s. Abbildung 31).

Laut PROGNOSE 2014 [149] nimmt der Wärmebedarf bis 300 °C von 2012 bis 2030 im Durchschnitt für alle Industriebranchen jährlich um 0,9 % zu. Nach 2035 ist eine Abnahme des Wärmebedarfes zu erwarten. Hohe Zuwächse im Wärmebedarf bis 300 °C sind bei der Pharmazie, Feinchemikalien und sonstiger Chemie generell, Gummi- und Kunststoffe, Fahrzeug- und Maschinenbau und in der Nahrungsmittelindustrie zu erwarten. Eine Abnahme ist bei der



Gewinnung von Steinen und Erden und ab 2020 auch in den Bereichen Glas und Keramik, Metallbearbeitung und Metallerzeugung als auch im Bereich des Papiergewerbes zu erwarten. In der Grundchemie ist zunächst ein Zuwachs, dann ab 2030 eine Abnahme des Wärmebedarfes zu erwarten (s. Tabelle 15). Somit ist ab 2040 eine Stagnation oder eine leichte Abnahme des Wärmebedarfes zu erwarten (PROGNOS [149]).

Auf der Basis dieser Prognose von PROGNOS [149] für die einzelnen Industriebranchen wurden die Entwicklungen der Wärmebedarfe ausgehend von den Werten für 2012, die unter 3.3.1 bestimmt wurden, berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Entwicklung des Wärmebedarfes (ohne Fernwärme) in NRW bis 2020 bzw. 2030 in TWh/a Quelle: [149], eigene Berechnungen

	Wärmebedarf in TWh <300 °C			Wachstumsrate pro Jahr
	2012	2020	2030	2012-2030
Ernährung und Tabak	6,9	8,4	8,4	1,1%
Fahrzeugbau	1,5	1,8	2,0	1,8%
Gew. V. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	0,5	0,5	0,4	-0,8%
Glas u. Keramik	0,3	0,3	0,3	-0,2%
Grundstoffchemie	8,4	9,9	10,1	1,0%
Gummi- und Kunststoffwaren	1,7	2,1	2,2	1,5%
Maschinenbau	1,6	1,9	2,1	1,6%
Metallbearbeitung	1,1	1,2	0,8	-1,7%
Metallerzeugung	2,0	2,1	2,0	-0,1%
NE-Metalle. -gießereien	2,0	2,4	2,5	1,4%
Papiergewerbe	5,1	5,6	5,6	0,5%
Sonstige chemische Industrie	1,9	2,5	2,8	2,2%
Sonstige Wirtschaftszweige	6,1	6,9	7,0	0,8%
Verarbeitung v. Steinen u. Erden	1,1	1,2	1,2	0,4%
Summe	40,1	46,8	47,5	0,9%

Nach dieser Prognose ist eine Zunahme des Wärmebedarfes bis 2020 um ca. 6,7 TWh/a zu erwarten, die hauptsächlich in den Branchen Ernährung und Tabak, Chemieindustrie (auch Pharmazie und Feinchemikalien) und Papiergewerbe zu finden ist. Im Bereich Fahrzeugbau und sonstige chemische Industrie ergibt sich sogar eine Zunahme des Wärmebedarfes bis 2030.

Ausgehend von dieser Tabelle und dem Bestand von KWK-Anlagen ergeben sich die Potenziale in den einzelnen Branchen für die nächsten 10 bis 15 Jahre.

Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung des Wärmebedarfes bis 300 °C für die Branchen der Metallerzeugung und -bearbeitung, die wiederum für NRW signifikant sind, ergibt sich die Notwendigkeit einer detaillierteren Untersuchung, da die Abweichung in den verschiedenen Ansätzen untereinander in derselben Größenordnung liegt wie das gesamte KWK-Potenzial für NRW.

### 3.3.6 Räumliche Bedarfsverteilung

Neben der Ermittlung des Wärmebedarfs der Industrie nach Industriebranchen in Nordrhein-Westfalen, ist es ebenfalls für diese Studie von Bedeutung, den Wärmebedarf örtlich zu bestimmen. Mit diesen Informationen ist es möglich eine Landkarte zu erstellen, die die Wärmedichte in NRW aufzeigt. Dadurch können Schwerpunkte hohen Wärmebedarfs lokalisiert werden. Mit diesen Informationen lässt sich zudem feststellen, an welchen Standorten eine detailliertere wärmetechnische Analyse erforderlich ist, um die Kraft-Wärme-Kopplung weiter auszubauen.

Zur Bestimmung der Wärmebedarfsdichte wurde die Statistik der Erfassung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Industrieanlagen benutzt. Dazu wurden die veröffentlichten CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten emissionspflichtiger Anlagen zusammengetragen, welche eine Feuerungsleistung von 20 MW überschreiten. Diese Anlagen decken den größten Teil der emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen ab. Anlagen mit einer geringeren Feuerungsleistung werden hingegen nicht berücksichtigt.

Als Informationsquelle diente die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt). Sie ist die im Umweltbundesamt verantwortliche Einrichtung für den EU-Emissionshandel. Da ein vollständiger und vor allem aktueller Datensatz nicht zugänglich war, diente der VIK (Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.) als Datenlieferant. Verwendet wurden verifizierte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Jahr 2013. Für dieses Jahr wurden insgesamt 536 emissionshandelspflichtige Anlagenbetreiber gelistet. Jedoch ist zu bedenken, dass in dieser Auflistung ebenfalls Anlagen der öffentlichen Versorgung und des GHD-Sektors aufgelistet werden. Aus diesem Grund musste zunächst eine Filterung nach Industrie, GHD und öffentlichen Versorgern vorgenommen werden. Es ergaben sich schließlich 339 gemeldete industrielle Anlagen mit einer Feuerungsleistung größer 20 MW.

Aus den Emissionen konnte der Brennstoffenergieeinsatz berechnet werden. Dazu ist neben der Kenntnis des verwendeten Brennstoffs einer Anlage ebenfalls der brennstoffspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor erforderlich. Für die Berechnung des Brennstoffeinsatzes wurden die in Tabelle 16 gelisteten Faktoren nach Energieträger benutzt.

Tabelle 16: Kohlendioxid- Emissionsfaktoren nach Energieträgern Quelle: [249]

Energieträger	Emissionsfaktor [kgCO <sub>2</sub> / GJ]
Braunkohle	114,0
Steinkohle	94,2
Erdgas	56,0
Heizöl leicht	74,0
Heizöl schwer	78,0
Kokereigas	40,0
Hochofengas	139,0
Industriemüll	71,1

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Brennstoff teilweise auch zur Stromerzeugung eingesetzt wurde. Die Elektrizitätserzeugung im Jahr 2013 für Betriebe im verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden beläuft sich laut IT

NRW [148] auf 11,84 TWh/a. Diese Stromerzeugung wurde anteilig – bezogen auf den Brennstoffeinsatz – auf ausgewiesene Industriekraftwerke aufgeteilt. Mit der Annahme eines durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrades für Industriekraftwerke von 35 % konnte der Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung kalkuliert werden. Dieser wurde vom Gesamtbrennstoffeinsatz abgezogen. Somit ergab sich der zur Wärmeproduktion eingesetzte Brennstoffeinsatz. Für die Wärmeproduktion wurden Verluste in Höhe von 10 % berücksichtigt.

Es resultierte schließlich für das Jahr 2013 in NRW für 339 Anlagen mit einer CO<sub>2</sub>-Emission von 57.871.588 t ein industrieller Wärmebedarf von 180,2 TWh/a. Dieser Wert ist, verglichen mit dem unter 3.3.1 errechneten Wärmebedarf, um ca.12 % höher. Aus diesem Grunde und der Absicht, eine relative Verteilung des Wärmebedarfes erstellen zu können, wurden alle Werte analog skaliert, sodass sich die Summe von 159,9 TWh/a (Kap. 3.3.1) ergibt. Da die Anlagen unter 20 MW Feuerungsleistung nicht erfasst sind, ist die Leistung dieser Anlagen implizit den anderen Betrieben zugewiesen worden. Auch wenn etwas ungenau, ist diese Betrachtung eine gute Basis für eine räumliche Verteilung, da diese Wärmebedarfswerte örtlich zugeordnet sind. Somit konnte eine NRW Wärmebedarfskarte erstellt werden (s. Abbildung 34). Man erkennt die sehr hohe Dichte im Kreis Duisburg aber auch die hohe Dichte in den Kreisen Gelsenkirchen, Rhein-Erft und Köln.

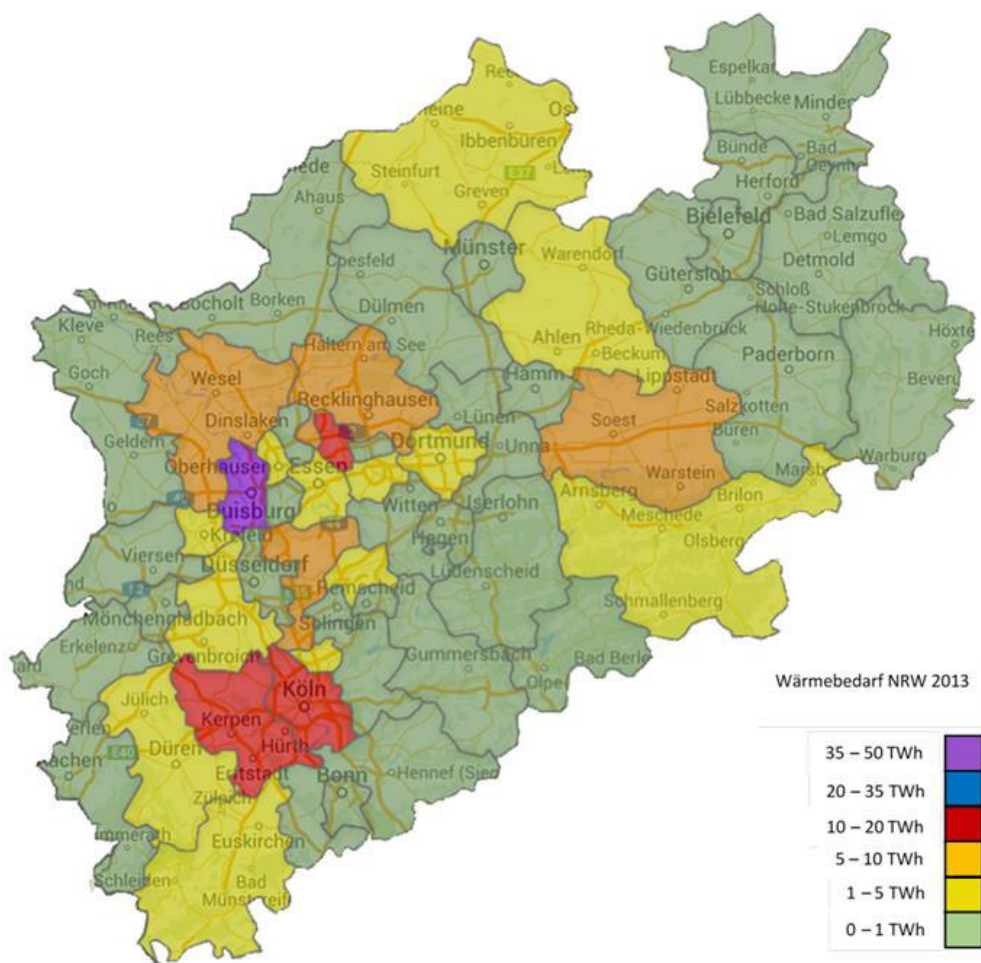


Abbildung 34: Wärmedichte für den Wärmebedarf der Industrie in NRW 2013, Quelle: eigene Berechnungen

Von Bedeutung ist aber auch die Verteilung der Anlagen nach Wärmeerzeugung (s. Abbildung 35). Bildet man die Summenhäufigkeit, dann ergibt sich Abbildung 36. Es ist festzustellen, dass ca. 90 % der Anlagen etwa 30 % der gesamten Wärmeerzeugung entsprechen.

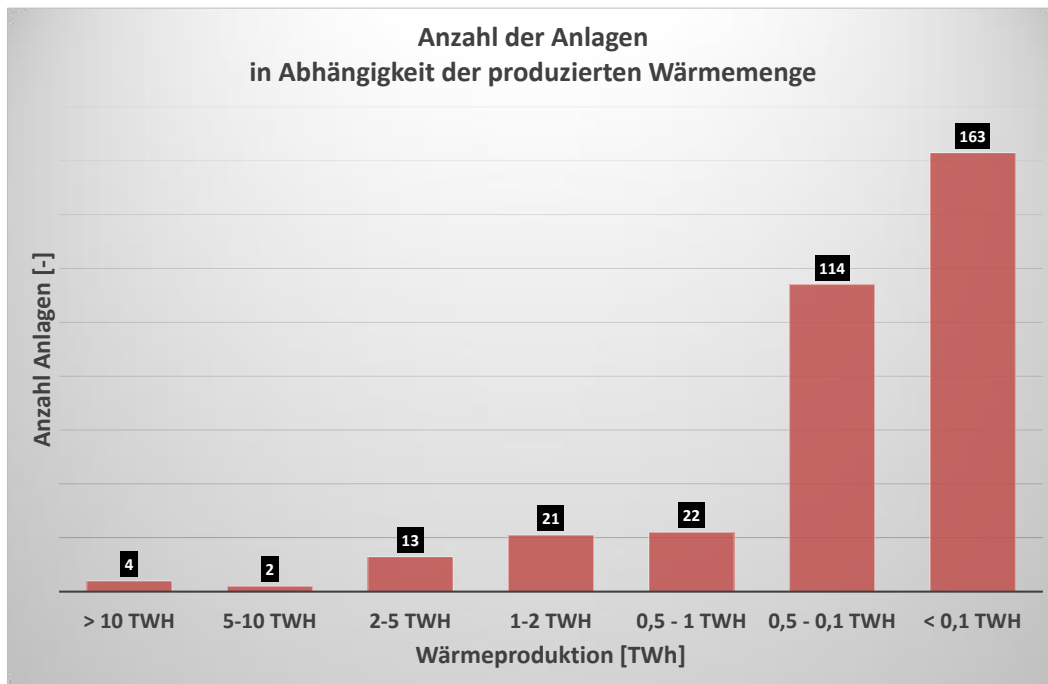


Abbildung 35: Anzahl der Anlagen in Abhängigkeit von der produzierten Wärmemenge (Anlagen mit einer Feuerungsleistung >20MW) Quelle: eigene Berechnungen

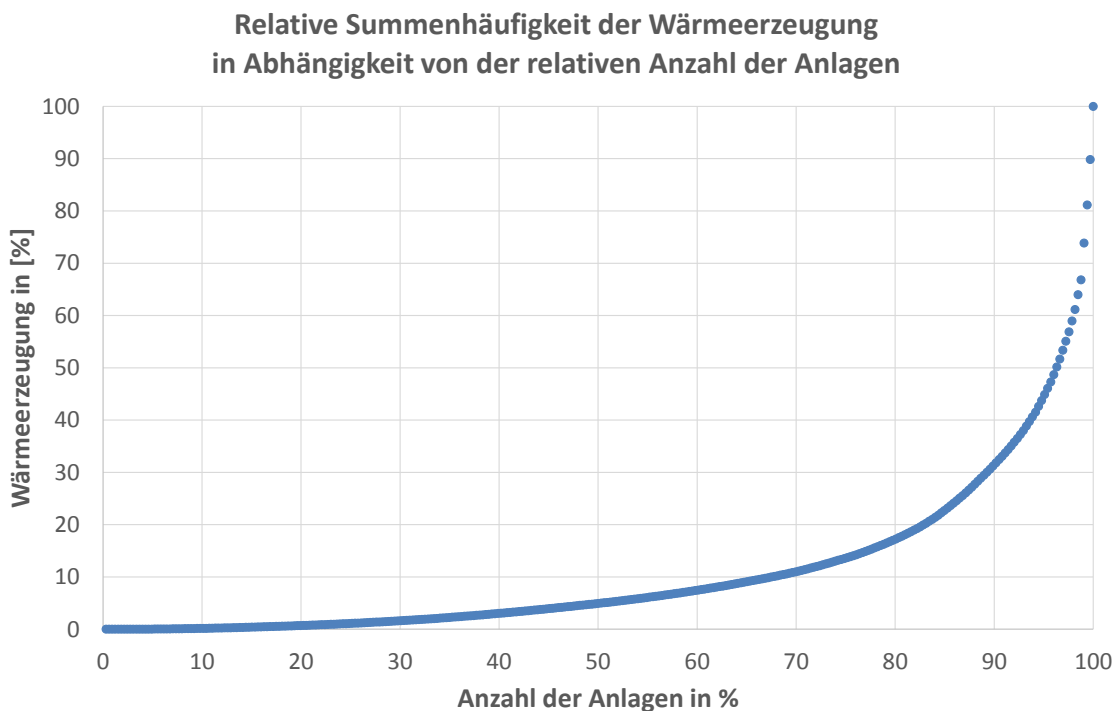


Abbildung 36: Relative Summenhäufigkeit der Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der relativen Anzahl der Anlagen mit einer Feuerungsleistung >20MW Quelle: eigene Berechnungen

### **3.4 Strombedarfe bei fluktuierender Einspeisung von EE-Strom**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollen der Einfluss und die Wirkung von Strom aus EE auf den Betrieb von KWK-Anlagen beleuchtet werden. Dafür werden zunächst die Entwicklung der Stromerzeugung in NRW, insbesondere des Zubaus an erneuerbaren Energieanlagen und das Management der Erzeugung erläutert. Hierbei wird zuerst die Ist-Situation analysiert und dann eine Prognose für die weitere Entwicklung der Technologieanteile beschrieben. Unter Einbeziehung der generellen Entwicklung in Deutschland wird ein Blick auf die Entwicklung der Residuallast geworfen, die einen wesentlichen Effekt auf die Strommarktpreise hat. Abschließend werden daraus Flexibilitätsoptionen für den Einsatz von KWK in NRW abgeleitet.

Aufgrund der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung, u. a. den Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung bis 2050 auf 80 % zu erhöhen und des beschlossenen Atomausstiegs, wird das Stromversorgungssystem in den kommenden Jahrzehnten einem strukturellen Wandel unterliegen. Die gesetzlich vorrangige Einspeisung aus Windkraft und Photovoltaik ist dabei dargebotsabhängig und volatil, was eine zukünftig flexiblere Betriebsweise konventioneller Kraftwerke zur Deckung der verbleibenden Last, Residuallast genannt, bedingt. Eine auf die Einspeisung von EE angepasste Betriebsweise von KWK-Anlagen bei konstanter Wärmebereitstellung soll unter wirtschaftlicher Beurteilung zu mehr Systemdienstleistung und einer Reduzierung von vorgehaltener Regenergie führen.

#### **3.4.1 Stromverbrauch und -Erzeugung in NRW und in Deutschland**

Das Bundesland NRW weist als Flächenland im Bundesvergleich die höchste Bevölkerungsdichte sowie eine der höchsten Dichten an Industrieunternehmen auf. Infolgedessen hat NRW im Bundesvergleich den größten Bedarf an Primärenergie sowie den größten Bedarf an Transformationsprozessen zur Endenergiebereitstellung. Im Jahr 2012 wurden in NRW rund 30 % des gesamten Stroms in Deutschland erzeugt und rund 40 % des Deutschen Industriestroms verbraucht [153]. Damit kommt dem Bundesland NRW eine zentrale Bedeutung für den Erfolg der Energiewende zu.

##### **3.4.1.1 Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung**

Wie aus Abbildung 37 ersichtlich ist, werden in NRW ungefähr 19 Mrd. kWh in KWK-Anlagen erzeugt, was einem Anteil von 10,6 % entspricht. Wird die zukünftige Entwicklung der KWK-Anlagen in Deutschland und NRW in Betracht gezogen, so lässt sich keine eindeutige Aussage treffen. Mehrere Gutachten prognostizieren mit einem Anteil von 16,8 % eine Stagnation an der Stromerzeugung [164].

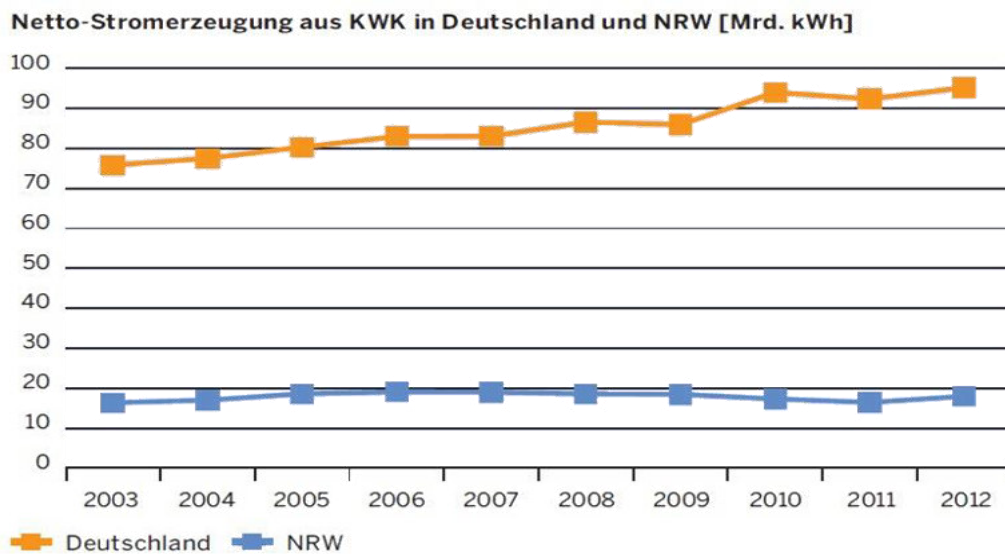


Abbildung 37: Netto-Stromerzeugung aus KWK in Deutschland und NRW [155]

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen haben hier eine wesentliche Lenkungswirkung. Unter anderem wird im Rahmen der Novellierung des KWK-G aktuell über eine Anpassung des bundesweiten KWK-Ausbauziels diskutiert (Bezugsgröße für 25 %-Ziel: Gesamt- oder nur thermische Erzeugung). Die Ausgestaltung des KWK-G wird einen maßgeblichen Einfluss auf den weiteren Ausbau haben. Die im neuen EEG 2014 festgesetzte Abgabe für eigenerzeugten Strom führte bereits zu einer Dämpfung des Ausbaus[156]. Dennoch konnten Ausbaupotenziale für die Bundesrepublik Deutschland von bis zu 170 TWh (betriebswirtschaftlich) bzw. 240 TWh (volkswirtschaftlich) ermittelt werden [231]. Die mögliche Nutzung des KWK-Potenzials hängt entscheidend von der Struktur der Stromerzeugung, der Entwicklung der Stromnachfrage sowie der Flexibilität der KWK-Anlagen aber auch des gesamten Stromsystems ab.

### 3.4.1.2 Anteil erneuerbarer Energiequellen

Bundesweit betrug der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2014 26,2 % [158]. Als neue Stromerzeugungstechnologie verzeichnen die Erneuerbaren Energien seit ihrem Aufkommen 1990 in NRW einen stetigen Anstieg bis zu einem Anteil von 10,3 % in 2014 [153]. Die Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen den Jahreszubau neu installierter Anlagen der Technologien Photovoltaik und Windenergie. "Zubau" bezeichnet solche Anlagen, die zum Bestand neu hinzugefügt werden. Hier werden nur Photovoltaik sowie Windenergie betrachtet, da sie im Wesentlichen die Erneuerbaren Energien darstellen. Die jeweils orangefarbene Kurve stellt den Jahreszubau der installierten Leistung von Windanlagen bzw. Photovoltaikanlagen in Deutschland dar.

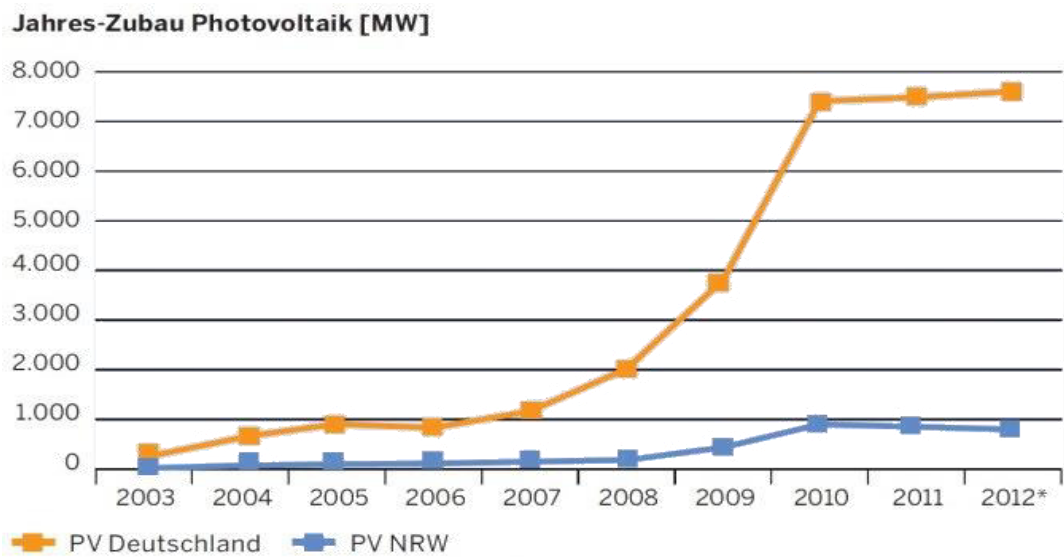


Abbildung 38: Jahreszubau Photovoltaik: NRW und BRD [155]

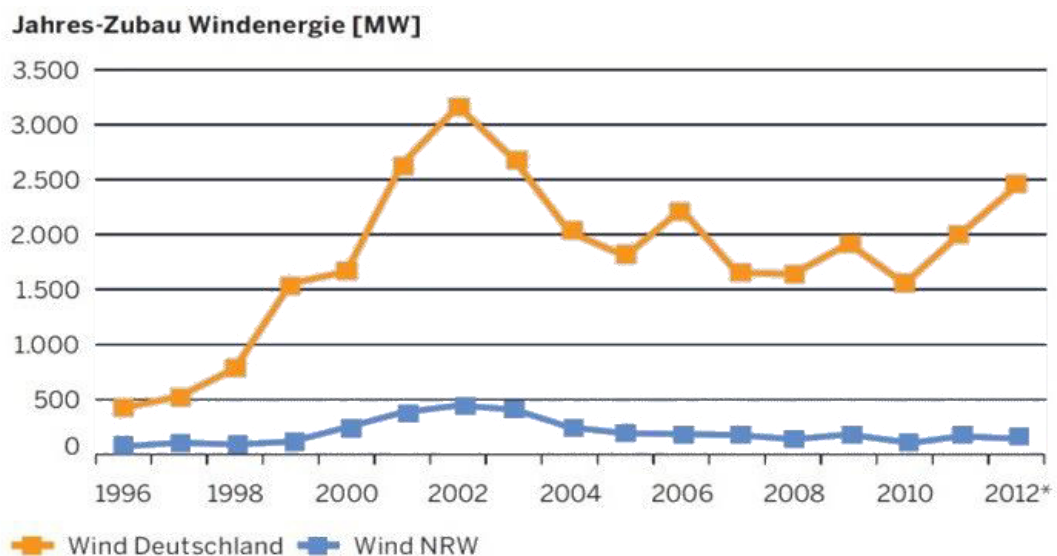


Abbildung 39: Jahreszubau Windenergie: NRW und BRD [155]

Der im Vergleich zur bundesweiten Entwicklung bisher geringe Ausbau der Erneuerbaren Energien in NRW ist u. a. durch den Strommix und dessen Auswirkung in Deutschland zu begründen. Durch den Ausstieg und damit Wegfall der Atomkraftwerke muss ein großer Anteil von konventionellen Kraftwerken, die Systemdienstleistungen erbringen, ersetzt werden. Ein gleichzeitiger Rückzug von Atomkraftwerken und Braunkohlekraftwerken hätte erhebliche Auswirkungen auf die Systemsicherheit. Ein Rückzug der Braunkohlekraftwerke ist zwar absehbar, muss aber im Einklang mit dem Ausscheiden der AKWs und der erfolgreichen Integration der Erneuerbaren Energien ablaufen. Ein bedeutender Rückzug der Braunkohlekraftwerke ist wohl erst nach dem endgültigen Ausstieg der AKWs zu erwarten.

Sowohl die Biomasse mit einem Anteil von 26 % als auch die Gruben-, Deponie- und Klärgase mit 10 % und Wasserkraft mit 4 % an der Stromerzeugung aus EE in NRW weisen konstante und stabile Werte bei der Einspeisung auf [153]. Aufgrund der heutigen Erzeugungsstruktur weist das Bundesland NRW damit die geringste Volatilität in Bezug auf die Stromeinspeisung in Deutschland auf. Eine Betrachtung der Volatilität auf ein Bundesland ist jedoch aus zwei Gründen wenig aufschlussreich. Einerseits ist ein Übertragungsnetzbetreiber für die Netzstabilität und Versorgungssicherheit für den Bereich seines Netzes verantwortlich. Im Fall von NRW ist der ÜNB Amprion, dessen Übertragungsnetz sich über die Landesgrenzen von NRW hinweg erstreckt, für die Gewährleistung zuständig. Andererseits ist entscheidend, auf welcher der vier Spannungsebenen eingespeist wird. In Bezug auf die Einspeisung von EE unterliegen insbesondere die Netzebenen der Nieder- und Mittelspannung kritischen Untersuchungen.

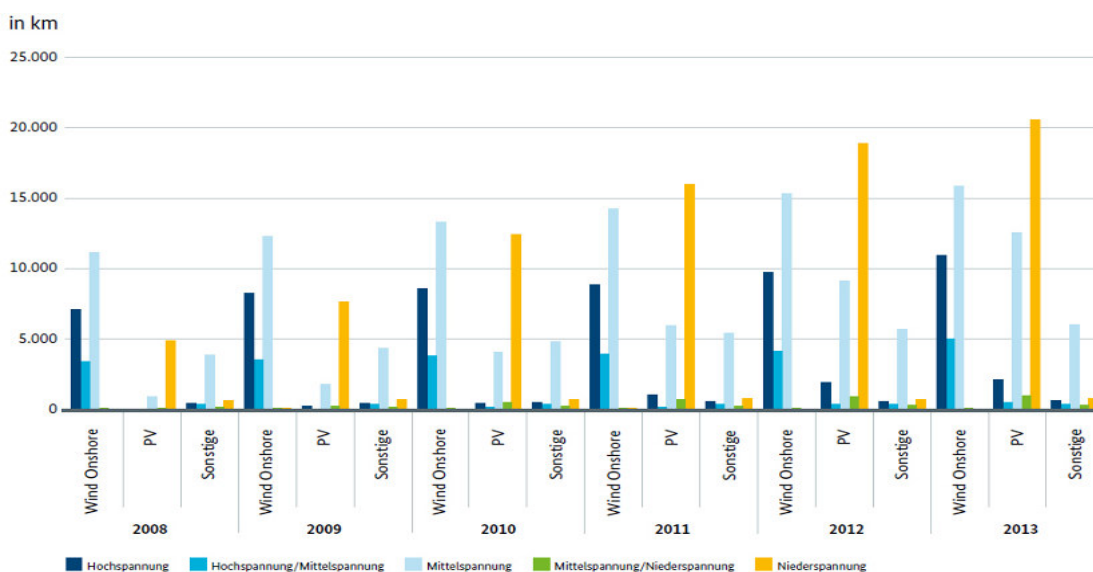


Abbildung 40: Verteilung der erneuerbaren Energien auf die Spannungsebenen, [159]

Aus? der Abbildung 40 ist die Verteilung der Erneuerbaren Energien auf die Spannungsebenen über die Jahre 2008 bis 2013 aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, dass PV im Jahr 2013 größtenteils in das Niederspannungsnetz aber ungefähr 40 % auch in das Mittelspannungsnetz einspeist. Bei Wind Onshore ist dagegen eine Konzentration auf die Mittelspannung bis zur Höchstspannung zu verzeichnen. Eine stark veränderte Einspeisung in das Niederspannungsnetz kann lokal ein verändertes Engpassmanagement erfordern. Im folgenden Kapitel werden u. a. die Entwicklung und der Ausbaukorridor von PV und Wind in NRW diskutiert.

### 3.4.2 Entwicklung der EE-Stromerzeugung in Deutschland und NRW

Mit der von der Bundesregierung beschlossenen Energiewende befindet sich die deutsche Energiebranche in einem nie zuvor gekannten Umbruch. In der Abbildung 41, die auf dem BMU Leitszenario aus dem Jahre 2009 basiert und eine konstante Stromnachfrage annimmt, sind der Verlauf und die Aufteilung der verschiedenen Erzeugungstechnologien für die prognostizierten Jahre 2020 bis 2050 zu sehen. Die braune Kurve bezeichnet die Summe aller



konventionell arbeitenden (Heiz-)Kraftwerke. Sie sinkt zunächst stetig und linear von 440 TWh im Jahr 2020 auf unter 100 TWh im Jahr 2050.

Da ungefähr 90 % der Stromerzeugung heutzutage in NRW durch fossile Energieträger gewonnen wird und im Jahre 2050 nur noch maximal 20 % der Stromerzeugung aus diesen Energieträgern stammen soll, kann angenommen werden, dass das Land NRW den stärksten Umbruch erfahren wird. Weiterhin wird NRW wahrscheinlich den Status von einem Nettostromexportland hin zu einem Nettostromimportland annehmen. Nichtsdestotrotz wird der Anteil der Erneuerbaren Energien auch steigen. Der Anteil der Erneuerbaren Energien wird aber den Anteil der konventionell arbeitenden Kraftwerke nicht vollkommen ersetzen.

Als realistisches Ziel hat die Landesregierung im neuen Koalitionsvertrag von 2012 festgelegt, dass bis zum Jahr 2025 30 % des jährlichen Strombedarfs durch Erneuerbare Energien abgedeckt werden sollen. Hierzu ist in drei Studien das Potenzial zur PV, zur Windenergie und zur Biomasse ermittelt worden. So könnte maximal für die PV eine Peak-Leistung von 84 GW installierter Leistung und ein jährlicher Stromertrag von 72 TWh realisiert werden. Der Nennleistungszuwachs betrug in den Jahren 2009 bis 2011 durchschnittlich 600 MWp, sodass auch weiterhin in NRW mit einem starken Anstieg zu rechnen ist [160]. Theoretisch ist eine Deckung bis zu 52 % aus PV denkbar. Bis zum Jahr 2020 sollen 15 % des Stromverbrauchs aus Windenergie erzeugt werden. Laut einem Leitszenario kann die Windenergie 71 TWh zur Stromerzeugung beitragen, bis zum Jahr 2025 sollen 28 TWh erzeugt werden.

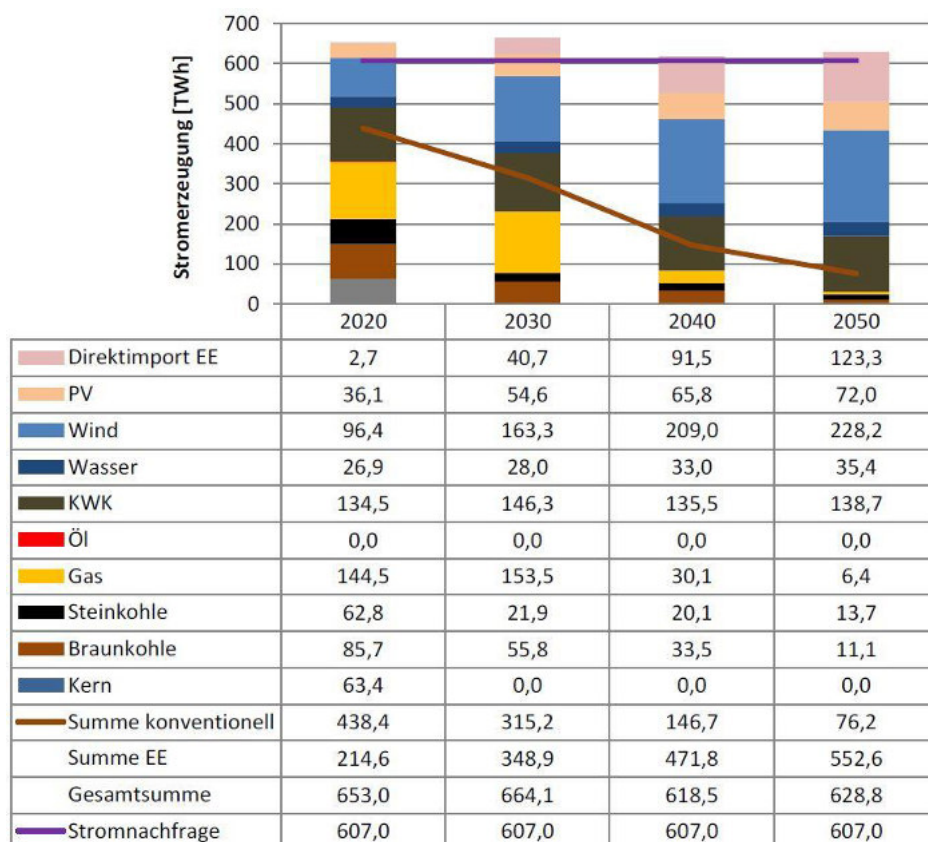


Abbildung 41: Entwicklung der Stromversorgung in Deutschland nach dem BMU-Leitszenario 2009, Quelle: [161].

Abbildung 42 zeigt die Verteilung der potenziell installierbaren Leistung und damit die Wahrscheinlichkeit des örtlichen Ausbaus von Windkraftanlagen. Aus der Grafik ist zu erkennen, dass die Windenergieanlagen größtenteils in Teilen NRWs installiert werden, die sich durch eine geringe Besiedlungsdichte auszeichnen. So ist eine Konzentration auf die Region Eifel/Niederrhein, das Sauerland und das Münsterland festzustellen.

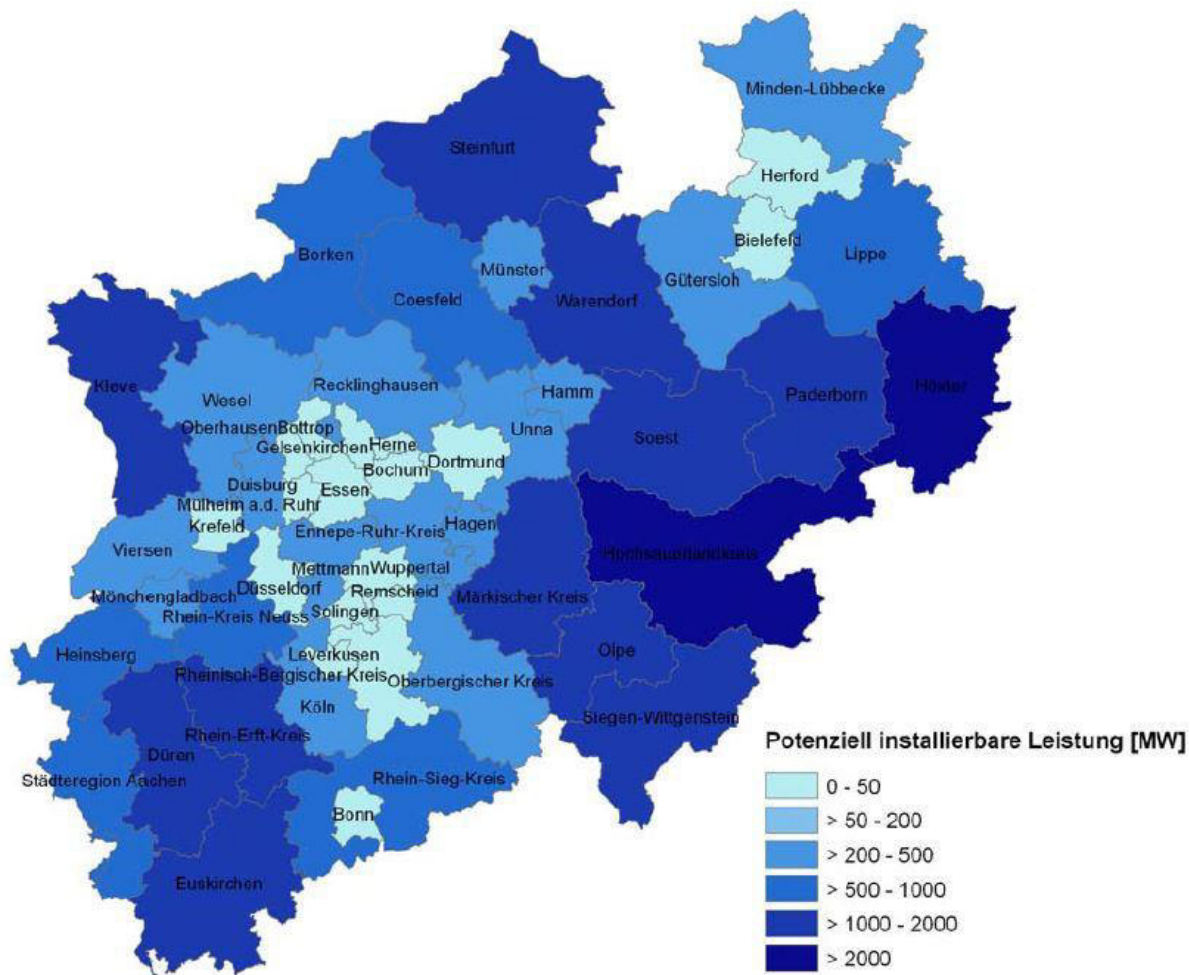


Abbildung 42: Verteilung der potenziell installierbaren Leistung von Windkraftanlagen in den Kreisen und kreisfreien Städten nach dem NRW-Leitszenario (3 MW-Anlagen, schalloptimierte Betriebsweise), nach [162]

Für die PV existiert keine Karte der installierbaren Leistung. Eine wahrscheinliche Installation und eine starke räumliche Verteilung lassen sich nach der Strahlungsintensität abschätzen. Abbildung 43 zeigt die räumliche Verteilung der solaren Einstrahlung in NRW. Demnach bietet die Region zwischen Aachen und Köln, dem heute größten Braunkohlerevier Deutschlands, das größte Potenzial mit 1.023 kWh/m<sup>2</sup>/a. Hierzu muss allerdings angemerkt werden, dass der Bereich nicht sonderlich groß ist, da das Minimum im Sauerland bei 944 kWh/m<sup>2</sup> liegt, sodass nicht zwangsläufig von einer stark ausgeprägten räumlichen Konzentration von PV-Anlagen zu rechnen ist.

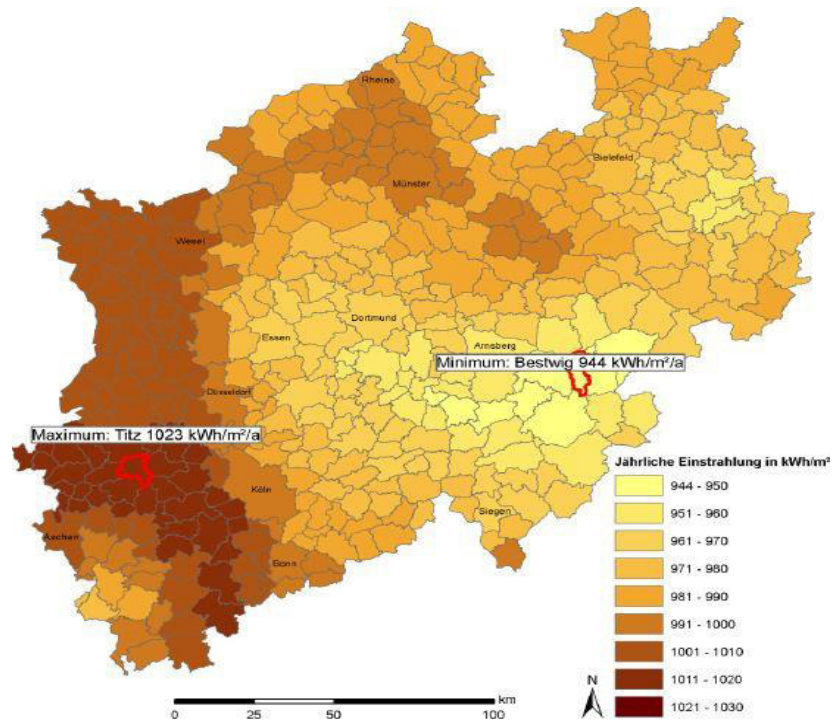


Abbildung 43: Durchschnittliche jährliche Einstrahlung auf eine horizontale Fläche [163]

Nach der Studie wird sich die Stromerzeugung durch Biomasse in einem Leitszenario von 4,65 TWh auf 8,35 TWh fast verdoppeln. Selbst im Szenario mit konservativen Annahmen kann ungefähr 1 TWh mehr erzeugt werden. Für die Biomasse ist verständlich, dass das größte Potenzial im Bereich der Landwirtschaft zu erwarten ist, sodass die Landkreise Steinfurt, Borken und Höxter in diesem Leitszenario mit über 400.000 MWh das größte Potenzial aufweisen, siehe Abbildung 44.

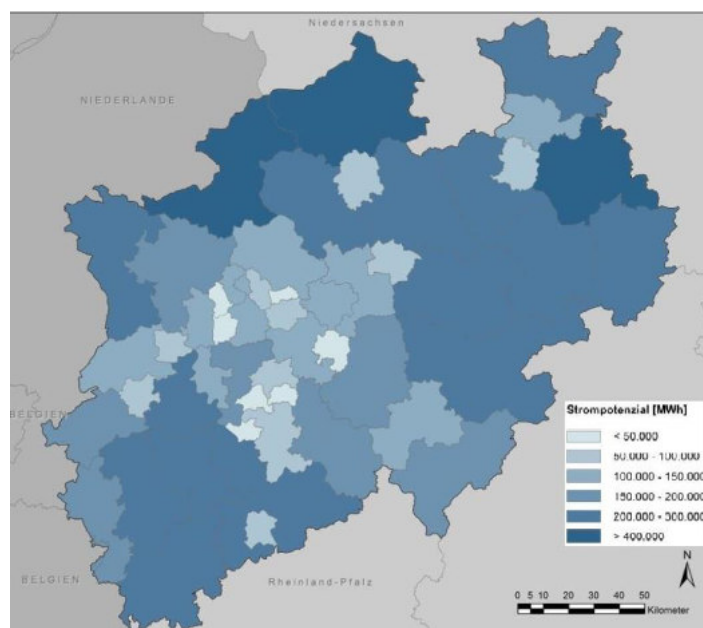


Abbildung 44: Gesamtpotenzial der Biomasse nach dem Leitszenario zur Stromerzeugung auf Kreiserebene, nach [164]

Werden alle drei Studien gegenübergestellt, so kann festgestellt werden, dass jede Erzeugungstechnologie in unterschiedlichen Regionen Potenzial aufweisen.

Dennoch kann es bei vermehrter Einspeisung von Erneuerbaren Energien lokal zu Netzengpässen kommen. Da der Windenergie, absolut gemessen, das größte Potenzial zukommt, ist ein Fokus auf die Kreise Höxter und Hochsauerlandkreis zu erwarten. Überlagerungseffekte durch gleichzeitige Einspeisung können nur in geringem Maße festgestellt werden. Darüber hinaus ist eine gewisse Komplementarität der Einspeisezeitpunkte von Windenergie und PV festzustellen [165].

### 3.4.3 Einfluss des EE-Stroms auf Strombedarfe und -Preise

Für die Abschätzung des resultierenden Strombedarfs bei fluktuierender Einspeisung ist ein Blick auf die momentane Residuallast notwendig. Abbildung 45 zeigt den Verlauf der Erzeugung aus Erneuerbaren Energien (grüne Fläche) und konventionellen Kraftwerken, also regelbaren Kraftwerken (lilafarbene Fläche) in Deutschland. Letztere Fläche kennzeichnet die Residuallast, zu deren Deckung stromgeführte, aber keine wärmegeführten Kraftwerke genutzt werden können.

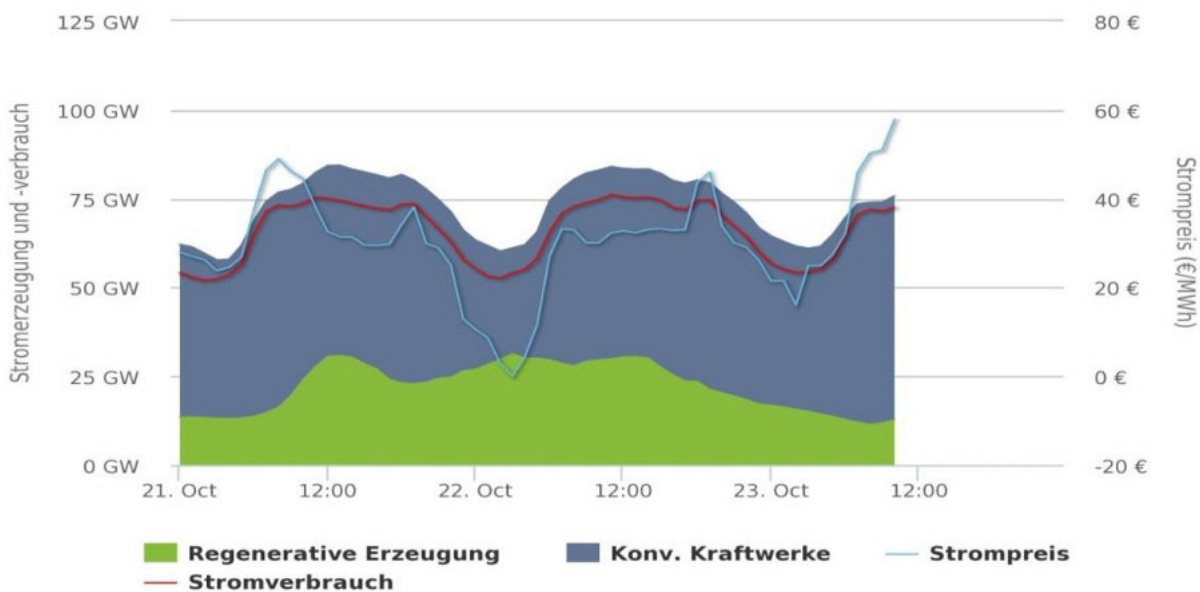


Abbildung 45: Realer 2-Tagesverlauf der Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland nach [166].

Darüber hinaus wird durch die rote Kurve der Stromverbrauch und durch die hellblaue Kurve der Strompreis angezeigt. Am 22. Oktober um 03:00 Uhr morgens betrug die Leistung aus EE 31,224 GW, wohingegen nur eine Last von 54,088 GW nachgefragt wurde, sodass sich eine Residuallast in Höhe von 22,864 GW ergibt. Tatsächlich wird aber zu dem Zeitpunkt eine Leistung von 29,9 GW (konventionell) erzeugt, sodass ein Stromüberschuss von 7,036 GW zustande kommt, der exportiert werden muss. Der Stromüberschuss, also ein Überangebot, bewirkt einen enormen Preisverfall, da der Strom aus Gründen der Systemstabilität exportiert werden muss. Die Situation verschärft sich hier besonders, da Erneuerbare Energien (Einspeisevorrang) teilweise unerwartet viel Strom einspeisen, während die Nachfragelast gering ist.

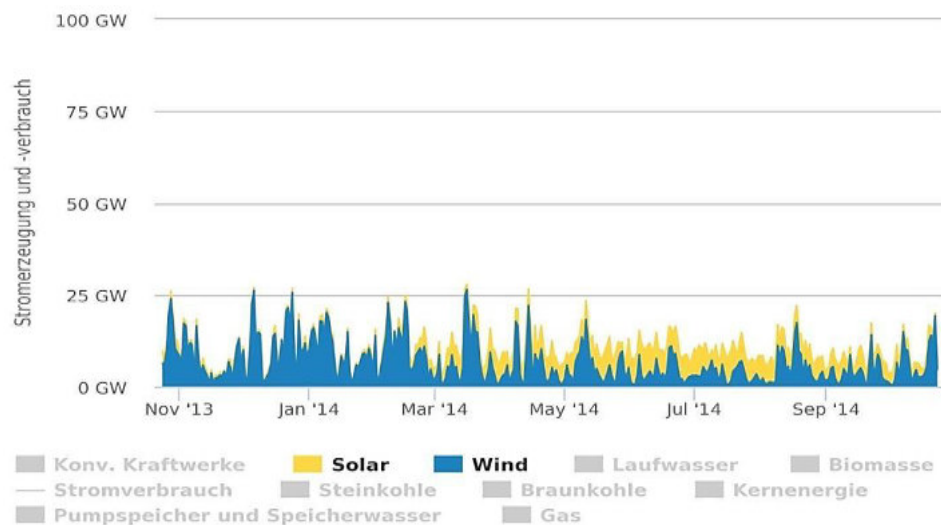


Abbildung 46: Realer Stromerzeugungsverlauf für Solarkraft und Windenergie in Deutschland 2013-14, [166]

In Anbetracht der Verhältnisse von NRW und Bund kann für Windenergie und PV festgestellt werden, dass in etwa das Verhältnis von Windenergie zu PV in NRW und Bund gleich ist. In NRW beträgt es 1,8 und bundesweit 1,9. Wie man in der

Abbildung 46 erkennen kann, zeigt die bundesweite Einspeisung einen sehr volatilen Verlauf. Die Grafik zeigt einen Peak-Wert der Windenergie in Deutschland am 16. März 2014 von 26,449 GW und 1,414 GW durch PV, sodass ein maximaler Wert von 27,863 GW erreicht wurde. Verglichen mit der installierten Leistung von 34,25 GW (Wind) entspricht dies einem Anteil von 77,22 %. Analog ergibt sich für PV bei einer installierten Leistung von 36,013 GW (PV) ein Prozentsatz von 3,9 %, sodass insgesamt an diesem Tag rund 40 % der installierten Leistung erreicht wird. Wird dieser Wert auf NRW übertragen, ergibt sich eine erreichte Leistung von 2.933 MW (bei 3.414,67 MW installierter Windenergie (davon 81,35 %), und 4.000 MW installierter PV (davon 3,9%).

### 3.4.3.1 Entwicklung der Residuallast

In der Vergangenheit ist es vermehrt zu Stilllegungen konventioneller Kraftwerke gekommen, da die Kraftwerksbetreiber durch sinkende Strombörsenpreise weniger Deckungsbeiträge erwirtschaften können. Eine zu große Anzahl an vom Stromnetz genommenen Kraftwerken kann die Versorgungssicherheit gefährden. Die steigende Einspeisung fluktuierender Energien wiederum führt zu einer veränderten Residuallast. Abbildung 47 zeigt die Verläufe einer Studie der Dena zur Integration Erneuerbarer Energien zu mehreren Zeitpunkten. Die Verläufe der Residuallast nehmen in Zukunft nicht nur ab, sondern werden auch negative Werte aufzeigen. Negative Werte treten auf, wenn die Leistung aus EE einen größeren Wert aufweist als die der konventionellen Kraftwerke. Im Jahre 2030 wird dies laut der Studie nur in wenigen Stunden der Fall sein. In weiterer Zukunft steigt aber auch dieser Wert. Dadurch ergibt sich ein erheblicher Rückgang der konventionell zu deckenden Grundlast, wohingegen nur ein begrenzter Rückgang der konventionell zu deckenden Höchstlast zu erwarten ist.

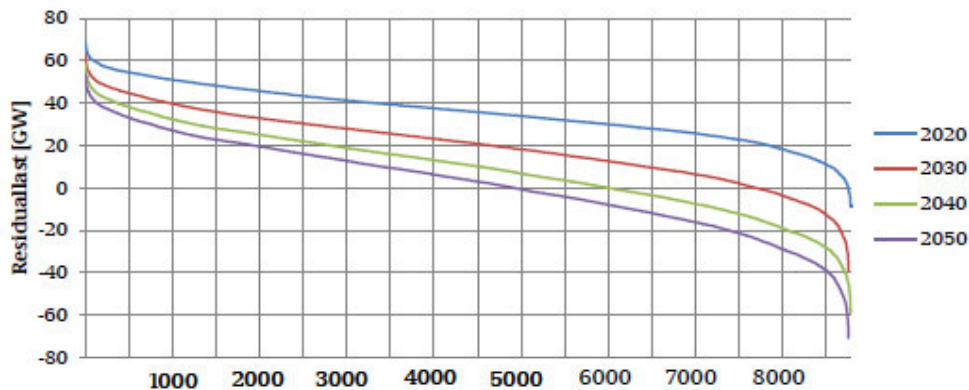


Abbildung 47: Verlauf der Residuallast 2020 bis 2050, [167]

### 3.4.3.2 Entwicklung der Strommarktpreise

Vor dem Hintergrund der Energiewende ist durch die zunehmende volatile Einspeisung der EE ein besseres Lastmanagement des Stroms vonnöten. Derzeit existieren keine Anreize für BHKWs, den erzeugten Strom zeitabhängig einzuspeisen, da die Vergütung zeitunabhängig mit dem Durchschnittspreis des Börsenpreises der letzten drei Monate vergütet wird („Üblicher Preis“). Um den Strom einer bald eintretenden alleinigen Direktvermarktung gewinnbringend zu verkaufen, besteht ein Flexibilisierungsbedarf der KWK-Anlagen in der Betriebsweise, die nur in der stromgeführten oder -orientierten Betriebsweise erreicht werden kann. Ein Ansatz hierzu stellen die negativen Spotmarktpreise dar. In Hinblick auf die zu erzielenden Spotmarktpreise besteht schon heute Bedarf, die Fahrweise anzupassen, da durch ein Überangebot an Strom vermehrt negative Spotmarktpreise auftreten. Das Überangebot kommt zustande, wenn die momentane Residuallast kleiner als die sogenannten Must-run Kapazitäten sind. Deutschlandweit ist die Häufigkeit von Null- oder negativen Preisen in der EEX-EPEX-Day-ahead-Auktion im Zeitraum von 2010 bis 2013 stark angestiegen. Für das Jahr 2013 sind ungefähr 65 Stunden mit einem negativen Preis registriert worden [168].

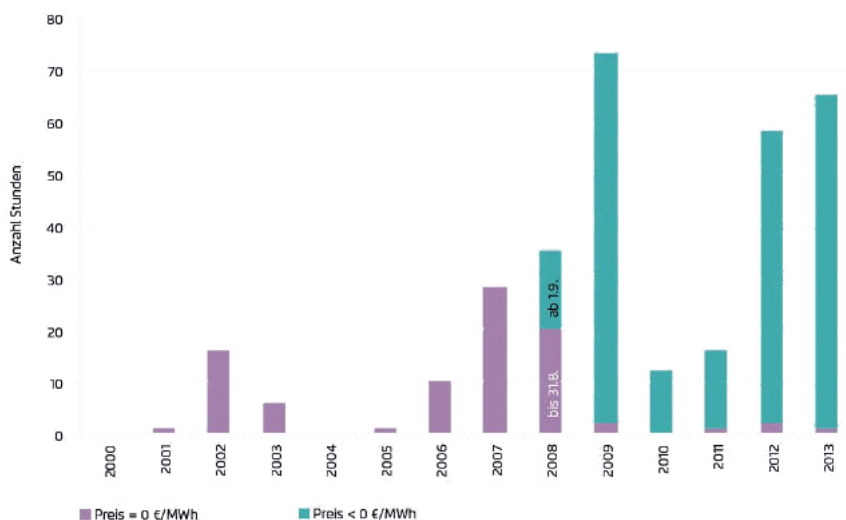


Abbildung 48: Häufigkeit von Null- oder negativen Preis in der EEX-/EPEX-Day-ahead-Auktion nach [168]

### 3.4.3.3 Flexibilitätsoptionen für KWK

Das theoretische Flexibilisierungspotenzial hängt von der installierten Leistung ab. In Kombination mit einem Speicher (Elektrizität, Wärme oder Gas bei Biogasanlagen) lässt sich eine Lastverschiebung erreichen. In diesem Zusammenhang wäre ein möglicher Untersuchungsgegenstand, welche der genannten Speicher wirtschaftlich sinnvoll sind. Der Einsatz eines Speichers kann durch eine dynamische Interaktion auf dem Spotmarkt und der Teilnahme am Regenergiemarkt zu einer höheren Wirtschaftlichkeit führen. Die Reaktion kann, je nach Ausmaß der dynamischen Rahmenbedingungen, bei einem BHKW z. B. ein Teillastbetrieb oder eine kurzzeitige Stilllegung sein. Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer KWK-Anlage sind Faktoren zu nennen, die sich förderlich auswirken: Einerseits ist eine hohe Wärmenachfrage von Vorteil, die durch geringe Kosten (Verwaltungs-, Speicher-, Isolationsverlustkosten) die Attraktivität steigert. Andererseits bringt eine hohe Bevölkerungsdichte den Vorteil, dass die Verteilkosten nur einen geringen Bestandteil der Gesamtkosten darstellen.

Die obigen Ausführungen zur zukünftigen Entwicklung zeigen an, dass sich die wirtschaftlichen Anreize in den kommenden Jahren für fast alle Kraftwerke eines Portfolios ändern werden. Durch einen vergrößerten Anteil der EE an der Stromerzeugung werden Kraftwerke mit hohen kurzfristigen Grenzkosten durch den Merit-Order-Effekt im Rahmen eines Marktes und nicht administrativ verdrängt. Darüber hinaus werden hohe Preisdifferenzen zwischen Knappheits- und Überschusszeiten zustande kommen. Für den Betrieb einer KWK-Anlage haben insbesondere die Ortskomponente und das dadurch resultierende Absatzpotenzial der Wärme einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Durch eine Fahrweise, die sich an den lokalen Bedingungen und am Vermarktungspotenzial der Großhandelspreise, insbesondere der Preise am Spotmarkt sowie der Teilnahme am Regenergiemarkt, ausrichtet, kann die Wirtschaftlichkeit bei Betrachtung der momentan gültigen Technologiestände einer KWK-Anlage gesteigert werden. Dahingegen ist aber zu erwähnen, dass die Bepreisung für Risiko in Form des Preisanteils als Risikoprämie „nicht perfekt“ [167], also verzerrt ist. Des Weiteren können sich Preise für Netzknappheiten nicht in einem ganz freien Markt bilden, da diese „netzknottenscharf“ existieren müssen („Locational Marginal Pricing“) und weiterhin keine anreizkonforme Netzregulierung existiert [167].





## 4 Förderlandschaft und Betriebsstrategien

*Um den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung zu stärken, bestehen unterschiedliche Förderinstrumente auf Bundes- und Landesebene. Die bundesweite Förderung beinhaltet das KWK-G, die Energiesteuerrückerstattung, die Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kWel sowie drei Förderbausteine für Unternehmen der KfW Bankengruppe. Das Land NRW fördert KWK im Rahmen des "Programms für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen" sowie durch drei Förderinstrumente der NRW.BANK für Unternehmen in Form von Investitionskrediten und zinsgünstigen Darlehen. Darüber hinaus bieten (Energieversorgungs-)Unternehmen und Stadtwerke in eigener Initiative Förderoptionen an.*

*Ein wesentlicher Anreiz zur Errichtung von KWK-Anlagen war in der Vergangenheit der Wegfall der EEG-Umlage bei Eigenstromerzeugung. Nach der Novellierung des EEG im Jahr 2014 ist aktuell jedoch ein bestimmter Anteil der EEG-Umlage pro verbrauchte Kilowattstunde zu zahlen. Positiv für den Betreiber ist nach wie vor die Einsparung der Stromsteuer und/oder Energiesteuer. Für Unternehmer besteht des Weiteren die Möglichkeit im Rahmen des Umsatzsteuergesetzes, die für die Anschaffung der Anlage und den Anlagenbetrieb gezahlte Mehrwertsteuer mittels Vorsteuerabzug erstattet zu bekommen. Weiterhin ist beim KWK-Betrieb die Einkommenssteuer zu beachten, welche sich auf die Gewinne bezieht, die durch den Gewerbebetrieb erzielt werden.*

*Der Betrieb von KWK-Anlagen kann grundlegend wärmegeführt, stromorientiert oder stromgeführt erfolgen. Innerhalb der stromorientierten Fahrweise wird des Weiteren zwischen dem eigenstromoptimierten und netzorientierten Betrieb sowie der Integration in Virtuelle Kraftwerke unterschieden. Die Wahl der geeigneten Fahrweise richtet sich nach einer Vielzahl von technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Aspekten. Im Hinblick auf eine qualitative Bewertung der Betriebsstrategien wurde eine Klassifizierung vorgenommen, welche vier Leistungsklassen für KWK-Anlagen unterscheidet. Weiterhin wurden die Leistungsklassen nach dem Prinzip der Zielausrichtung des jeweiligen Betreibers unterteilt. Darauf basierend wurden mögliche Varianten bezüglich der Fahrweisen und deren Relevanz bewertet. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine fundierte Aussage darüber, welche Fahrweisen für die jeweilige Leistungsklasse und Zielausrichtung besonders vielversprechend sind oder bereits erfolgreich angewendet werden.*

## 4.1 Förderlandschaft

Um den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und somit deren Anteil an der Gesamtstromerzeugung in Deutschland voranzutreiben, können diverse Fördermaßnahmen in Anspruch genommen werden. Diese können in bundesweite und landesspezifische Fördermaßnahmen aufgeteilt werden und reichen von verschiedenen zinsgünstigen Darlehen bis hin zu Investitionszuschüssen und Förderung der Stromerzeugung.

### 4.1.1 Fördermaßnahmen auf Bundesebene

Für die bundesweite Förderung sind mit dem Ziel der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung konkrete Gesetze erlassen worden. Darüber hinaus können bundesweit zinsgünstige Darlehen sowie Zuschüsse für Privatpersonen bei der KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) in Anspruch genommen werden.

#### 4.1.1.1 Förderungen nach dem KWK-G

In Bezug auf Fördermöglichkeiten für KWK-Anlagen ist an erster Stelle das “Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK-G) zu nennen. Ziel des Gesetzes ist es, nach § 1 “einen Beitrag zur Erhöhung der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland auf 25 % bis zum Jahr 2020 [...]“ zu leisten. Es soll Anreize zum Ausbau bzw. zur Modernisierung von KWK-Anlagen schaffen, da auf diese Weise sowohl die Energieeinsparung als auch direkt damit verbunden der Umweltschutz gefördert werden. Das KWK-G soll somit dazu beitragen, die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen. Zudem ist in § 1 des KWK-G definiert, dass ebenfalls “die Markteinführung der Brennstoffzelle und die Förderung des Neu- und Ausbaus von Wärme- und Kältenetzen sowie des Neu- und Ausbaus von Wärme- und Kältespeichern, in die Wärme oder Kälte aus KWK-Anlagen eingespeist wird [...]“ erklärte Ziele sind.

Um die Fördermöglichkeiten nach dem KWK-G zu beschreiben, muss zunächst der Begriff der KWK erläutert werden. Eine entsprechende Definition ist in § 3 Abs. 1 des KWK-G zu finden, nach der es sich bei KWK um “die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in elektrische Energie und Nutzwärme in einer ortsfesten technischen Anlage“ handelt. Diese Definition sagt folglich aus, dass nur die Stromproduktion nach dem KWK-G gefördert wird, bei der gleichzeitig Nutzwärme<sup>7</sup> erzeugt wird. Folglich lassen sich Anlagen, bei denen die Abwärme eines BHKW nachverstromt wird, klar von der KWK abgrenzen. Hierbei handelt es sich nicht um eine KWK-Anlage im Sinne des KWK-G (§ 3 Abs. 1 und Abs. 6), was bedeutet, dass der in diesem Fall produzierte Strom bei gleichzeitiger Nachverstromung der entstehenden Abwärme nicht gefördert wird. Gleiches gilt auch für stromgeführte KWK-Anlagen, wenn die erzeugte Nutzwärme weder genutzt noch gespeichert werden kann, was zum Einsatz eines Notkühlers führt. [156]

---

<sup>7</sup> Nutzwärme ist nach § 3 Abs. 6 KWK-G “aus einem KWK-Prozess ausgekoppelte Wärme, die [...] für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung, die Kälteerzeugung oder als Prozesswärme verwendet wird“.

Neben der gleichzeitigen Erzeugung von elektrischer Energie und Nutzwärme gibt es noch eine weitere Auflage, die für eine Förderung nach dem KWK-G für bestimmte Anlagengrößen erfüllt werden muss. So wird der in KWK-Anlagen erzeugte Strom nur dann gefördert, wenn die Anlage nach der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG (ABI. EU Nr. L 52 S.50) eine sogenannte hocheffiziente Anlage ist (§ 5 Abs. 2, § 3 Abs. 11, § 7 Abs. 4 KWK-G). Generell wird eine KWK-Anlage als hocheffizient betrachtet, wenn sie durch die KWK eine Primärenergieeinsparung im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme aufweist. KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung ab 1 MW müssen eine Primärenergieeinsparung im Vergleich zur getrennten Erzeugung von 10 % aufweisen, um nach der oben angesprochenen Richtlinie als hocheffizient zu gelten. KWK-Kleinanlagen (per Definition Richtlinie 2004/8/EG Artikel 3 Abs. n “Anlagen mit einer installierten Kapazität  $< 1 \text{ MW}_{\text{el}}$ “) müssen, um als hocheffizient zu gelten, lediglich eine Primärenergieeinsparung ( $> 0$ ) aufweisen, welche durch geeignete Unterlagen des Herstellers nachgewiesen werden kann [169]. Zudem werden nur solche KWK-Anlagen gefördert, die keine bereits bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängen (§ 5 Abs. 1 & 2).

Für eine Förderung nach dem KWK-G sind also folgende Kriterien zu prüfen:

- Handelt es sich um die gleichzeitige Erzeugung von elektrischer Leistung und Nutzwärme und somit um eine KWK-Anlage (keine Nutzung eines Notkühlers bzw. keine Nachverstromung der Nutzwärme)?
- Wird bei einer Anlage mit einer elektrischen Leistung  $\geq 1 \text{ MW}$  im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Nutzwärme mindestens 10 % Primärenergie eingespart (ist die Anlage hocheffizient)?
- Wird keine bereits bestehende Fernwärmeversorgung verdrängt?

Sind alle Kriterien erfüllt, werden nach § 7 Abs. 4 KWK-G mit der elektrischen Leistung der KWK-Anlage variierende Fördersätze pro erzeugte Kilowattstunde Strom gewährt, gleichgültig ob dieser selbst genutzt oder eingespeist wird. Die Anzahl der geförderten Vollbenutzungsstunden liegt bei 30.000. Betreiber von KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von weniger als 50 kW haben die Möglichkeit, eine Förderung über 10 Jahre zu erhalten. Besteht diese Wahlmöglichkeit, so muss je nach veranschlagten Vollbenutzungsstunden berechnet werden, ob eine Förderung über 10 Jahre oder 30.000 Vollbenutzungsstunden sinnvoller ist. Erreicht eine KWK-Anlage mit weniger als 50 kW<sub>el</sub> mehr als 3.000 Vollbenutzungsstunden im Jahr, so würde die Förderung für 30.000 Vollbenutzungsstunden nach weniger als 10 Jahren auslaufen. In diesem Fall wäre folglich die Wahl eines Förderzeitraums von 10 Jahren von Vorteil. Im Folgenden sind zur Übersicht alle Förderstufen aufgeführt.

Tabelle 17: Fördersätze für KWK-Anlagen nach § 7 Abs. 1 - 4

	KWK-Zuschlag [ct/kWh]	Geförderte Vollbenutzungs- stunden
Leistungsanteil bis 50 kW <sub>el</sub>	5,41	30.000 oder 10 Jahre
Leistungsanteil 50 – 250 kW <sub>el</sub>	4,00	30.000
Leistungsanteil 250 kW <sub>el</sub> – 2 MW <sub>el</sub>	2,4	30.000
Leistungsanteil über 2 MW <sub>el</sub>	1,8*	30.000

\* für Anlagen im Emissionshandel erhöht sich der Zuschlag um 0,3 Ct/kWh

Es werden für die ersten 50 kW<sub>el</sub>, für die nächsten 200 kW<sub>el</sub> etc. unterschiedliche Fördersätze gezahlt, die mit steigender Leistung abnehmen. Solch eine Variation ist darin begründet, dass gerade kleine KWK-Anlagen - bedingt durch hohe spezifische Investitionskosten - eine Förderung benötigen. Eine hocheffiziente KWK-Anlage mit einer elektrischen Nettoleistung von beispielsweise 2,1 MW und 5.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr würde nach dem KWK-G mit 272.525 EUR/a über sechs Jahre gefördert werden, was eine Gesamtfördersumme von 1.635.150 EUR ergibt. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass diese Zuschläge nur auf die Nettostrommenge gewährt werden (vom Hersteller angegebene Leistung der Stromerzeugungsanlage abzüglich des zum Betrieb der Stromerzeugungsanlage nötigen Eigenverbrauchs für Pumpen etc.).

Betreiber von sehr kleinen KWK-Anlagen (bis 2 kW<sub>el</sub>) können sich “[...] vorab eine pauschalierte Zahlung der Zuschläge für die Erzeugung von KWK-Strom für die Dauer von 30.000 Vollbenutzungsstunden auszahlen lassen. [...]“ (§ 7 Abs. 3 KWK-G).

Nach § 9 müssen die Übertragungsnetzbetreiber jährlich die KWK-G Strommengen und Vergütungen prognostizieren und einen vorläufigen KWK-G-Aufschlag berechnen. Dazu werden Prognosedaten der Netzbetreiber verwendet.

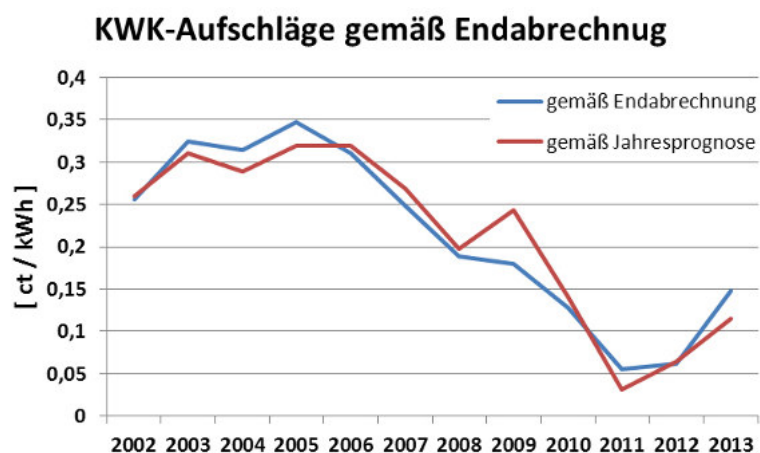


Abbildung 49: Entwicklung der KWK-Aufschläge [170]

Gezahlt wird die Vergütung letzten Endes durch den Endabnehmer anhand der KWK-Umlage, die einen Teil des Strompreises ausmacht. Je nach Stromverbrauch variiert die Höhe der KWK-Umlage für den Endabnehmer (Abnehmer mit hohem Verbrauch zahlen weniger). Für das Jahr 2015 liegt sie für Verbraucher der Letztverbrauchskategorie A (Jahresverbrauch bis 100.000 kWh je Abnahmestelle) bei 0,221 ct/kWh [153].

Die Höhe der insgesamt zur Verfügung gestellten Förderungen liegt nach § 7 Abs. 8 bei 750 Mio. EUR pro Kalenderjahr. Diese Fördermenge bezieht sich jedoch nicht nur auf KWK-Anlagen; es müssen ebenfalls die Zuschlagszahlungen für Wärme- und Kältenetze sowie Wärme- und Kältespeicher aus diesem Fördertopf bedient werden, wobei diese jeweils 150 Mio. EUR pro Kalenderjahr nicht überschreiten dürfen (§ 7a Abs. 5 und § 7b Abs. 4 KWK-G).

Neben der Förderung des erzeugten Stroms wird nach § 4 Abs. 3 für den eingespeisten KWK-Strom ein Entgelt gezahlt. Über die Höhe dieses Entgeltes können sich der KWK-Anlagenbetreiber und der Netzbetreiber entweder einigen oder der übliche Preis tritt in Kraft. Dieser entspricht für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu 2 MW dem durchschnittlichen Preis für Grundlaststrom an der Strombörse EEX im jeweils vorangegangenen Quartal. Des Weiteren wird dem Betreiber der KWK-Anlage für den eingespeisten Strom ein Entgelt für die vermiedene Netznutzung gezahlt, da die dezentrale Einspeisung und verbrauchsnahe Nutzung des Stroms übergeordnete Netzebenen entlastet. Somit besteht die stromspezifische Förderung nach dem KWK-G aus den drei Bausteinen Zuschlag je erzeugte kWh, Vergütung des eingespeisten Stroms nach dem üblichen Preis und Zahlung des Entgeltes für die vermiedene Netznutzung. [156]

Der Zuschlag für den Neu- und Ausbau von Wärme- und Kältenetzen richtet sich nach dem mittleren Nenndurchmesser der Leitungen. So werden nach § 7a Abs. 1 bei bis zu 100 mm mittlerem Nenndurchmesser 100 EUR pro laufenden Meter gezahlt. Es werden jedoch nur maximal 40 % der ansatzfähigen Investitionskosten, d. h. "alle Kosten, die für die erforderliche Leistung Dritter im Rahmen des Neu- oder Ausbaus von Wärmenetzen tatsächlich angefallen sind" (§ 7a Abs. 2), übernommen. Bei neu verlegten Leitungen mit einem mittleren Nenndurchmesser von mehr als 100 mm beschränkt sich die Übernahme der ansatzfähigen Investitionskosten auf 30 %. Zudem dürfen 10 Mio. EUR je Projekt nicht überschritten werden.

Für den Neu- und Ausbau von Wärme- und Kältespeichern richtet sich die Höhe der Zuschlagszahlungen nach § 7b Abs. 1 nach dem auf die Wärmekapazität bezogenen Wasseräquivalent des Speichervolumens. So werden Speicher mit 250 EUR/m<sup>3</sup> Wasseräquivalent gefördert. Bei mehr als 50 m<sup>3</sup> Wasseräquivalent ist die Fördermenge auf 30 % der Investitionskosten beschränkt. Je Projekt darf die Fördersumme nicht mehr als 5 Mio. EUR betragen.

In § 12 des KWK-G wird festgehalten, dass im Jahr 2014 eine "Zwischenüberprüfung über die Entwicklung der KWK-Stromerzeugung in Deutschland, insbesondere mit Blick auf die Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung und dieses Gesetzes [...]" durchgeführt wird [156]. Zudem ist in der EU-Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU festgeschrieben, dass alle Mitgliedsstaaten spätestens bis zum Ende des Jahres 2015 das Potenzial für den Einsatz der hocheffizienten KWK und der effizienten Fernwärme- und Fernkälteversorgung bewerten.

Eine dazu vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie beauftragten Potenzialanalyse und Evaluierung des KWK-G, die in einer Zusammenarbeit der Prognos AG, des Fraunhofer IFAM, der IREES GmbH und BHKW-Consult durchgeführt wurde, hat ergeben, dass unter

aktuellen Marktbedingungen (und der aktuellen Fördersituation) ein Anteil von 25 % KWK-Strom an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland unrealistisch sei. Derzeit liegt der KWK-Stromanteil bei 16,2 %, bei dem er voraussichtlich stagnieren werde. Zudem wird vorgeschlagen, dass die arbeitsseitige Förderung der KWK vom Prinzip her bestehen bleiben soll, da sie zu einer höheren Wirtschaftlichkeit der geförderten Anlagen führe und zum Neubau von KWK-Anlagen anreize. Für einen weiteren Anreiz des Neubaus und der Modernisierung von KWK-Anlagen in der allgemeinen Versorgung sollten die Fördersätze jedoch angehoben werden. Die Investitionszuschüsse für Wärme- und Kältenetze und -speicher sollten möglichst bestehen bleiben, da sie zielführend waren. Anzuheben sei unter Berücksichtigung eines gewünschten Anstieges der KWK-Strommenge der Deckel von 750 Mio. EUR, da zur Erreichung des Anteils von 25 % KWK-Strom an der Gesamtstromproduktion noch 50 TWh zusätzliche KWK-Stromerzeugung nötig seien, die über weitere, zu fördernde KWK-Anlagen erzeugt werden müssten. Zudem sei eine Förderung von Bestandsanlagen in der allgemeinen Versorgung unter den aktuellen und zukünftigen Marktbedingungen erforderlich [164].

Des Weiteren äußern sich weitere Verbände zur gesetzlich festgeschriebenen Zwischenüberprüfung des KWK-G. Allen voran fordert der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) eine schnelle Überarbeitung des KWK-G, sodass das novellierte Gesetz zum 01.01.2015 in Kraft treten kann. Wie auch in der oben angesprochenen Evaluierung des KWK-G wird zudem eine Integration der Bestandsanlagen, so lange sie gewisse Auflagen erfüllen, in die Fördersystematik vorgeschlagen. Diese sollten jedoch aus einem von den Neuanlagen getrennten Fördertopf und nur so lange bedient werden, bis ein neues Marktdesign, beispielsweise ein Kapazitätsmarkt, greift oder die Börsenstrompreise wieder steigen. Darüber hinaus ist nach dem BDEW die Förderhöhe anzupassen, da sie in Zeiten hoher Strombezugspreise festgelegt worden ist und somit auf Grund des fallenden Börsenstrompreises nicht mehr zeitgemäß sei. [172]

Im März 2015 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie der „Vorschlag für die Förderung der KWK - KWKG2015“ herausgegeben. Hier wurden Ziele für die Reform des KWK-G sowie Vorschläge für die Novellierung dargelegt. Allem voran soll erstmals das Ausbauziel der KWK angepasst werden. Die bisherige Zielgröße (25 % KWK-Anteil an der Nettostromerzeugung in Deutschland bis zum Jahr 2020) soll auf 25 % der Nettostromerzeugung aus thermischen Kraftwerken geändert werden, was das Ausbauziel deutlich verringert, da die Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien aus der Bezugsgröße herausgenommen wurde. Besonders zu beachten ist des Weiteren die Differenzierung der Förderung für Strom, der in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird und Strom, der zur Eigennutzung erzeugt wird. Um eine netzdienlichere Fahrweise anzuregen, soll eingespeister Strom in Zukunft deutlich höher vergütet werden. Wie in Tabelle 18 zu sehen ist, soll der Fördersatz für das Leistungsintervall bis 50 kW<sub>el</sub> um 2,59 ct/kWh<sub>el</sub> angehoben werden, jedoch wird die Dauer der Förderung auf 45.000 Vbh begrenzt. Dies würde bei einer KWK-Anlage mit einer Laufzeit von 8.000 Vbh/a fast zu einer Halbierung der Förderdauer führen. Für die folgenden Intervalle ist eine Steigerung der Vergütung um 1 ct/kWh<sub>el</sub> bei gleicher Förderdauer angedacht.

Tabelle 18: Fördersätze für eingespeisten Strom nach dem Vorschlag für die Förderung der KWK – KWK-G2015

Leistungsgröße der Anlage (unverändert)	Zuschlag für Einspeisung in das öffentliche Netz (ct/kWh)		Dauer der Förderung (Vollbenutzungsstunden = vbh)	
	ALT	NEU	ALT	NEU
bis 50 kW	5,41	8,0	10 Jahre	45.000 vbh
50 kW bis 250 kW	4,0	5	30.000 vbh	unverändert
250 kW bis 2 MW	2,4	3,4	30.000 vbh	unverändert
> 2 MW	1,8	2,8	30.000 vbh	unverändert
ETS-Anlagen (Ausgleich der Wärmebelastung)	Zzgl. 0,3	unverändert	30.000 vbh	unverändert

Die Zuschläge für den eigengenutzten Strom sollen hingegen für Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 50 kW vollständig gestrichen werden. Weiterhin wird vorgeschlagen, den Fördersatz für Anlagen kleiner 50 kW<sub>el</sub> von 5,41 ct/kWh um 1,41 ct/kWh<sub>el</sub> auf 4 ct/kWh<sub>el</sub> zu senken. Ausgenommen sind energieintensive Unternehmen. Diese Anpassung ist laut BMWi darin begründet, dass die Eigenstromerzeugung bei großen Anlagen derzeit hoch profitabel sei sowie viele Anlagen überfördert seien.

#### 4.1.1.2 Energiesteuererstattung nach dem Energiesteuergesetz

Neben der Förderung nach dem KWK-G ist es möglich, dass KWK-Anlagen von der Energiesteuer befreit werden bzw. diese zurückerstattet wird. Ohne weitere Voraussetzungen wird nach § 53 Abs. 1 eine Steuerentlastung für Energieerzeugnisse gewährt, die “zur Stromerzeugung in ortsfesten Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung von mehr als zwei Megawatt verwendet worden sind“. Diese Entlastung wird also für Stromerzeugungsanlagen > 2 MW<sub>el</sub> gewährt, vollkommen unabhängig davon, ob sie nach dem Prinzip der KWK arbeiten oder nicht. Dies gilt jedoch nur für den Anteil der Energieerzeugnisse, der für die Stromerzeugung anfällt. Festgehalten ist diese Vergünstigung im Energiesteuergesetz (EnergieStG). Für KWK-Anlagen im geringeren Leistungsbereich ist § 53a Abs. 1 relevant. Hier wird festgehalten, dass eine vollständige Erstattung der Energiesteuer für Energieerzeugnisse, die “zur gekoppelten Erzeugung von Kraft und Wärme in ortsfesten Anlagen verwendet worden sind [...]“ realisiert werden kann. Zur Gewährung dieser Steuererstattung müssen - wie bei der Förderung nach dem KWK-G - ebenfalls einige Auflagen erfüllt werden. Zunächst muss die zu entlastende Energiemenge bereits nach § 2 Abs. 1 Nr. 9 und 10, Abs. 3 Satz 1 oder Abs. 4a versteuert worden sein, was bedeutet, dass die Steuer erst gezahlt und dann zurückerstattet wird. Dieser Vorgang ist nötig, da viele Unternehmen Erdgas nicht nur zum Einsatz in KWK-Anlagen nutzen. So wird vom Hauptzollamt dann nur die Steuer des verbrauchten Erdgases, welches für einen KWK-Prozess genutzt wurde, zurückerstattet. Für andere Prozesse fällt die Energiesteuer in voller Höhe an. Zudem müssen die betrachteten KWK-Anlagen hocheffizient sein.

Wie auch beim KWK-G sind die Bedingungen für eine Hocheffizienz in der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG (ABI. EU Nr. L 52 S.50) festgelegt<sup>8</sup> ([169] § 53a Abs. 1). Des Weiteren wird im selben Paragraphen des Energiesteuergesetzes für eine Steuerentlastung ein Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % vorausgesetzt. Zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades ist der Quotient “der Summe der genutzten erzeugten mechanischen und thermischen Energie in einem Kalenderjahr und der Summe der zugeführten Energie aus Energieerzeugnissen in derselben Berichtszeitspanne“ zu bilden (§ 3 Abs. 3 EnergieStG). Abschließend werden nur solche KWK-Anlagen vollständig von der Energiesteuer befreit, die in der Abschreibung gemäß Absetzung für Abnutzung (AfA) erfasst sind. Somit gelten für die vollständige Energiesteuerrückerstattung von KWK-Anlagen folgende Bedingungen:

- Zu entlastende Energiemenge bereits ordnungsgemäß versteuert
- Anlage erfüllt Hocheffizienzkriterium
- Anlage weist Monats- oder Jahresnutzungsgrad  $\geq 70\%$  auf
- Anlage befindet sich in der Abschreibung gemäß AfA

Die vermiedene Energiesteuer liegt bei Erfüllung der oben aufgeführten Kriterien bei 0,55 ct/kWh, ist also im Vergleich mit den Fördersätzen nach dem KWK-G eher von untergeordneter Bedeutung. Nichts desto trotz kann auch schon ein auf den ersten Blick gering erscheinender Betrag die Wirtschaftlichkeit eines ganzen Projekts beeinflussen.

Neben der vollständigen Energiesteuerentlastung sind weitere Szenarien möglich. Eine KWK-Anlage, die per Definition nicht hocheffizient ist, sonst aber alle oben aufgeführten Kriterien erfüllt, wird zu ca. 80 % von der Energiesteuer entlastet. Die Energiesteuer wird in diesem Fall mit 0,108 ct/kWh berechnet (§ 53b Abs. 1 und 2 EnergieStG). Gleiches gilt für Anlagen nach Ablauf der Abschreibungsdauer (bei BHKW 10 Jahre). Weist eine KWK-Anlage lediglich einen Jahresnutzungsgrad von 60 % auf, gilt diese trotzdem als begünstigte Anlage (§ 3 Abs. 1 EnergieStG) und das eingesetzte Erdgas wird nur mit 0,138 ct/kWh versteuert. Für Unternehmen des produzierenden Gewerbes und der Land- und Forstwirtschaft gelten zudem andere Erstattungssätze [173].

Für die Anwendung gilt es folglich, jeden Einzelfall genau zu analysieren. Für die Erstattung der Energiesteuer ist das Hauptzollamt die Antragsstelle. [174]

#### **4.1.1.3 Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW<sub>el</sub>**

Basierend auf der “Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW<sub>el</sub>“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit werden Mini-KWK-Anlagen im Rahmen des “Mini-KWK-Impulsprogrammes“ gefördert. Dieses Förderprogramm wurde zum 01.01.2015 novelliert und um weitere Förderbausteine ergänzt.

---

<sup>8</sup> Dieses Kriterium gilt ebenfalls in der EU-Effizienzrichtlinie



Beim Mini-KWK-Impulsprogramm handelt es sich im Wesentlichen um einen einmaligen Investitionszuschuss für die Neuerrichtung von kleinen KWK-Anlagen mit weiteren Förderbausteinen für Anlagen, die eine hohe Brennstoffausnutzung sowie eine flexible Bereitstellung der gesicherten Leistung aufweisen, um auf die Stromeinspeisung aus den fluktuierenden Erneuerbaren Energien reagieren zu können. Neben der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung sollen durch die Förderung ebenfalls "Anreize für die Marktentwicklung gegeben werden". Im Rahmen der Novellierung wurden zwei weitere Förderelemente festgeschrieben. Der Einsatz von Brennwärmetauschern wird durch den Teil "Wärmeeffizienz" gefördert. Über dies werden durch den Teil "Stromeffizienz" Mini-KWK-Anlagen mit einer besonders hohen Stromausbeute (elektrischer Wirkungsgrad) gefördert.

Gefördert werden nur neue KWK-Anlagen, die in Bestandsbauten errichtet werden. Nach der Richtlinie handelt es sich bei Bestandsbauten um "Bauten, für die vor dem 01.01.2009 ein Bauantrag gestellt oder eine Bauanzeige erstattet wurde". Die zuständige Bewilligungsbehörde ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) [175]. Hier wird eine Liste mit förderfähigen Geräten gepflegt und ständig aktualisiert (Tabelle 19). Hersteller von KWK-Anlagen müssen ein Antrags- und Zertifizierungsverfahren für ihre Geräte durchlaufen, bevor ein förderfähiges Gerät in diese Liste aufgenommen wird. Neben der Basisförderung sind ebenfalls eventuelle Bonusförderungen aufgeführt. Anfang des Jahres 2015 waren insgesamt 73 verschiedene KWK-Anlagen in der Liste enthalten. [176]

Tabelle 19: Ausschnitt BAFA-Liste "Mini-KWK-Anlagen"

Bafa-Nummer	Angaben zur KWK-Anlage					Basisförderung Einzelmodul	Bonusförderung				Nebananforderungen			
	Hersteller	Typenbezeichnung	max. elektr. Leistung (kWel)	max. therm. Leistung (kWth)	Brennstoffart		Wärmeeffizienz		Stromeffizienz		Mindestspeichervolumen in Liter	integr. Stromzähler	integr. Steuerung- und Regelung	integr. Schnittstelle
							Abgaswärmetauscher zur Brennerwertnutzung		nur bei Brennstoffzelle					
							integriert	nachrüstbar	Bonus	Bonus				
23	Vaillant GmbH	ecoPower 4,7 VNC 138+5	4,7	12,3	Gas	2.870 €	-	nein	718 €	-	738	ja	ja	ja
671088640	Vaillant GmbH	ecoPower 20.0	20	42	Gas	3.500 €			875 €	-	1.600	ja	ja	ja

Ist die einzubauende KWK-Anlage nach der Liste der BAFA ein förderfähiges Gerät, so ist im Folgenden zu prüfen, ob eine Antragsberechtigung vorliegt. Antragsberechtigt für diesen Zuschuss sind:

- Privatpersonen
- Freiberuflich Tätige
- KMU (private gewerbliche Unternehmen sowie Energiedienstleistungsunternehmen)
- Unternehmen, an denen mehrheitlich Kommunen beteiligt sind und die der KMU-Definition entsprechen
- Kommunen, kommunale Gebietskörperschaften und kommunale Zweckverbände
- Gemeinnützige Investoren

Bei Antragsstellern, die den oben genannten Kriterien nicht entsprechen, muss im Einzelfall eine Überprüfung der Antragsberechtigung durchgeführt werden. Um für eine Förderung in Betracht gezogen zu werden, muss die KWK-Anlage in Deutschland errichtet werden und ist

für mindestens sieben Jahre „zweckentsprechend“ zu betreiben, d. h., die Anlage darf innerhalb dieser sieben Jahre nicht stillgelegt oder nur unter gewissen Auflagen veräußert werden. Explizit nicht gefördert werden Eigenbauanlagen, Prototypen und gebrauchte KWK-Anlagen oder Anlagen mit gebrauchten Anlagenteilen.

Im Vergleich zu den Anforderungen für eine Förderung nach dem KWK-G sind beim Mini-KWK-Impulsprogramm deutlich schärfere Auflagen zu erfüllen. Zu prüfen sind allem voran vier Hauptkriterien:

- Eine förderfähige strom- oder wärmegeführte KWK-Anlage darf erstens in ihrer elektrischen Leistung 20 kW nicht überschreiten,
- muss über einen Wartungsvertrag betreut werden,
- darf nicht in Gebieten mit einem Anschluss- und Benutzungsgebot für Fernwärme liegen und
- muss mit einem Zähler ausgestattet sein, der die Stromerzeugung im KWK-Prozess bestimmt.

Mit Hilfe von „sachkundigen und unabhängigen Dritten“ müssen mittels Prüfstands- und Referenzmessungen weitere Kriterien zur Genehmigung der Förderung überprüft werden. Zum einen ist die gültige TA-Luft einzuhalten. Darüber hinaus müssen die Anforderungen der EU-Richtlinie für Kleinanlagen in Bezug auf Hocheffizienz nicht nur eingehalten, sondern deutlich übertroffen werden. Hier wird vorausgesetzt:

- Anlagen < 10 kW<sub>el</sub>: Primärenergie (PE) -Einsparung mindestens 15 %
- Anlagen von 10 bis einschließlich 20 kW<sub>el</sub>: PE-Einsparung mindestens 20 %
- Alle Anlagen: Gesamtjahresnutzungsgrad mindestens 85 %

Hierfür sind die entsprechenden Systemgrenzen klar festgelegt. Bei Strom bildet die Einbindung in das Elektrizitätsnetz der allgemeinen Versorgung die Systemgrenze, bei Wärme die Einbindung in das Heizungssystem, wobei Wärmespeicher mit zur KWK-Anlage gehören.

Neben diesen anspruchsvollen Kriterien an die Effizienz solch einer Anlage werden noch zusätzliche Anforderungen gestellt. So muss ein Wärmespeicher mit einem „Speichervolumen von mindestens 60 Liter bezogen auf Wasser als Speichermedium pro kW thermischer Leistung“ vorhanden sein. Überschreiten die zu fördernden Mini-KWK-Anlagen eine thermische Leistung von 26,7 kW, so ist ein Speichervolumen von 1.600 Liter ausreichend. Ab einer elektrischen Leistung von 10 kW muss die KWK-Anlage auf Signale vom Strommarkt mit Hilfe einer Informations- und Kommunikationsanlage reagieren können. Sobald ein bestehender Kessel durch die KWK-Anlage ersetzt, ein neuer Heizungskessel eingebaut oder die Heizkreisverteilung bedingt durch die Installation der neuen KWK-Anlage erneuert wird, ist ein hydraulischer Abgleich des Systems durchzuführen, um die Verschwendung von Energie zu vermeiden. Wird der Heizkessel jedoch nicht erneuert, so kann auf den hydraulischen Abgleich verzichtet werden: der bestehende Kessel muss jedoch mindestens 12 Monate vor der neuen KWK-Anlage in Betrieb genommen worden sein. Des Weiteren dürfen bis zum 01.08.2015 nur Umwälzpumpen verwendet werden, deren Energieeffizienzindex gemäß Ökodesign-Richtlinie bei maximal 0,27 liegt. Ab dem 01.08.2015 ist nur noch ein Wert von maximal 0,23 zugelassen.

Für die Förderung nach dem Wärmeeffizienz-Teil sind ein serienmäßiger oder nachgerüsteter Abgaswärmetauscher zur Brennwertnutzung sowie die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs - auch wenn der Heizkessel bestehen bleibt - vorausgesetzt. Zudem müssen alle anderen Voraussetzungen ebenfalls erfüllt sein (die Basisförderung muss gewährt werden). Für den Stromeffizienz-Teil sind die in Tabelle 20 dargestellten elektrischen Wirkungsgrade zu erreichen, was in den meisten Fällen nur durch den Einsatz von Brennstoffzellen zu realisieren ist.

Tabelle 20: Notwendige el. Wirkungsgrade bei Nennleistung für Bonusförderung "Stromeffizienz"

Leistung Min. [kW <sub>el</sub> ]	Leistung Max. [kW <sub>el</sub> ]	η <sub>el</sub> bei Nennleistung
> 0	≤ 1	> 31 %
> 1	≤ 4	> 31 %
> 4	≤ 10	> 33 %
> 10	≤ 20	> 35 %

Sind für die Basisförderung alle Voraussetzungen erfüllt, können die unten aufgeführten Fördersätze, die mit steigender Leistung sinken, gewährt werden. [175], [177]

Tabelle 21: Förderung nach Mini-KWK-Impulsprogramm

Leistung <sub>min</sub> [kW <sub>el</sub> ]	Leistung <sub>max</sub> [kW <sub>el</sub> ]	Förderbetrag kumuliert über Leistungsstufen [EUR/kW <sub>el</sub> ]
0	≤ 1	1.900
> 1	≤ 4	300
> 4	≤ 10	100
> 10	≤ 20	10

Falls ein Wärmespeicher zwar vorhanden aber seit mehr als 10 Jahren in Betrieb ist, verringert sich der Anspruch auf die gesamte Fördersumme um 10 %. Bei modularen KWK-Anlagen wird für die Ermittlung des Förderbetrages die Gesamtleistung aller Anlagen, die auf einem Grundstück zusammenhängend betrieben werden, als Berechnungsgrundlage herangezogen. Sind alle Anforderungen für die Bonusförderung "Wärmeeffizienz" erfüllt, so wird die entsprechende KWK-Anlage zusätzlich mit einem weiteren Zuschuss in Höhe von 25 % der Basisförderung gefördert. Bei der Bonusförderung "Stromeffizienz" liegt diese Zusatzförderung sogar bei 60 % der Basisförderung. Zudem sind beide Bonusförderungen kumulierbar. Der zur Inbetriebnahme einer Anlage einzuhaltende Bewilligungszeitraum ist auf neun Monate begrenzt: Verlängerungen dieses Zeitraums sind nur in Einzelfällen möglich. [175]

#### **4.1.1.4 Förderungen der KfW für Unternehmen**

Um auch den Ausbau von größeren KWK-Anlagen zu fördern, gibt es eine Vielzahl von Programmen der KfW, die sich speziell auf Unternehmen beziehen. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um Zuschüsse. Es werden lediglich Darlehen zu besonders günstigen Konditionen in Aussicht gestellt. Im Folgenden sind die Förderprogramme der KfW, die KWK-Anlagen unmittelbar betreffen, zusammengestellt.

##### **KfW-Energieeffizienzprogramm**

Ziel des Energieeffizienzprogramms der Kreditanstalt für Wiederaufbau ist es, Maßnahmen zur Energieeffizienz von gewerblichen Unternehmen zu fördern. Auch dieses Förderprogramm bezieht sich auf Unternehmen, die unter die KMU-Definition der EU fallen. Kleine Unternehmen (KU) werden jedoch nochmals besonders gefördert. Wie beim NRW/EU.KWK-Investitionskredit, der im Folgenden beschrieben wird, handelt es sich um zinsgünstige Darlehen. Anders ist hingegen, dass neben in- auch ausländische Unternehmen Anträge stellen können. Im Allgemeinen bezieht sich das KfW-Energieeffizienzprogramm auf in- und ausländische Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft (produzierendes Gewerbe, Handwerk, Handel und sonstiges Dienstleistungsgewerbe). Diese Unternehmen müssen sich mehrheitlich in Privatbesitz befinden und einen Gruppenumsatz von mehr als 2 Mrd. EUR aufweisen. Neben Unternehmen sind auch freiberuflich Tätige und Contractoren für (Energie-) Dienstleistungen antragsberechtigt. Ein weiterer Unterschied zum NRW/EU.KWK-Investitionskredit ist, dass nicht nur ausländische Unternehmen antragsberechtigt sind, sondern auch Vorhaben im Ausland gefördert werden können. Diese Vorhaben müssen jedoch von deutschen Unternehmen, in Deutschland freiberuflich Tätigen, Tochtergesellschaften von deutschen Unternehmen mit Sitz im Ausland oder Joint Ventures mit maßgeblich deutscher Beteiligung durchgeführt werden. Wie bereits angesprochen, werden Investitionsmaßnahmen mit wesentlichen Energieeinspareffekten gefördert. Hierzu gehören insbesondere KWK-Anlagen. Wie auch beim NRW/EU.KWK-Investitionskredit lassen sich 100 % der förderfähigen Investitionskosten finanzieren. Der Höchstbetrag liegt bei 25 Mio. EUR pro Vorhaben. Bei besonderer Förderungswürdigkeit kann diese Grenze sogar überschritten werden. Laufzeiten von 5, 10 und 20 Tilgungsjahren mit entsprechend einem, zwei oder drei tilgungsfreien Jahren, um die Liquidität des Begünstigten nicht zu stark zu beeinflussen, sind möglich. Beträgt die Laufzeit des Darlehens 20 Jahre, so muss die technische und ökonomische Lebensdauer des zu fördernden Projekts mindestens 10 Jahre betragen. Die Zinssätze werden bei Projekten mit einer Laufzeit von bis zu 10 Jahren festgeschrieben und orientieren sich an der Entwicklung des Kapitalmarktes und der Bonität des Begünstigten [178], [179]. Sie variieren zum einen mit den Höhen der Kredite und zum anderen mit der Laufzeit und den tilgungsfreien Jahren. Bei einem Darlehen für ein großes Unternehmen mit einer Laufzeit von 5 Jahren bei einem tilgungsfreien Jahr und einer Zinsbindung von 5 Jahren sind je nach Höhe des Kredites Zinsen in Höhe von 1,25 bis 7,65 % p. a. möglich [180]. Zu tilgen ist das Darlehen der KfW in vierteljährlichen Raten [179].

## **KfW-IKU-Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung**

Das Programm IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung soll die Energieeffizienz der kommunalen Versorgungssysteme steigern. Es werden Investitionen in die Wärme- und Wasserversorgung sowie Abwasserentsorgung gefördert. So können “Unternehmen mit mehrheitlich kommunalem Gesellschafterhintergrund und Unternehmen mit einem Gruppenumsatz von höchstens 500 Mio. EUR im Rahmen von Öffentlich-Privaten Partnerschaften“ zinsgünstige Darlehen erhalten. Für die roadmap | KWK.NRW relevante Förderprojekte sind

- Neubau und Erweiterung von hocheffizienten wärmegeführten Anlagen zur Versorgung mit Wärme aus KWK auf Basis von Erd-/ Biogas und von Anlagen zur Nutzung industrieller Abwärme zur Wärmeversorgung im Quartier einschließlich Neu- und Ausbau von dezentralen Wärmespeichern sowie
- Neu- und Ausbau des Wärmenetzes zur Wärmeversorgung im Quartier.

Es werden, wie auch bei den anderen Förderprogrammen, bis zu 100 % der förderfähigen Investitionskosten finanziert, wobei der Höchstbetrag bei 50 Mio. EUR pro Vorhaben liegt. Mögliche Kreditlaufzeiten sind 10 (1 bis 2 tilgungsfreie Jahre) bis 30 Jahre (1 bis 5 tilgungsfreie Jahre). Die Tilgung findet durch vierteljährliche Raten statt. Der Zinssatz, welcher sich nach der Bonität des Kreditnehmers und der Werthaltigkeit der gestellten Sicherheiten richtet, wird für 10 Jahre festgeschrieben. [181], [182]

## **KfW-IKU – Kommunale Energieversorgung**

Mit diesem Programm der KfW soll die Energieeffizienz kommunaler Energieversorgung durch konventionelle Energieträger nachhaltig verbessert werden. Aus diesem Grund werden Investitionen in die Bereiche Stromerzeugung, Verteilnetzausbau und Stromspeicherung gefördert. Antragsberechtigt sind Unternehmen mit mehrheitlich kommunalem Gesellschafterhintergrund sowie Unternehmen im Rahmen von Öffentlich-Privaten Partnerschaften mit einem Gruppenumsatz von höchstens 500 Mio. EUR. Gefördert wird unter dem Programmpunkt “Stromerzeugung“ u. a. die flexiblere Stromerzeugung durch KWK. Im Detail sind hier Neubau und Aufrüstung zu KWK Anlagen, die mit Erdgas betrieben werden, gemeint. Bei einem Ausbau muss die zusätzlich installierte elektrische Leistung mindestens 10 % über der Leistung der wärmegeführten Vergleichsanlage (folglich der Bestandsanlage, die ausgebaut wird) liegen. Unter “Ausbau der Verteilnetze zur Einbindung dezentraler Stromerzeuger“ fällt die Einbindung dezentraler Stromerzeuger in die Energie-Verteilnetze (zur Aufnahme des Stroms aus neuen Windkraft- oder KWK-Anlagen). Zudem wird der Neu- und Ausbau von Stromspeichern gefördert. Bis zu 100 % der förderfähigen Investitionskosten werden finanziert, wobei der Kredithöchstbetrag auf 50 Mio. EUR pro Vorhaben begrenzt ist. Die weiteren Konditionen sind wie beim beschriebenen KfW-Programm zur Quartiersversorgung. [183], [184]

## 4.1.2 Fördermaßnahmen des Landes Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen gibt es neben einem Programm, welches Zuschüsse sowohl für Privatpersonen als auch für Unternehmen gewährt, ebenfalls Möglichkeiten für zinsgünstige Darlehen bei der zuständigen NRW.Bank. Zudem stellen die verschiedenen Energieversorgungsunternehmen (EVUs) in Nordrhein-Westfalen Fördermöglichkeiten in Form von Zuschüssen für KWK-Anlagen in Aussicht. Eine Übersicht der wichtigsten Förderprogramme erfolgt im nächsten Abschnitt.

### 4.1.2.1 Förderung nach dem progres.nrw – Programm - Übersicht

Das “Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen (progres.nrw)“, welches durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen ins Leben gerufen wurde, beinhaltet alle förderpolitischen Aktivitäten in Bezug auf Energiepolitik speziell für das Land NRW. Ziel des Förderprogrammes ist es, einen Beitrag zum Klimaschutz und zu der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission zu leisten. Durch diverse Förderangebote ist das progres.nrw für Unternehmen, Verbraucher und Kommunen von besonderer Bedeutung. Eine ständige Aktualisierung dieses Förderprogrammes ermöglicht es, beispielsweise auf geänderte politische Rahmenbedingungen flexibel zu reagieren [185]. Das Programm ist in verschiedene Förderbausteine aufgeteilt:

- Innovation (fördert Innovationsvorhaben)
- Markteinführung entwickelter Techniken (fördert Verbraucher und Unternehmen bei der Einführung marktfähiger Produkte)
- Energiekonzepte - European Energy Award (Managementsystem für Kommunen, die Energiekonzepte entwickeln - Zertifizierung umgesetzter Energiesparmaßnahmen)
- Energieberatung (Beratung für Unternehmen, Kommunen, Verbraucher)
- Kraft-Wärme-Kopplung (Förderung der KWK)
- Wärme- und Kältenetze [185] [186]

Für das Projekt roadmap | KWK.NRW sind insbesondere die Förderbausteine “Markteinführung entwickelter Techniken“, “Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)“ und “Wärme- und Kältenetze“ von besonderer Bedeutung und sollen im Folgenden erläutert werden.

#### **progres.nrw - Programmbereich Markteinführung (Privatpersonen):**

Mit dem Markteinführungsprogramm soll die Markteinführung der anwendbaren Techniken zur Nutzung unerschöpflicher Energiequellen und rationellen Energieverwendung beschleunigt werden. Die verschiedenen Techniken sollen in einem ausgewogenen Verhältnis angewendet werden. Generell handelt es sich bei den Antragsberechtigten um Privatpersonen, freiberuflich Tätige sowie Unternehmen mit Sitz in Nordrhein-Westfalen, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen ([187] Anhang I Artikel 2).

Im Programmbereich Markteinführung werden jedoch bezogen auf die Förderung von KWK-Anlagen nur Privatpersonen und freiberuflich Tätige (also keine Unternehmen) berücksichtigt. Für Unternehmen ist der oben angesprochene Programmbereich KWK relevant. Bei der

Förderung handelt es sich um einen Investitionszuschuss für “Ausgaben für die Errichtung von Maßnahmen und Anlagen“, die zur Erreichung der oben genannten Ziele des progres.nrw beitragen. So werden neben vielen anderen Anlagen wie beispielsweise Wasserkraftanlagen und thermische Solaranlagen nach Punkt 2.8 “Hocheffiziente<sup>9</sup> dezentrale KWK-Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung bis 20 kW<sub>el</sub>“ gefördert. Somit handelt es sich um einen Investitionszuschuss für Privatpersonen und freiberuflich Tätige, die eine hocheffiziente KWK-Anlage mit einer elektrischen Leistung bis einschließlich 20 kW<sub>el</sub> errichten wollen. Diese werden je nach Leistungsgröße mit den dargestellten einmaligen Zuschüssen gefördert.

Tabelle 22: Förderung nach progres.nrw Programmbereich Markteinführung

Anlagengröße	Förderhöhe
≤ 1 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 1.425 EUR
≤ 4 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 1.425 EUR + 285 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 10 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 2.280 EUR + 95 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 20 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 2.850 EUR + 47,50 EUR/kW <sub>el</sub>

So würde beispielsweise ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 20 kW, welches alle oben genannten Anforderungen erfüllt, mit einem einmaligen Betrag von 3.325 EUR gefördert werden. Nicht antragsberechtigt sind Vorhaben, mit denen bereits vor der Erteilung des Zuwendungsbescheids der Bewilligungsbehörde begonnen wurde sowie Reparaturen, Ersatzmaßnahmen, Ersatzteilbeschaffungen oder gesetzlich vorgeschriebene bzw. behördlich angeordnete Maßnahmen. Förderungen aus dem Markteinführungsprogramm nach dem progres.nrw sind mit anderen staatlichen Förderungen kumulierbar, solange sie nicht aus anderen Förderprogrammen des Landes Nordrhein-Westfalen stammen. Zudem müssen die festgeschriebenen Förderhöchstgrenzen berücksichtigt werden.

Nach dieser Richtlinie können des Weiteren sogenannte “besondere Anlagen und Systeme mit außerordentlichem Innovationsgrad bzw. Multiplikatorwirkung“ mit 40 % der Investitionskosten gefördert werden. Bei solchen Anlagen handelt es sich unter anderem um Brennstoffzellenheizgeräte.

Anträge lassen sich nur vom 04. Februar bis zum 05. November des jeweiligen Kalenderjahres bei der zuständigen Bewilligungsbehörde (Bezirksregierung Arnsberg) stellen. Am 31.12.2015 tritt diese Richtlinie außer Kraft. [188]

<sup>9</sup> Hocheffizienzkriterium nach Anhang III Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlamentes 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 [169]

**progres.nrw - Programmbereich KWK (Unternehmen):**

Ein weiterer wichtiger Förderbaustein des progres.nrw ist die KWK-Förderung für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die ihren Sitz bzw. ihre Betriebsstätte in NRW haben. Es ist vergleichbar mit dem oben beschriebenen Markteinführungsprogramm, nur dass es sich anstelle von Privatpersonen auf Unternehmen bezieht und Anlagen höherer Leistungsklassen berücksichtigt. Um als Begünstigter in Betracht gezogen zu werden, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Ein Unternehmen muss unter die bereits angesprochene Definition "KMU" fallen [187]. Andere Unternehmen müssen für eine mögliche Förderung einen Anreizeffekt nachweisen. Zudem muss das zu fördernde Projekt in NRW durchgeführt werden und darf nicht vor Erteilung des Zuwendungsbescheids begonnen werden. Ein KWK-Projekt, welches bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängt, wird nicht gefördert. Im Rahmen des progres.nrw werden darüber hinaus nur fabrikneue Investitionsgüter gefördert, die im Eigentum des Zuwendungsempfängers verbleiben und zweckentsprechend genutzt werden. Zudem darf es sich bei dem zu fördernden Vorhaben nicht um Reparaturen, Ersatzteilbeschaffungen oder um gesetzlich vorgeschriebene bzw. behördlich angeordnete Maßnahmen handeln. Abschließend sind alle erforderlichen öffentlich-rechtlichen Genehmigungen mit der Antragsstellung einzureichen und müssen vor Erlass des Zuwendungsbescheides vorliegen.

Gegenstand der Förderungen sind KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> und "KWK-bezogene Maßnahmen, die zu einer verbesserten Energieausnutzung führen und deren zuwendungsfähiges Investitionsvolumen 50.000 EUR nicht übersteigt". Im Einzelnen handelt es sich nach Definition der NRW.BANK hierbei um:

- Die Errichtung hocheffizienter dezentraler KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub>
- Die Errichtung stromgeführter KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub>, die über eine Informations- und Kommunikationstechnik verfügen, um Signale des Strommarktes zu empfangen und technisch in der Lage sind, automatisiert darauf zu reagieren; stromgeführte KWK-Anlagen mit mehr als 3 kW elektrischer Leistung müssen über einen Wärmespeicher verfügen (mindestens 0,3 m<sup>3</sup> Wasseräquivalent pro kW installierter elektrischer Leistung)
- Die Verbesserung vorhandener dezentraler KWK-Anlagen und die Nachrüstung vorhandener Anlagen der ungekoppelten Strom- oder Wärmeerzeugung jeweils bis 50 kW<sub>el</sub> zu hocheffizienten KWK-Anlagen
- KWK-bezogene Maßnahmen: Wärmeübergabestationen, Hausanschlüsse, Sorptionskälteanlagen
- Demonstrationsvorhaben neuartiger KWK-Anlagen
- Besondere Anlagen, Systeme und Einrichtungen von KWK-Anlagen mit erhöhtem Innovationsgrad oder außerordentlichem Multiplikatoreffekt
- Umweltstudien auf Basis der Landesstudie "Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in Nordrhein-Westfalen" [1]



Die Errichtung hocheffizienter dezentraler KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> und die Errichtung stromgeführter KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> (siehe oben) können mit den unten aufgeführten Zuschüssen gefördert werden:

Tabelle 23: Förderungen nach progres.nrw Programmbereich KWK

Anlagengröße	Förderhöhe
≤ 1 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 1.425 EUR
≤ 4 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 1.425 EUR + 285 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 10 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 2.280 EUR + 95 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 20 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 2.850 EUR + 47,50 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 30 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 6.650 EUR + 475 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 40 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 11.400 EUR + 285 EUR/kW <sub>el</sub>
≤ 50 kW <sub>el</sub>	Sockelbetrag 14.250 EUR + 190 EUR/kW <sub>el</sub>

Abbildung 50 zeigt die Fördersumme mit steigender elektrischer Leistung für die Programmbereiche Markteinführung (blaue Markierung bis 20 kW<sub>el</sub>) und KWK (rote Markierung bis 50 kW<sub>el</sub>). Wie zu sehen ist, sind die Fördersummen der Programme gleich. Privatpersonen erhalten folglich die gleiche Förderung wie Unternehmen, jedoch werden im Programmteil KWK Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> gefördert. Des Weiteren ist bei 20 kW<sub>el</sub> ein Sprung in der Förderhöhe zu sehen. Diese Entwicklung ist darin begründet, dass das oben angesprochene Mini-KWK-Impulsprogramm nur Anlagen bis zu dieser Leistung fördert. Um Anreize für die Errichtung von KWK-Anlagen mit mehr als 20 kW<sub>el</sub> zu schaffen, wurde die Förderhöhe angepasst.

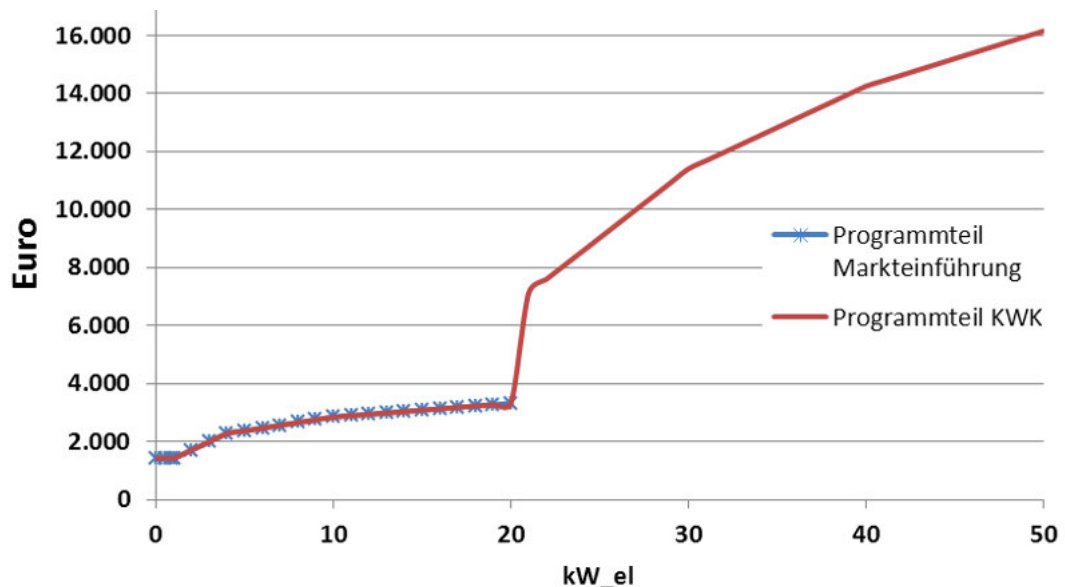


Abbildung 50: Förderbetrag für Mikro KWK-Anlagen nach dem progres-Programm

So würde beispielsweise ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 50 kW, welches alle oben genannten Anforderungen erfüllt, einen einmaligen Zuschuss von 16.150 EUR erhalten. [189]

Des Weiteren kommt Brennstoffzellen-Anlagen bis 5 kW<sub>el</sub> eine besondere Förderung zugute. Für Anlagen bis 1 kW<sub>el</sub> beträgt die Zusatzförderung maximal 10.000 EUR (als maximal 10.000 EUR/kW<sub>el</sub>). Anlagen mit 3 kW elektrischer Leistung werden mit 15.000 EUR gefördert. Ab 3 kW<sub>el</sub> bis 5 kW<sub>el</sub> beträgt der Sockelbetrag 15.000 EUR mit einer Zusatzförderung von 1.000 EUR/kW<sub>el</sub>.

Es gilt zu beachten, dass Projekte, die über Mietkauf- oder Leasingmodelle finanziert werden, aktuell nicht Gegenstand der Förderung sind [186]. Diese Richtlinie besitzt eine Gültigkeit bis zum 31.12.2017 [189]. Auf Grund der Höhe der möglichen Förderungen werden diese als De-minimis-Beihilfe bezeichnet, welche nach Ansicht der europäischen Kommission durch Förderungen den Wettbewerb innerhalb der EU nicht verfälschen. Um unter den Begriff De-minimis zu fallen, darf bei einem Unternehmen innerhalb von 36 Monaten ein Förderwert in Höhe von 200.000 EUR nicht überschritten werden [190]. Anträge sind - wie auch beim Markteinführungsprogramm - bei der Bezirksregierung Arnsberg zu stellen. Diese Richtlinie tritt zum 31.12.2017 außer Kraft. [189]

### **progres.nrw – Programmbereich Wärme- und Kältenetze**

Zum 15.12.2014 wurde das progres-Programm um den Bereich Wärme- und Kältenetz erweitert. Mit diesem Förderbaustein sollen energieeffiziente Fernwärme- und Fernkältenetze ausgebaut werden.

Diese Förderung richtet sich an Unternehmen mit Betriebsstätten bzw. Niederlassungen in NRW. Es werden zudem nur Vorhaben in NRW gefördert und - wie auch bei den anderen Programmbereichen des progres.nrw - muss ein schriftlicher Antrag bei der entsprechenden Behörde gestellt worden sein, bevor mit dem Vorhaben begonnen wurde. Des Weiteren werden keine Förderungen für Planung oder Reparatur bestehender Leitungen gewährt. Wird eine bereits bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängt, ist eine Förderung nicht zulässig.

Neben dem Neubau und der Verdichtung von energieeffizienten Fernwärme- bzw. Fernkältenetzen (bis zu einem Nenndurchmesser mit DN 300) werden u. a. auch Speicher in Fernwärme- und Fernkältenetzen sowie der Umbau von Fernwärmedampfnetzen auf Heißwassernetze gefördert. Die Höhe der Fördersumme für den Neu- bzw. Ausbau von Netzen richtet sich nach dem Nenndurchmesser des Medienrohres und der Länge (Trassenmeter). Diese variiert von 50 EUR/m bei DN 25 bis hin zu 200 EUR/m bei DN 300. Handelt es sich bei dem zu fördernden Projekt nicht um den Ausbau von Netzen, sondern um die oben angesprochenen Vorhaben, so können je nach Vorhaben 20 bis 65 % der förderfähigen Ausgaben übernommen werden.

Auch dieser Zuschuss richtet sich nach der bereits angesprochenen De-minimis-Verordnung. Im Gegensatz zu den anderen angesprochenen Förderbausteinen aus dem progres.nrw-Programm ist diese Förderung nicht mit anderen staatlichen Zuwendungen kumulierbar. Die Richtlinie besitzt eine Gültigkeit bis zum 01.01.2021.

#### 4.1.2.2 NRW-spezifische Förderungen für Unternehmen

Im Gegensatz zur bundesweiten Förderung durch die KfW, partizipieren im Land Nordrhein-Westfalen nur Unternehmen an zinsgünstigen Darlehen. Für Privatpersonen ist landesweit lediglich das progres.nrw-Programm zu finden. Im Folgenden sind die diversen Darlehen der NRW.Bank detailliert beschrieben.

##### **NRW/EU.KWK-Investitionskredit**

Ein weiteres Mittel zur Unterstützung des Ausbaus der KWK ist der NRW/EU.KWK-Investitionskredit der NRW.Bank. Hierbei handelt es sich um ein Darlehen, das besonders gute Konditionen bezüglich Zinsen und Laufzeit aufweist. Diese Darlehen werden für den Neubau, die Erneuerung von KWK-Anlagen oder für die Umrüstung auf KWK-Anlagen gewährt. Allerdings muss der Investitionsort in NRW liegen. Kunden (Unternehmen) werden hier nicht nach Rechtsform, Gesellschaftshintergrund oder Größe differenziert. Sie müssen lediglich Eigentümer einer KWK-Anlage sein. Der NRW/EU.KWK-Investitionskredit bezieht sich jedoch ausschließlich auf Unternehmen. Privatpersonen können diesen Kredit nicht in Anspruch nehmen. Angedacht ist diese Form der indirekten Förderung für "Investitionsvorhaben, die einen wirtschaftlichen Erfolg erwarten lassen und deren Gesamtfinanzierung gesichert ist". Der NRW/EU.KWK-Investitionskredit bezieht sich auf KWK-Anlagen, die eine Leistung von 50 kW<sub>el</sub> überschreiten. Hier wird neben dem Neubau solcher Anlagen inklusive Wärmespeicher und Regelungsvorrichtung auch die Umrüstung bzw. Erweiterung bestehender Anlagen zu einer Nutzung im Sinne der KWK gefördert – vorausgesetzt es werden mehr als 50 kW<sub>el</sub> nach der Umrüstung erreicht. Ebenfalls ist eine Finanzierung für den Zusammenschluss mehrerer Anlagen möglich, solange die Leistung solch eines "virtuellen Kraftwerkes" 50 kW<sub>el</sub> überschreitet. Weitere Gegenstände möglicher Finanzierungen mit dem NRW/EU.KWK-Investitionskredit sind:

- Anschluss an bestehende Wärmenetze (mit Neubau/Umrüstung verbunden)
- Installationskosten
- Kosten für Hausanschlüsse und Übergabestationen
- Aktivierte Kosten für Planungs- und Beratungsleistungen
- Im Zusammenhang mit dem Vorhaben stehende Baunebenkosten

Bei dieser Art der Finanzierung handelt es sich um ein Ratendarlehen, wobei 100 % der förderfähigen Investitionskosten finanziert werden können (es werden auch 100 % sofort ausbezahlt). Der Mindestbetrag liegt bei 50.000 EUR, maximal werden 2,5 Mio. EUR gewährt. Das Darlehen mit einem tilgungsfreien Jahr hat eine Laufzeit von 3 bis 8 Jahren, wobei der Zinssatz für die gesamte Laufzeit fix ist [191]. Die Höhe der Zinsen richtet sich wie auch bei anderen Banken nach der Höhe des Darlehens. Der günstigste Sollzins liegt bei 1,01 % p. a., der höchste Sollzins bei 7,41 % p. a. [192]. Anhand von gleichen Vierteljahresraten ist das Darlehen zu tilgen. Es gelten hier ebenfalls die Grenzen für De-minimis-Beihilfen. [191]

### **NRW.BANK.Energieinfrastruktur**

Die NRW.Bank bietet ebenfalls zinsgünstige Darlehen für Investitionen in Anlagen der Energieinfrastruktur (Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung) in Nordrhein-Westfalen an. Dieses Programm bezieht sich auf in- und ausländische Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, Unternehmen mit mehrheitlich öffentlichem Gesellschaftshintergrund, Angehörige der freien Berufe und private Investoren. Mögliche Finanzierungsobjekte sind:

- Erwerb von Grundstücken/Gebäuden
- Gewerbliche Baukosten
- Anschaffung von Einrichtungen/Maschinen
- Betriebs- und Geschäftsausstattung
- Erwerb von Anteilen an Versorgungsbetrieben sowie Netzen/Produktionskapazitäten im Rahmen der Re-Kommunalisierung

Voraussetzung ist, dass die finanzierten Anlagen für öffentliche Zwecke vorzusehen sind, was bedeutet, dass die in den finanzierten Anlagen erzeugte Energie überwiegend in öffentliche Netze eingespeist werden muss.

Es kann ein Annuitäten- oder Ratendarlehen mit einem Umfang von bis zu 100 % der förderfähigen Investitionskosten gewährt werden, dessen Höchstgrenze bei 150 Mio. EUR liegt. Die Grenze von 250.000 EUR darf nicht unterschritten werden. Die Laufzeit ist mit mindestens 3 und maximal 30 Jahren sehr flexibel und kann somit an die Bedürfnisse des Einzelprojekts gut angepasst werden. Der Zinssatz wird auf 10 Jahre festgesetzt. Ist die Gesamtlaufzeit des Kredites jedoch geringer als 10 Jahre, so entspricht die Zinsbindung der Gesamtlaufzeit. Zurückzahlen ist das Darlehen in vierteljährlichen Raten, die nach Ablauf der maximal zehn Tilgungsfreijahre gezahlt werden müssen. [193]

### **NRW.BANK.Effizienz kredit**

Dieses zinsgünstige Darlehen der NRW.BANK bezieht sich auf Investitionen, die zu einer dauerhaften Steigerung der Energie- oder Ressourceneffizienz führen, sich aber nicht zwangsweise auf den Energiesektor bzw. die Energieproduktion beziehen. Gefördert werden u. a. Maßnahmen zur Energieeinsparung sowie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Hierbei handelt es sich nicht nur um Energieerzeugungsanlagen. Ebenso kann beispielsweise der Stromverbrauch oder der Ressourceneinsatz einer Produktionsanlage gemeint sein. Um ein Darlehen zu bekommen, sind konkrete Werte zu erreichen: Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 20 % oder Steigerung der Ressourceneffizienz um mindestens 10 %. Werden diese Vorgaben nicht erreicht, so kann durch eine Teilnahme an einem zertifizierten Verfahren zur Schonung der Umwelt trotzdem ein Effizienz kredit gewährt werden. In- und ausländische Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, die mehrheitlich in Privatbesitz sind, können einen Antrag für den Effizienz kredit stellen. Das Ratendarlehen, was bis zu 100 % der förderfähigen Ausgaben finanzieren kann, hat eine Mindesthöhe von 25.000 EUR und eine Obergrenze von 5 Mio. EUR. Die Laufzeit liegt bei 4 bis 10 Jahren, wobei der Zinssatz für die gesamte Laufzeit des Darlehens festgesetzt ist. Das Darlehen ist in gleichen Vierteljahresraten zu tilgen. [194], [195]

#### 4.1.2.3 Fördermöglichkeiten durch (Energieversorgungs-) Unternehmen

Neben der staatlichen Förderung stellen auch einige Energieversorgungsunternehmen verschiedene Fördermaßnahmen in Aussicht. Hierbei handelt es sich um Förderungen für effiziente oder erneuerbare Energienutzungsarten. Gefördert werden u. a. BHKWs, besonders im Mikro- bzw. Mini-Bereich. Die Stadtwerke Essen haben beispielsweise einen Innovationsbonus, den sie an die ersten 20 Kunden, die eine Mikro-KWK-Anlage mit maximal 3 kW elektrischer Leistung installieren, vergeben. Die Fördersumme beträgt 1.000 EUR, es muss jedoch ein Erdgaslieferverhältnis über fünf Jahre zwischen dem Fördernehmer und den Stadtwerken Essen bestehen [196]. Eine Übersicht über alle Förderungen der 28 Unternehmen in NRW, die eine Förderung gewähren, lässt sich auf der Internetpräsenz der EnergieAgentur.NRW finden. [197]

#### 4.1.3 Förderprogramme in anderen Bundesländern

Neben den bereits beschriebenen Förderprogrammen für das Land NRW gibt es diverse weitere Förderprogramme in anderen Bundesländern der BRD, von denen sich jedoch viele nicht wesentlich von den NRW-spezifischen Förderprogrammen unterscheiden. Das Programm "RENplus" aus Brandenburg bzw. das Programm "REN" aus Bremen bezieht sich ebenfalls auf die rationelle Energienutzung. Gemeint sind der Einsatz von Erneuerbaren Energien und die Förderung der Energieeffizienz [198], [199]. In Sachsen ist das Leistungsspektrum der förderfähigen KWK-Anlagen etwas weiter gehalten. Hier fördert die Sächsische Aufbau Bank KWK-Anlagen ab einer elektrischen Leistung von 20 kW bis hin zu einer Feuerungswärmeleistung von 5 MW. Ein entsprechendes BHKW muss jedoch zwingend wärmegeführt betrieben werden [200]. Das Bundesland Hessen fördert Energiecontracting zur Beschleunigung des Markteintritts von hocheffizienten Mikro-KWK-Anlagen. So werden KWK-Anlagen, die in einem Contracting-Vertrag betrieben werden, mit 1.500 EUR gefördert. Diese Förderung ist dann indirekt über die Contracting-Vergütung an den Kunden weiterzureichen [201]. Zudem wird in Hessen die Stromerzeugung mittels KWK-Anlage mit Brennstoffzellen durch einen Investitionszuschuss gefördert. Die Höhe des Zuschusses hängt von der KWK-Anlage ab, ist aber mit maximal 17.500 EUR vergleichsweise hoch [202]. Das Programm proKlima aus Niedersachsen im Versorgungsgebiet der enercity gewährt Förderungen für verschiedenste Anlagen und Maßnahmen. So kann alleine schon die Erstberatung zum Thema KWK mit bis zu 500 EUR gefördert werden. Neben BHKW und stromerzeugenden Heizungen werden hier ebenfalls Anschlüsse an das Nah- und Fernwärmenetz gefördert, solange diese von KWK-Anlagen gespeist werden [203].

#### 4.1.4 Vermiedene Kosten durch Eigenstromerzeugung

Ein wesentlicher Aspekt, der in der Vergangenheit viele Investoren zur Errichtung von KWK-Anlagen veranlasst hat, war der Wegfall der EEG-Umlage bei Eigenstromerzeugung. Nach § 37 Abs. 3 EEG 2012 galt für die Eigenstromversorgung das "Eigenerzeugungsprivileg". Wurde der selbst erzeugte Strom in räumlichem Zusammenhang mit der Stromerzeugungsanlage verbraucht und nicht durch ein öffentliches Netz geleitet, fiel die sonst zu zahlende EEG-Umlage weg [204]. Nach der Novellierung des EEG im Jahr 2014 gibt es das Eigenerzeugungsprivileg in dieser Form nicht mehr. Mit der Intention, die Förderkosten für Erneuerbare

Energien besser zu verteilen, wurden umfassende Änderungen im EEG vorgenommen. So muss nach § 61 Abs. 1 des neuen EEG 2014 je nach Zeitpunkt des Verbrauchs des selbst erzeugten Stroms ein bestimmter Anteil der EEG-Umlage pro verbrauchte Kilowattstunde gezahlt werden. Die Höhe des Anteils ist in der unten aufgeführten Tabelle zu finden.

Tabelle 24: Zu zahlende Anteile der EEG-Umlage bei Eigenversorgung

Zu zahlender Anteil der EEG-Umlage	Strom verbraucht ...
30 %	nach dem 31.07.2014 und vor dem 01.01.2016
35 %	nach dem 31.12.2015 und vor dem 01.01.2017
40 %	ab dem 01.01.2017

Weitere Bedingung für die nur anteilige Zahlung ist ebenfalls das Hocheffizienzkriterium. Zudem muss die KWK-Anlage ein Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mehr als 70 % aufweisen, damit die EEG-Umlage nicht in voller Höhe anfällt. Beide Kriterien sind im Detail in § 53a Abs. 1 Satz 3 und Satz 2 Nummer 1 des Energiesteuergesetzes festgehalten [174]. Sind diese nicht erfüllt, so muss nach der Novellierung des EEG aus dem Jahr 2014 bei Eigenproduktion des Stroms die EEG-Umlage in vollem Umfang gezahlt werden. Für Strom aus Erzeugungsanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von maximal 10 kW entfällt für die ersten 10 MWh des selbstverbrauchten Stroms pro Kalenderjahr die EEG-Umlage vollständig (§ 61 Abs. 2 Satz 1, sogenannte Bagatellgrenze) [205]. Wird Strom aus Anlagen verbraucht, die vor dem 01.08.2014 in Betrieb genommen wurden, gilt die neue Regelung nicht, es muss folglich keine EEG-Umlage gezahlt werden [206]. Für das Jahr 2015 liegt die EEG-Umlage bei 6,17 Ct/kWh [207]

Darüber hinaus kann unter Umständen die Zahlung der Stromsteuer in Höhe von 2,05 ct/kWh wegfallen. Strom aus Erneuerbaren Energieträgern ist von der Stromsteuer befreit. Hier gilt es jedoch sicherzustellen, dass dieser aus einem Netz entnommen wird, das ausschließlich durch Erneuerbare Energie gespeist wird (§ 9 Abs. 1 Satz 1 StromStG). Alle Stromerzeugungsanlagen für die Eigenstromversorgung, die eine elektrische Leistung von bis zu 2 MW aufweisen (also  $\leq 2 \text{ MW}_{\text{el}}$ ) sind pauschal von der Stromsteuer befreit (§9 Abs. 1 Satz 3 StromStG). Maßgeblich ist hier die Leistung, die der Hersteller als Nennleistung ausschreibt. Aus diesem Grund werden BHKWs mit einer elektrischen Leistung von 1.999 kW angeboten. Wird diese Grenze überschritten, gibt es einige Ausnahmeregelungen. So kann für Unternehmen des produzierenden Gewerbes und der Land- und Forstwirtschaft eine Steuerentlastung in Höhe von knapp 25 % geltend gemacht werden. Voraussetzung hierfür ist, dass diese Unternehmen den Strom bereits nach § 3 StromStG versteuert haben und dieser zur Erzeugung von Licht, Wärme, Kälte, Druckluft und mechanischer Energie genutzt wird. Diese Medien müssen nachweislich vom entsprechenden zu entlastenden Unternehmen genutzt werden. Zudem können Unternehmen des produzierenden Gewerbes nach § 10 StromStG in besonderen Fällen von einem Spitzensteuerausgleich profitieren. Dieser richtet sich nach der gezahlten Stromsteuer und der Höhe der Rentenversicherungsbeiträge des Unternehmens [208]. Ist die Stromsteuer bei Anlagen mit einer Leistung von mehr als 2  $\text{MW}_{\text{el}}$  zu zahlen, so sind diese Anlagen von der Energiesteuer befreit. Es sind also nie Strom und Energie gleichzeitig zu versteuern. § 53 Abs. 1 EnergieStG besagt, dass ortsfeste Stromerzeugungsanlagen mit einer Nennleistung von mehr als 2  $\text{MW}_{\text{el}}$  von der Energiesteuer befreit sind. [174]

#### 4.1.5 Steuerliche Behandlung von KWK-Anlagen

Wenn der in einer KWK-Anlage erzeugte Strom regelmäßig in das allgemeine Stromnetz gegen Zahlung eines Entgeltes vollständig oder teilweise eingespeist wird, so wird der Betreiber dieser Anlage zum Unternehmer. Für einen Unternehmer ist es möglich, die für die Anschaffung der Anlage und den Anlagenbetrieb gezahlte Mehrwertsteuer (Vorsteuer) mittels Vorsteuerabzug erstattet zu bekommen. So lassen sich Investitions- und Betriebskosten der KWK-Anlage senken. Neben der durch den Stromnetzbetreiber gezahlten Vergütung für den eingespeisten Strom ist der umsatzsteuerliche Wert des Eigenverbrauches sowohl für Strom als auch für Wärme als Umsatz zu erfassen. Hierfür ist die genutzte Wärme mit den Selbstkosten anzusetzen. Der eigenverbrauchte Strom hingegen ist mit dem Marktpreis zu bewerten. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass ein Unternehmer steuerlich als Kleinunternehmer betrachtet wird. Diese Regelung (§19 Abs. 1 Umsatzsteuergesetz (UStG)) gilt, wenn der Brutto-Umsatz inklusive der darauf anfallenden Steuer im vorangegangenen Kalenderjahr 17.500 EUR nicht überstiegen hat und zudem im laufenden Kalenderjahr 50.000 EUR (voraussichtlich) nicht übersteigen wird. Somit ist keine Umsatzsteuer auszuweisen. Es darf in diesem Fall jedoch ebenfalls der oben angesprochene Vorsteuerabzug nicht genutzt werden. Nach § 19 Abs. 2 UStG ist es möglich, trotz Erfüllung der dargestellten Anforderungen auf die Kleinunternehmer-Regelung zu verzichten. Dann ist der Unternehmer für mindestens fünf Kalenderjahre steuerlich als Unternehmer und nicht als Kleinunternehmer festgesetzt und kann dies nur mit Wirkung von Beginn eines Kalenderjahres widerrufen. Es muss also zunächst geklärt werden, ob eine Vorsteuererstattung gewünscht ist oder vielmehr eine unkomplizierte Abrechnung angestrebt wird. Ist die erste Variante der Fall, sollte die Kleinunternehmer-Regelung genutzt werden. Für die Regelbesteuerung ist dann aber eine Steuererklärung abzugeben. [209], [173]

Neben der Umsatzsteuer ist für den Betrieb einer KWK-Anlage die Einkommenssteuer zu betrachten. Diese bezieht sich auf die Gewinne, die durch den Gewerbebetrieb erzielt werden. Per Definition liegt ein Gewerbebetrieb dann vor, wenn sich im Verlauf der Jahre ein Gewinn aus der KWK-Anlage erwarten lässt. Als Gewinn wird in diesem Fall die Summe aller positiven und negativen Einnahmen und Ausgaben unter Berücksichtigung des Wertes privat genutzten Stroms und Wärme betrachtet. Ebenfalls als Einkommen sind Erlöse aus Strom- und Wärmeverkauf, Zulagen nach dem KWK-G und aus Förderprogrammen anzugeben. Des Weiteren sind geldwerte Vorteile aus Eigenstrom- und Wärmeverbrauch zu berücksichtigen. Steuerlich geltend zu machen sind hingegen Aufwendungen zur Erreichung der Einkommensart. Es ist also klar zwischen Einkommen und Kosten zu unterscheiden. Einkommen, die für den Betrieb einer KWK-Anlagen zu berücksichtigen sind, sind die einmaligen Investitionszulagen (bundes- oder landesweit), der KWK-Zuschlag, die Vergütung aus der Stromeinspeisung, Erlöse aus dem möglichen Stromverkauf, die Gutschrift für vermiedene Netznutzungsentgelte, die Energiesteuerrückerstattung, selbst verbrauchter Strom und Wärme sowie erhaltene Umsatzsteuerzahlungen. Kosten sind lineare Abschreibungen, Sonderabschreibungen, Finanzierungskosten, Brennstoffkosten der KWK-Anlagen, Wartungs- und Reparaturkosten, Schornsteinfegerkosten, gezahlte Umsatz- und Vorsteuer sowie die abgeführte EEG-Umlage (sowohl für den verkauften als auch für den selbst genutzten Strom).

## 4.2 Betriebsstrategien

Der Betrieb einer KWK-Anlage wird von vielen Faktoren beeinflusst. Um für eine Anlage eine passende Betriebsstrategie aufzustellen, sind zusätzlich zum Ziel des Anlagenbetriebs, wie z. B. der Objektversorgung auch die Kenntnis dieser Faktoren und die Möglichkeit der Gestaltung erforderlich. Im Folgenden werden zunächst die Fahrweisen von KWK-Anlagen beschrieben sowie weitere allgemeine Begriffe erläutert, die im Zusammenhang mit Betriebsstrategien von KWK-Anlagen relevant sind. Des Weiteren werden grundlegende Aspekte der Netzstabilität und Flexibilitätsoptionen beschrieben, die im zukünftigen Energieversorgungssystem und insbesondere bei der Anwendung der KWK-Technologie eine Rolle spielen können. Schließlich werden mögliche Betriebsstrategien vorgestellt und in Abhängigkeit von der Leistungsklasse und dem jeweiligen Betriebsziel, das der Betreiber der KWK-Anlage verfolgt, qualitativ bewertet. Insgesamt liegt somit ein „Werkzeugkasten“ mit den erforderlichen Mitteln zur Gestaltung einer Betriebsstrategie vor.

### 4.2.1 Grundlegende Fahrweisen von KWK-Anlagen

Die drei grundlegenden Fahrweisen wärmegeführt, stromorientiert und stromgeführt stellen die Basis für jeden KWK-Anlagenbetrieb dar und werden in den nachstehenden Abschnitten definiert. Die expliziten Regelungsschemata sind im Anhang dargestellt. Die Wahl der geeigneten Fahrweise richtet sich nach einer Vielzahl von technischen, wirtschaftlichen und auch umweltrelevanten Aspekten. Motivationen und Anreize für die Wahl der Fahrweise werden im weiteren Text erläutert.

#### 4.2.1.1 Wärmegeführte Fahrweise

Bei einer wärmegeführten KWK-Anlage wird diese nach dem thermischen Bedarf ausgelegt und betrieben. Der Wärmebedarf diktiert die KWK-Anlagenfahrweise, was bedeutet, dass der gleichzeitig erzeugte Strom entweder ins Netz eingespeist oder verbraucht wird. KWK-Anlagen werden üblicherweise nicht auf die Wärmehöchstlast ausgelegt, diese wird stattdessen mittels Kesselanlagen abgedeckt. Derzeit wird ein Großteil der installierten KWK-Anlagen in der Objektversorgung wärmegeführt betrieben.

#### 4.2.1.2 Stromorientierte Fahrweise

Wie bei einer wärmegeführten KWK-Anlage wird eine stromorientiert betriebene Anlage ebenfalls hauptsächlich nach dem thermischen Bedarf ausgelegt und betrieben. Zusätzlich beeinflusst der Strombedarf die KWK-Anlagenfahrweise, ohne diese jedoch gänzlich zu diktieren. Es existieren unterschiedliche Regelstrategien, die in Abhängigkeit des Anreizes (z. B. des erzielbaren Strompreises) die Anlage regeln. Oberste Prämisse bleibt immer die Nutzung der Wärme durch direkten Verbrauch oder Speicherung. Es findet keine Notkühlung statt!



### 4.2.1.3 Stromgeführte Fahrweise

Bei einer stromgeführten KWK-Anlage wird diese mit Fokus auf den Strombedarf ausgelegt. An der Strombörse erzielbare Strompreise oder eine festgelegte Vergütung bestimmen den Betrieb. Die Auslegung kann so erfolgen, dass ein Wärmeüberschuss vermieden wird. Wenn die bei der Stromproduktion erzeugte Wärme jedoch nicht zwischengespeichert oder verbraucht werden kann, ist diese über einen Notkühler abzuführen, was einer Abweichung vom KWK-Betrieb entspricht, wodurch wiederum die Förderung nach dem KWK-G zum Teil oder komplett entfällt (siehe auch Kapitel 4.1). Die Motivation für eine stromgeführte Fahrweise kann z. B. der Betrieb einer Anlage zur Bereitstellung von Notstrom oder einer Erneuerbaren Energien Anlage (Biogas) sein. Die Fahrweise für Anlagen, die nur für einen geringen Teil ihrer Betriebszeit die Option der Notkühlung nutzen, gilt in diesem Zusammenhang auch als stromorientiert.

## 4.2.2 Begriffe und technisches Umfeld

Im Folgenden werden die für die Betriebsstrategie bedeutenden technischen Merkmale von KWK-Anlagen sowie allgemeine Begriffe und Zusammenhänge des Energiesystems erläutert.

### 4.2.2.1 Technische Merkmale von KWK-Anlagen





KWK-Anlagen weisen je nach Technologie und Leistungsklasse eine Modulationsfähigkeit auf oder können bei definierten Teillaststufen betrieben werden. Dies ist bei der Einsatzplanung zu berücksichtigen. Typische Werte für Verbrennungsmotoren liegen z. B. im Bereich von 30 bis 50 % (siehe auch Kapitel 2.1), stellen jedoch besondere Herausforderungen an die Anlagen.

Aus technischen Gründen kann es des Weiteren notwendig sein, eine Mindestlaufzeit für Anlagen festzulegen. Andere Technologien benötigen eine Mindest-Stillstands-Zeit, wie z. B. ein auf dem Markt befindliches Brennstoffzellenheizgerät, das in 24 Betriebsstunden eine vierstündige Regenerationsphase einzuhalten hat [210].

Die Schwarzstartfähigkeit von Energieerzeugungsanlagen spielt ebenfalls eine Rolle bei Überlegungen zu Betriebsstrategien. Schwarzstartfähige Anlagen zeichnen sich durch die Fähigkeit aus, nach einem Netzausfall selbstständig starten zu können. Die hierfür erforderliche Startenergie kann z. B. durch Batteriespeicher aufgebracht werden. Derartige Anlagen können beispielsweise auch in Begleitung mit nicht schwarzstartfähigen Anlagen, typischerweise großen Kraftwerken, vorkommen.

### 4.2.2.2 Netzebenen

Das elektrische Stromnetz wird anhand des Spannungsniveaus in vier Netzebenen eingeteilt:

-  Niederspannungsnetz: 230 V oder 400 V
-  Mittelspannungsnetz: 6 kV bis 30 kV
-  Hochspannungsnetz: 110 kV
-  Höchstspannungsnetz: 220 kV oder 380 kV

In Zusammenhang mit dem Stromtransport wird das Höchstspannungsnetz auch als Übertragungs- oder Transportnetz bezeichnet. In Deutschland ist das Übertragungsnetz gebietsweise unterteilt und wird von vier Unternehmen, den Übertragungsnetzbetreibern (ÜBN), betrieben. Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetz bilden die Verteilnetze. Mittels Transformatoren kann die Spannung im Stromnetz erhöht oder reduziert werden. In Abbildung 51 ist eine Übersicht der Netzspannungsebenen dargestellt.

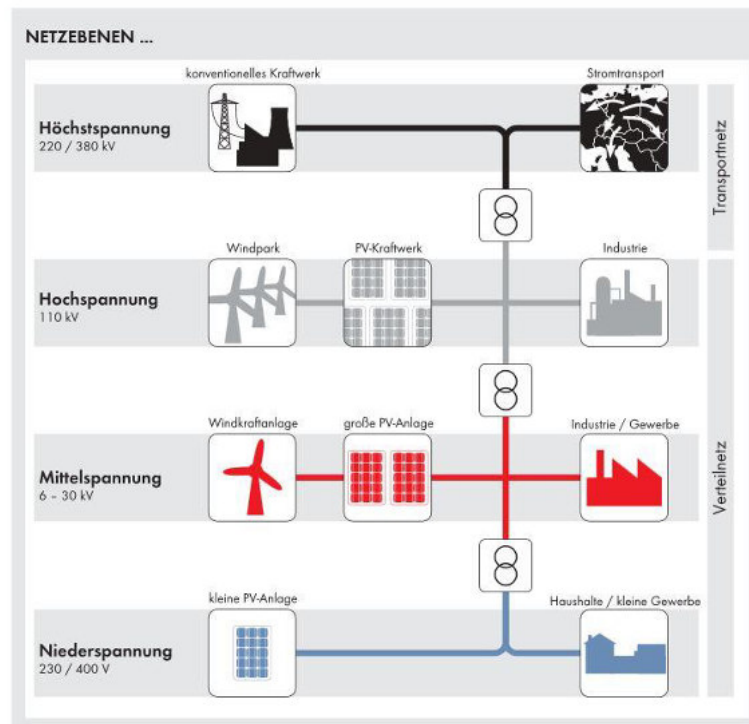


Abbildung 51: Übersicht der verschiedenen Netzebenen [211]

### 4.2.2.3 Regelleistung

Als Regelleistung wird elektrische Leistung zum Ausgleich von unvorhersehbaren Last- und Erzeugungsschwankungen, die z. B. durch Fehler bei der Prognose von Lasten oder der Erzeugung durch Erneuerbaren Energien sowie durch Kraftwerksausfälle verursacht werden, bezeichnet. Die von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern bekannt gegebenen Ausschreibungswerte betragen im dritten Quartal 2015 für Minutenregelleistung in etwa + 1.500 MW und – 1.800 MW und für Sekundärregelleistung in etwa  $\pm 2.100$  MW [212]. Für die Teilnahme von Erzeugungsanlagen am Regelenergiemarkt sind spezielle Präqualifikationsbedingungen zu erfüllen. Da der ÜBN für die Netzstabilität verantwortlich ist, prüft und entscheidet er über die Zulassung zur Bereitstellung von Regelleistung.

Positive Regelleistung wird abgerufen, wenn im Netz mehr Leistung nachgefragt als momentan eingespeist wird, z. B. bei einem Kraftwerksausfall. Negative Regelleistung wird abgerufen, falls momentan zu viel Leistung im Netz ist. Ist dies der Fall, muss die überschüssige Leistung aus dem Netz genommen werden, z. B. durch Betreiben eines Pumpspeicherkraftwerks oder Herunterfahren einspeisender Anlagen. Weitere Details zur Aktivierung der Regelleistung werden im Abschnitt 0 erläutert.

#### 4.2.2.4 Frequenz-Regelband

Das tolerierbare Regelband im deutschen Stromnetz beträgt  $50 \text{ Hz} \pm 20 \text{ mHz}$ . Dementsprechend wird Regelleistung bei Überschreitung einer Frequenz von  $50,02 \text{ Hz}$  und bei Unterschreitung einer Frequenz von  $49,98 \text{ Hz}$  erforderlich. Regelleistungsarten sind nach der erforderlichen Reaktionszeit geordnet. Im Sekundenbereich ist Primärregelleistung bereitzustellen, dann folgt die Sekundärregelleistung und als letztes die Tertiärregelleistung (Minutenreserve), siehe auch Abschnitt 0.

#### 4.2.2.5 Residuallast

Unter dem Begriff der Residuallast wird die Differenz zwischen der nachgefragten Leistung (Stromverbrauch) und dem Anteil fluktuierender Leistung aus Erneuerbaren Energien (EE), also der nicht-steuerbaren Kraftwerke, verstanden. Die restliche Last (Residuallast) muss also von regelbaren Kraftwerken gedeckt werden. Diese sind in der Regel fossile Kraftwerke.

In der Vergangenheit ist es vermehrt zu Kraftwerksstilllegungen konventioneller Kraftwerke gekommen, da die Kraftwerksbetreiber durch sinkende Strombörsenpreise geringere Deckungsbeiträge erwirtschaften können [160]. Die steigende Einspeisung fluktuierender Energien führt im Jahresmittel zu einer sinkenden Residuallast, sodass in Zukunft auch mit negativen Werten zu rechnen ist [160]. Negative Werte treten auf, wenn die eingespeiste Leistung aus EE größer ist als die momentane nachgefragte Leistung. Laut Prognosen der deutschen Energieagentur wird ab dem Jahr 2030 negative Residuallast für einen Zeitraum von ca. 1.000 h vorliegen, siehe Abbildung 52.

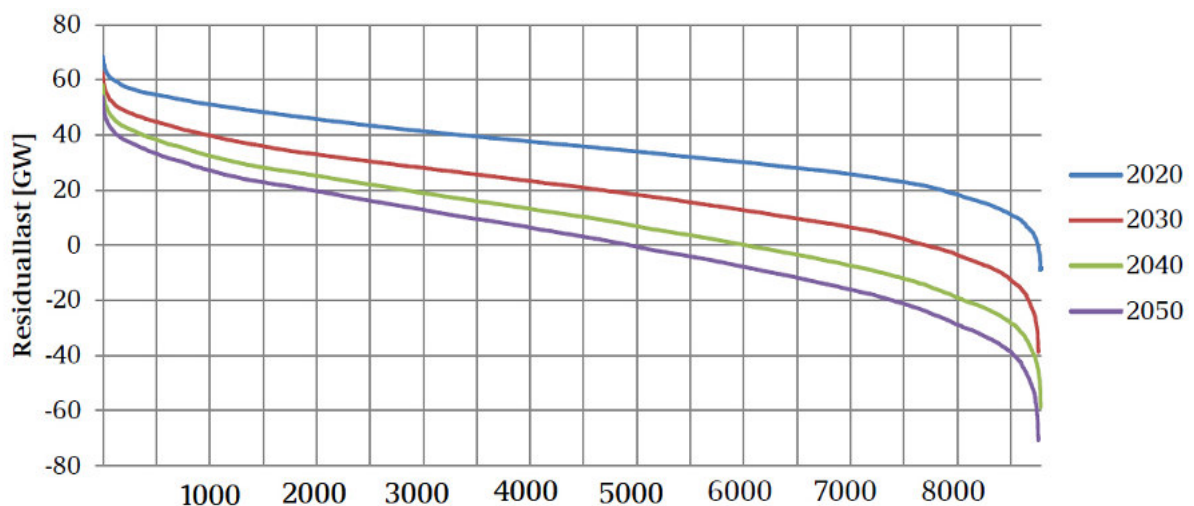


Abbildung 52: Geordnete Jahresdauerlinie der Residuallast [177]

Dadurch ergibt sich ein Rückgang der zu deckenden Grundlast, die in der Regel von konventionellen Kraftwerken bereitgestellt wird, wohingegen nur ein begrenzter Rückgang der zu deckenden Spitzenlast zu erwarten ist.

#### 4.2.2.6 Wärmenetze

Der Transport und die Verteilung von Wärme erfolgt in Wärmenetzen. Es wird unterschieden zwischen Fernwärmeschienen und Fern- und Nahwärmenetzen. Fernwärmeschienen werden zum Transport von Wärme mittels Wassers unter Druck bei Temperaturen über 200 °C genutzt. Sie verbinden Wärmeerzeuger, wie z. B. Großkraftwerke miteinander und tragen dazu bei, dass Fernwärmenetze sinnvoll und effizient angelegt, verbunden und betrieben werden können.

Bei den Fern- und Nahwärmenetzen erfolgt der Transport der thermischen Energie in isolierten Rohren, die überwiegend erdverlegt sind. In den Rohren befindet sich Wasser bei einer Temperatur von 80 bis 130 °C und einem Druck von 16 bis 25 bar oder 80 bis 90 °C und einem Druck von 4 bis 10 bar. Mittels Wärmeübertrager oder durch Direkteinspeisung wird aus der Vorlaufleitung des Netzes am Verbrauchsort Wärme für die Heizung und zur Warmwasserbereitung entnommen. Das dadurch abgekühlte Wasser wird in die Rücklaufleitung geleitet. Selten findet man noch Dampfnetze in der Fernwärmeversorgung.

Als Nahwärme wird häufig ein Wärmenetz mit geringer räumlicher Ausdehnung bezeichnet. Der Übergang zur Fernwärme mit größeren Leitungslängen ist fließend. Im Unterschied zu Fernwärme wird Nahwärme in kleineren Einheiten realisiert. Für Nahwärmenetze typische thermische Leistungen liegen zwischen 50 Kilowatt und einigen Megawatt. Zudem kann die Wärme bei relativ niedrigen Temperaturen übertragen werden. Daher lässt sich neben der in Heizwerken und Blockheizkraftwerken erzeugten thermische Energie auch die bei niedrigeren Temperaturen anfallende Wärme aus Sonnenkollektoranlagen oder aus Erdwärmeeinrichtungen durch Nahwärme verwerten.

Nahwärmenetze versorgen mehrere Gebäude, ein Wohn- oder Gewerbegebiet oder eine Gemeinde. Die Integration von Langzeit-Wärmespeichern zur saisonalen Speicherung solarthermisch erzeugter Energie ist bei Wärmenetzen eher möglich als bei Heizanlagen einzelner Wohneinheiten. Gegenstand aktueller Forschung sind Low-Ex-Wärmenetze (Ex für Exergie), die die Wärme bei niedrigen Temperaturen übertragen und somit deutlich geringere Exergieverluste aufweisen [214], [215].

#### 4.2.2.7 Stromnetzstabilität und Flexibilitätsoptionen

Zur Netzstabilisierung ist eine Synchronisierung von Stromerzeugung und –verbrauch erforderlich. Bereits heute besteht eine Vielzahl von technischen Optionen zur Netzstabilisierung und zur notwendigen Steigerung der Flexibilität in der Stromversorgung [160]. Im Wesentlichen handelt es sich um Maßnahmen zur flexiblen Erzeugung, zur flexiblen Steuerung der Nachfrage und um Speicher. Eine detaillierte Übersicht über verfügbare Flexibilitätsoptionen und deren Bewertung ist in einer Studie des BET zusammenfassend dargestellt [216]. Die für die KWK besonders relevanten Optionen und Zusammenhänge werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Im zukünftigen Energieversorgungssystem mit steigendem Anteil an volatilen Erneuerbaren Energien steigt die Notwendigkeit des Einsatzes von Flexibilitätsoptionen. Zur Aktivierung der Optionen und somit zur Ausschöpfung und zum weiteren Ausbau des Flexibilitätspotenzials sind durch den Markt zielgerichtete Anreize zu setzen.

#### 4.2.2.8 Synchronisierung von Erzeugung und Verbrauch

Die Synchronisierung von Stromerzeugung und -verbrauch muss auch in den zwei Extremsituationen, hohe und niedrige Residuallast, funktionieren.

- Maximale Residuallast: hohe Stromnachfrage/wenig Einspeisung von EE
- Minimale Residuallast: niedrige Stromnachfrage/hohe Einspeisung von EE

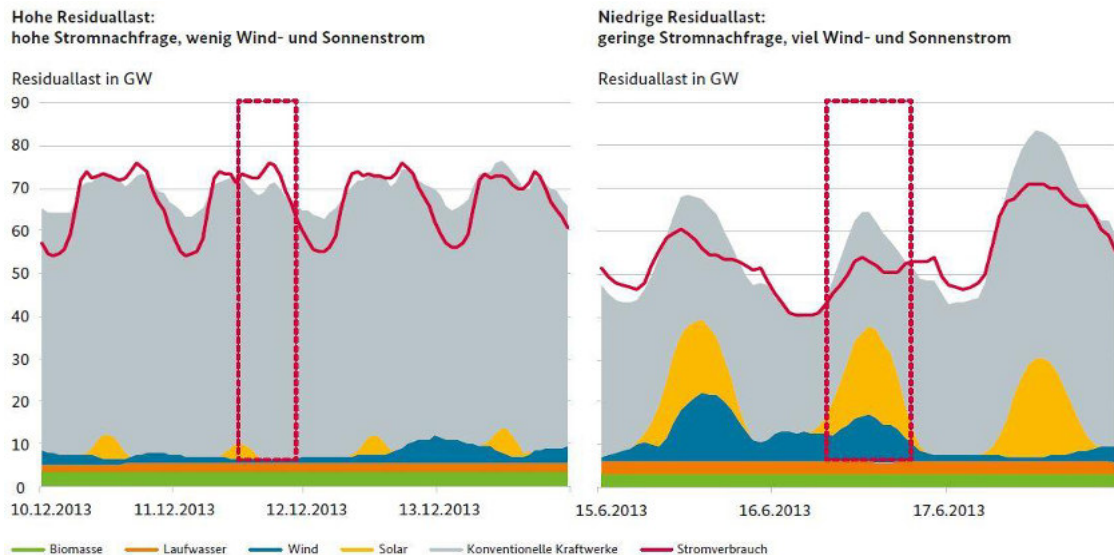


Abbildung 53: Beispiele für Situationen mit hoher und niedriger Residuallast [160]

Bei geringer Residuallast, wie sie auch aktuell schon vorliegen kann (geringe Stromnachfrage, viel Wind- und Sonnenstrom), besteht derzeit noch eine sehr hohe konventionelle Mindesterzeugung. Als Mindesterzeugung wird hier die Stromproduktion bestimmter konventioneller Kraftwerke bezeichnet, die auch noch bei geringer Residuallast und Börsenpreisen von null oder darunter erfolgt, insbesondere weil sie für die Systemsicherheit im Netzbetrieb (Regelleistung, Blindleistung oder andere Systemdienstleistungen) erforderlich ist. Die Mindesterzeugung beträgt heute situationsabhängig bis zu 25 GW, was mehr als einem Drittel der durchschnittlichen Gesamtlast entspricht. Um die Versorgungssicherheit bei geringer Residuallast auch langfristig zu gewährleisten, sollte einerseits die Mindesterzeugung gesenkt und andererseits sollten vermehrt regelbare Kraftwerke eingesetzt werden, damit eine Stromüberspeisung vermieden werden kann [160]. Moderne KWK-Anlagen können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Die Rolle der Erneuerbaren Energien in diesem Zusammenhang wird in Kapitel 3.4 näher erläutert.

#### 4.2.2.9 Blindleistungskompensation

Diese Kompensationsart reduziert die unerwünschte Verschiebungsblindleistung und sie erfolgt, wie in Abbildung 54 dargestellt, üblicherweise durch den Ausgleich induktiver Blindleistung mittels kapazitiver Verbraucher wie beispielsweise Kondensatoren. Am wirksamsten ist die Blindleistungskompensation, wenn sie verbraucher- und zeitnah eingesetzt wird [217]. Hierdurch werden Leitungsverluste reduziert und das Stromnetz entlastet. Die mögliche Rolle von KWK-Anlagen in diesem Zusammenhang ist durch weitere Studien näher zu betrachten.

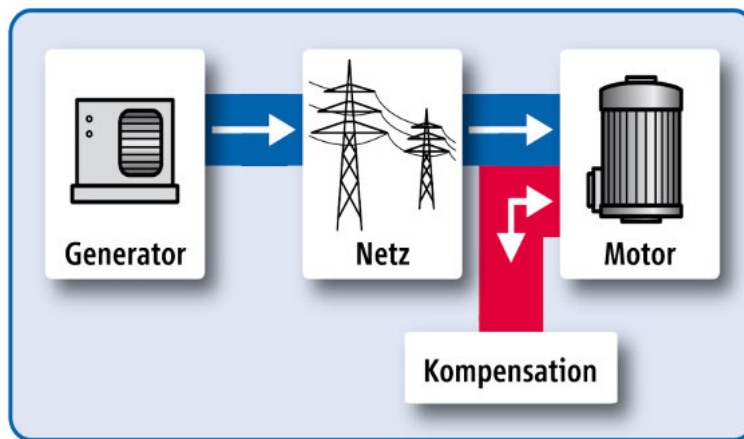


Abbildung 54: Blindleistungskompensation durch kapazitive Last [217]

#### 4.2.2.10 Spannungshaltung

Die Spannungshaltung ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal einer Stromversorgung und sowohl für Übertragungsnetze auf der Höchstspannungsseite als auch für Verteilernetze auf der Nieder- und Mittelspannungsseite relevant [218].

Um den Zusammenhang zwischen der Spannungsstabilität und der Blindleistung herzustellen, sei angemerkt, dass eine kapazitive Phasenverschiebung zu einer Erhöhung, eine induktive Phasenverschiebung zu einer Reduzierung der Netzspannung führt. Eine niedrige Netzspannung kann somit durch das Einspeisen kapazitiver Blindleistung angehoben, eine zu hohe Netzspannung durch die Einspeisung induktiver Blindleistung gesenkt werden. Anders gesagt, so wie die Frequenz durch die Einspeisung und den Bezug von Wirkleistung beeinflusst wird, wirkt sich eine Einspeisung oder der Bezug von Blindleistung auf die Spannungsstabilität aus [211]. Seitens der Netzbetreiber werden unterschiedliche Mechanismen zur Spannungshaltung genutzt. Dazu gehören u. a. regelbare Ortsnetztransformatoren, die sowohl kapazitive als auch induktive Blindleistung bereitstellen können oder auch Blindleistungskompensationsanlagen [218]. Das Ausgleichen von induktiver Blindleistung durch kapazitive Blindleistung oder auch umgekehrt bezeichnet man als Kompensieren [219]. Die einzelnen Mechanismen zur Spannungshaltung sollen in dieser Ausarbeitung nicht genauer erläutert werden, sie verfolgen in der Regel aber alle das Ziel, die Phasenverschiebung in einem Netz zu minimieren und so die Spannung in den zulässigen Grenzen stabil zu halten. Darüber hinaus werden durch die Blindleistungskompensation Erzeugeranlagen und Energieübertragungseinrichtungen entlastet [219].

Es ist noch anzumerken, dass gerade die Nieder- und Mittelspannungsnetze mit steigenden Schwierigkeiten bei der Spannungshaltung durch den zunehmenden Ausbau der EE konfrontiert sind. Dies liegt darin begründet, dass bei den ursprünglich als reine Verteilernetze ausgelegten Ebenen der Nieder- und Mittelspannung keine wesentlichen Einspeisungen vorgesehen waren [218]. Der steigende Ausbau von dezentralen Energieerzeugern innerhalb dieser Netzebenen, zu denen auch ein Großteil der installierten KWK-Anlagen zählt, unterstreicht die Dringlichkeit für die KWK, einen aktiven Beitrag zur Spannungsstabilität leisten zu können.

#### 4.2.2.11 Speicher

Zum Abbau von Erzeugungsspitzen oder großen Differenzen zwischen Erzeugung und Bedarf können zusätzlich zu den oben genannten Optionen Energiespeicher eingesetzt werden. Bei Speichern ist zu unterscheiden zwischen großen, netzrelevanten Speichern, wie z. B. Pumpspeicherkraftwerken, die innerhalb dieser Studie jedoch nicht weiter betrachtet werden, und kleineren Speichern, die direkt an die jeweilige KWK-Anlage gekoppelt sind. Die Verfügbarkeit und Dimensionierung von Speichern hat wesentlichen Einfluss auf die Auslegung und den Betrieb einer KWK-Anlage, da in der Regel immer Zeiten bestehen, in denen die von der Anlage vorgegebene Stromkennzahl, also das Verhältnis von erzeugter Stromleistung zu Wärmeleistung, nicht den aktuellen Bedarfswerten entspricht.

Wärmespeicher werden vornehmlich zur Verlängerung des KWK-Betriebs und damit zur Verringerung des Kesselinsatzes eingesetzt und haben bereits weite Verbreitung erlangt.

Stromspeicher sind bislang weniger verbreitet, was in dem aktuellen Entwicklungsstand einerseits und in den deutlich höheren Kosten im Vergleich zu Wärmespeichern andererseits begründet liegt. Die zukünftige Rolle von Stromspeichern ist auch aktuell Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Technische Optionen zur Strom- und Wärmespeicherung sind detailliert in den entsprechenden Kapiteln „Thermische und elektrische Speichersysteme“ 0 und 2.4 formuliert.

#### 4.2.2.12 Demand Side Integration (DSI)

Unter DSI wird allgemein die Möglichkeit oder Aktion einer Lastverschiebung verstanden. Eine Lastverschiebung kann einerseits durch die Aktivierung von Speicherkapazitäten oder durch Lastanpassung realisiert werden. Innerhalb der DSI wird zwischen Demand-Side-Management (DSM) und Demand-Side-Response (DSR) unterschieden. Unter dem DSM versteht man die direkte Beeinflussung des Energiebedarfs, z. B. das aktive Zu- oder Abschalten von Lasten, wobei die Motivation dafür mittels Teilnahme am Regelenergiemarkt [220] oder durch reduzierte Netznutzungsentgelte [221] erreicht werden kann. Dahingegen zielt das DSR auf die Beeinflussung des Verbrauchsverhaltens mit dynamischen Tarifen bei signifikanter Spreizung zwischen Hochtarifen und Niedertarifen ab. Die prognostizierten DSI-Potenziale in Deutschland sind in folgender Tabelle nach Sektoren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für den Sektor Haushalte in den kommenden Jahren eine deutliche Steigerung des Potenzials prognostiziert wird.

Tabelle 25: DSI-Potenziale in Deutschland [222]

Sektor	Theoretische Potenziale / GW		
	2010	2020	2030
Industrie	4,5	4,5	4,5
GHD	7	11	11
Haushalte	13	18	35
$\Sigma$	24,5	33,5	50,5

### 4.2.2.13 Stromimport/-export

Befindet sich zu viel oder zu wenig Leistung im Netz, besteht ebenso die Möglichkeit, Strom über die Bilanzgrenzen des Übertragungsnetzbetreibers (ÜNB) hinaus zu transferieren oder sogar mit Anrainerstaaten des europäischen Verbundnetzes ENT-SOE auszutauschen. Der Export von elektrischer Energie hat dabei insgesamt deutlich zugenommen. Im Jahr 2014 betrug die von Deutschland ins europäische Ausland exportierte Strommenge ca. 50 TWh wohingegen die importierte Menge mit ca. 18 TWh weitaus niedriger ausfiel. In Abbildung 55 ist der Stromimport und -export nach den beteiligten Staaten aufgeschlüsselt dargestellt.

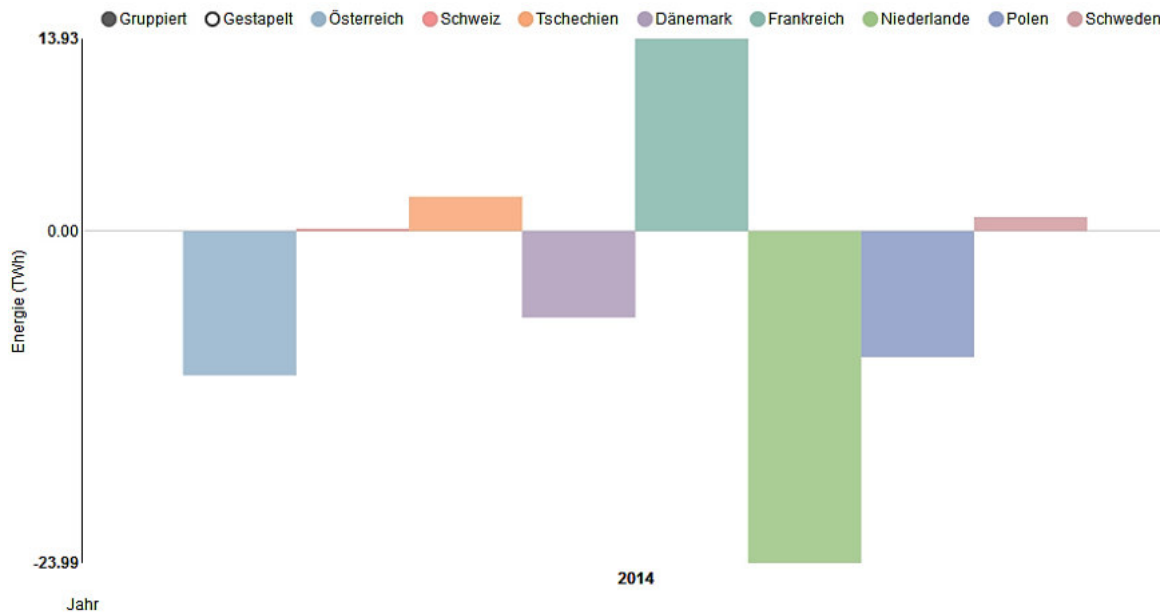


Abbildung 55: Jährlicher Stromimport (positive Werte) und -Export (negative Werte) von Deutschland in 2014 [223]



#### 4.2.2.14 Aktivierung der Regelleistung

Wie in Abschnitt 4.2.2.3 beschrieben, müssen unvorhersehbare Netzschwankungen durch die Aktivierung von Regelleistung kurzfristig ausgeglichen werden. Der Einsatz von Regelleistung erfolgt dabei nach festgelegten Regeln, die im Wesentlichen durch die Mindestangebotsleistung, die Aktivierungsdauer sowie die Dauer der Bereitstellung charakterisiert sind. Kraftwerke, die Regelleistung bereitstellen, werden zuvor vom ÜBN auf diese Kriterien hin überprüft und erhalten eine sogenannte Präqualifikation. Die Mindestangebotsleistung kann dabei auch durch einen Zusammenschluss vieler Kraftwerke (Kraftwerks-Pool) bereitgestellt werden.

In Abbildung 56 ist beispielhaft dargestellt, in welcher zeitlichen Abfolge die entsprechenden Regelleistungsarten abgerufen werden, um eine Frequenzhaltung zu erzielen.

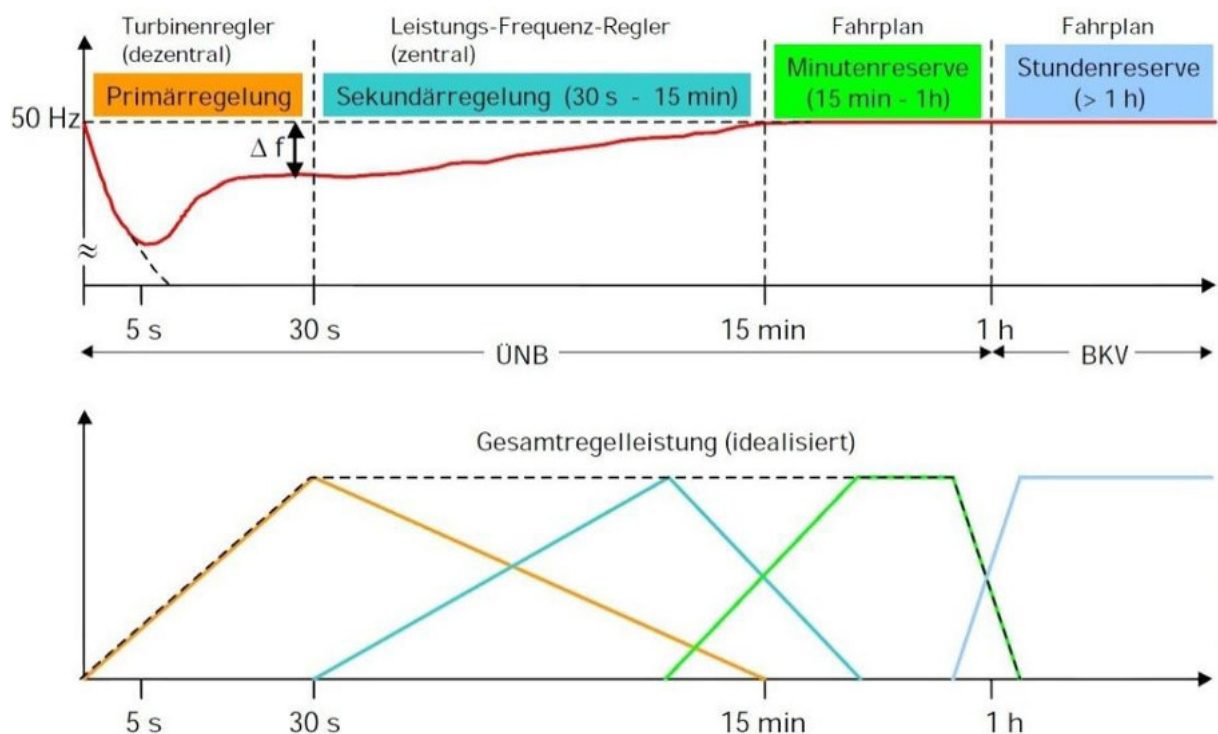


Abbildung 56: Zeitliche Abfolge der Regelleistungsarten [230][229]

#### 4.2.2.15 Redispatch-Maßnahmen

Redispatch bezeichnet die kurzfristige Anpassung der Kraftwerkseinsatzplanung (Dispatch). Kraftwerksbetreiber haben bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (in Deutschland ist 14.30 Uhr des Vortags üblich) einen Fahrplan für ihre Kraftwerke an den Übertragungsnetzbetreiber (ÜBN) zu übermitteln. Nach erfolgter Anmeldung von Fahrplänen wertet der ÜBN die voraussichtliche Netzbelastung aus und korrigiert falls erforderlich die Lastaufteilung durch Anweisung an die Kraftwerksbetreiber, den jeweiligen Fahrplan anzupassen. Redispatch wird nur für Anlagen durchgeführt, deren Nennleistung größer 50 MW ist. Somit kann Redispatch lediglich für große KWK-Anlagen (Gasturbinen, GuD-Kraftwerke und Großmotoren) eine Rolle spielen.

### 4.2.3 Vermarktungsmöglichkeiten

Erst die Vermarktungsmöglichkeit von Energieprodukten bietet Anreize zum Ein- und Ausschalten oder Regeln von Anlagen. Im Folgenden werden die wesentlichen Marktmechanismen kurz erläutert.

#### 4.2.3.1 Strommarkt

Für die Vermarktung von Strom fungiert als zentrale Anlaufstelle die Leipziger Strombörse (EEX). Hier existieren zwei Märkte. Der Terminmarkt ist ausgelegt für langfristige Produkte ( $\geq$  Monate). Er gewährleistet eine sichere Grundversorgung. Der Spotmarkt (Erfüllungsfrist 2 Tage) wird für kurzfristige Produkte genutzt und generiert das Erzeugungsportfolio für den nächsten Tag am Day-Ahead-Handel. Hier werden Gebote platziert, falls sie noch nicht am Terminmarkt platziert werden konnten. Gebote beziehen sich bei den kurzfristigen Produkten nur auf die Grenzkosten (vereinfacht: Brennstoffkosten). Gebote für die Grundlast (Baseload) werden für den gesamten Tag platziert, während Spitzenlast-Gebote (Peakload) kleinere Zeiträume bis hin zu den Einzelstundenkontrakten abdecken (siehe Abbildung 57). Durch vielfältige Möglichkeiten, Stromprodukte zu verschiedenen Zeitpunkten am Termin- und Spotmarkt zu handeln, wird das wirtschaftliche Risiko des Betreibers minimiert.

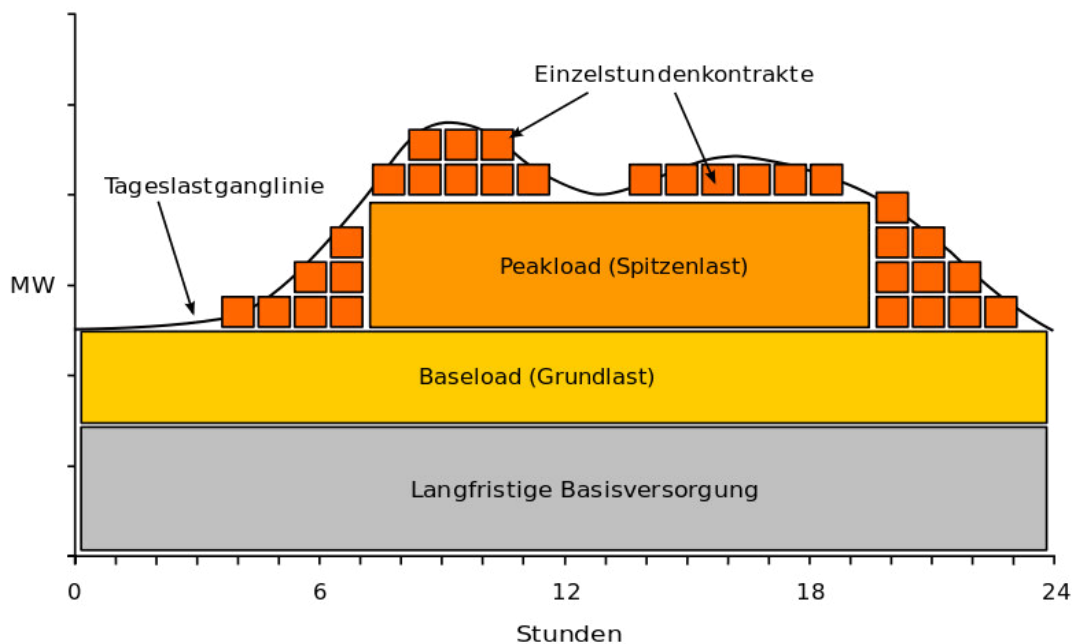


Abbildung 57: Darstellung einer repräsentativen Tageslast [225]

Noch kurzfristigere Geschäfte erfolgen nach Schluss des Day-Ahead-Handels am Intra-Day-Handel, wenn Abweichungen der Last von der Prognose registriert werden, z. B. durch den Ausfall von Kraftwerksblöcken. An der EEX kann das Geschäft bis zu 45 Minuten vor vereinbarter Lieferung abgeschlossen werden, im OTC-Handel<sup>10</sup> sogar bis 15 Minuten vor Lieferung. In Abbildung 58 ist qualitativ der zeitliche Verlauf des Stromhandels dargestellt.

<sup>10</sup> Over-the-Counter-Handel: Handel außerhalb der Börse

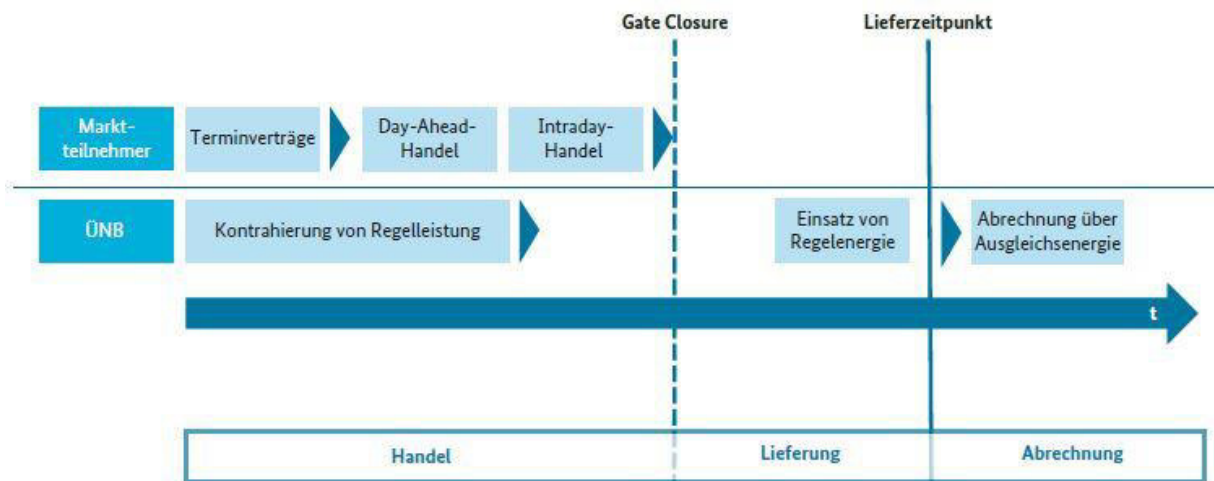


Abbildung 58: Zeitlich qualitative Darstellung der Teilmärkte in Deutschland [160]

In Zukunft wird sich der Strommarkt weiter den Änderungen im Energiesystem anpassen müssen. So sind z. B. kleinteiligere Produkte (1/4-Stunden Takt) ebenso sinnvoll wie die Nähe der Stromerzeugung zum physikalischen Erfüllungsort.

#### 4.2.3.2 Regellenergemarkt

Für die Vermarktung der Regelleistung müssen die Kraftwerksanbieter durch die ÜNB positiv präqualifiziert werden. Die ÜNB geben die Präqualifikationsbedingungen beispielsweise auf deren Homepage ([www.regelleistung.net](http://www.regelleistung.net)) bekannt. Die Vergütung für die Regelleistung erfolgt in Abhängigkeit der Leistung nach dem Leistungspreis oder nach Leistungs- und Arbeitspreis. Tabelle 26 zeigt übersichtlich die Regelleistungsarten sowie deren Einsatzkriterien und Vergütung.

Tabelle 26: Regelleistungsarten und deren Eigenschaften

Regelart	Ausschreibung	Mindestang.	Aktivierung	Zeitscheiben	Vergütung
PRL	wöchentl.	1 MW	<30 sec	< 5 min	LP
SRL	wöchentl.	5 MW	<5 Min	30s < t < 15 min	LP und AP
MRL	tägl.	5 MW	<15 Min	6x4h/Tag	LP und AP

PRL: Primärregelleistung, SRL: Sekundärregelleistung, MRL: Minutenreserveleistung, LP: Leistungspreis (EUR/vorgehaltene Leistung [MW]), AP: Arbeitspreis (EUR/abgerufene Arbeit [MWh])

Bei der Primärregelleistung (PRL) existieren zwei Regelprodukte, positive und negative PRL (Vergütung: nur Vorhaltung; LP). Bei der Sekundärregelleistung (SRL) wird einerseits zwischen positiver und negativer, aber auch zwischen Haupttarif (HT, werktags 8:00 – 20:00 Uhr) und Nebentarif (NT, restliche Zeit) unterschieden. Ein möglicher Abruf erfolgt für 15 Minuten. Hierbei werden Vorhaltung (nur Bereitstellung; LP) und Abruf (tatsächlicher Leistungsfluss; AP) vergütet. Bei der Minutenreserveleistung (MRL) erweitert sich das Angebot pro Tag auf 6 Zeitscheiben, je negativ und positiv, in der bis 4 Stunden MRL erbracht werden muss. Die Preisentwicklung der unterschiedlichen Regelleistungsarten ist in Abbildung 59 für

den Zeitraum 2008 bis 2013 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Primärregelleistung einen vergleichsweise stabilen Verlauf aufweist, wohingegen die Zuschläge für Sekundär- und Minutenregelleistung im gleichen Zeitraum stärkeren Schwankungen unterlagen.

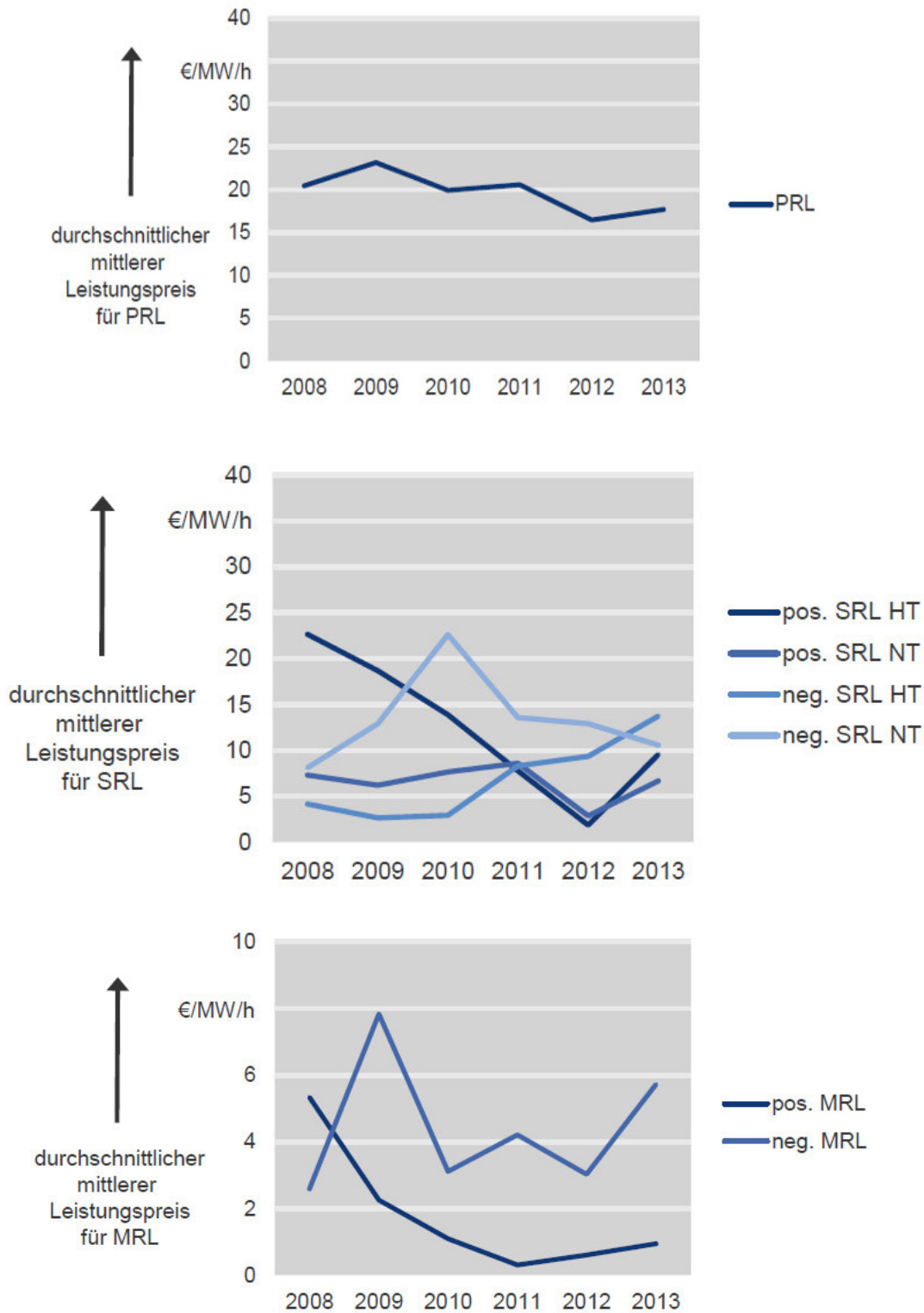


Abbildung 59: Entwicklung des durchschnittlichen mittleren Leistungspreises der bezuschlagten Gebote für PRL, SRL und MRL [226]

### 4.2.3.3 Wärmemarkt

Aufgrund der Tatsache, dass der Wärmebedarf als Endenergieform etwa das 2,5-fache des Strombedarfes in der BRD (dieses Verhältnis ist in NRW ähnlich) darstellt, ist der Energieform „Wärme“ ein hoher Stellenwert zuzurechnen, nicht zuletzt auch wegen der CO<sub>2</sub>-Reduzierungspolitik [227]. Konzepte wie „Power to heat“, die Einbindung von Solar- und Geothermie sowie Wärmepumpen-Konzepte verschaffen dem Wärmemarkt noch mehr Bedeutung. Des Weiteren kann industrielle Abwärme in FW-Netze eingespeist und genutzt werden. Hinzu kommt die zunehmende Bedeutung der Residuallast-Deckung mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien im Strommarkt. KWK kann hierbei eine entscheidende Rolle spielen, da an Wärmenetze angeschlossene KWK-Anlagen in Kombination mit Wärmespeichern flexibel gefahren werden und somit der fluktuierenden Stromproduktion entgegenwirken können. Insgesamt ist demnach mit einem wachsenden Bedarf für einen vernetzten Wärmemarkt in den nächsten Jahren zu rechnen.

Gemäß den Anwendungsbilanzen der AG Energiebilanzen e.V. betrug der Gesamtbedarf an Wärme in der BRD im Jahr 2012 ca. 1.400 TWh [228]. Davon betrug der Anteil der durch KWK erzeugten Wärme laut dem Öko-Institut 205 TWh, also ca. 14 % des Gesamtbedarfs [229]. Das Statistische Bundesamt gibt für die Wärmeversorgung von Endverbrauchern durch Wärmenetze in der BRD einen Wert von 126 TWh (NRW 44 TWh) an, was einem Anteil von ca. 8,8 % des Gesamtbedarfs entspricht [230].

Diese Zahlen zeigen das große Potenzial für Wärme aus KWK sowohl zur direkten Objektversorgung als auch für die Verteilung mittels Wärmenetzen.

### 4.2.3.4 Emissionsrechtehandel

Derzeit sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus thermischen Kraftwerken ab einer Feuerungsleistung von 20 MW mit in den Emissionsrechtehandel einbezogen. Kleinere Anlagen werden nicht mit berücksichtigt, sodass für diesen Teil der KWK-Anlagen eine Betrachtung zurzeit nachrangig ist.

Die CO<sub>2</sub>-Zertifikate-Preise sind seit 2008 stark gesunken und liegen 2014 bei 5 EUR/t CO<sub>2</sub>. Bis 2020 werden aus heutiger Sicht keine Verknappung und eine damit einhergehende Erhöhung der Zertifikate-Preise erwartet, wodurch dieses Instrument zu Steigerung der Anlageneffizienz nur sehr geringe Wirkung zeigt. Erst mittelfristig werden in diesem Szenario die Klimaschutzmaßnahmen verstärkt, und es kommt durch eine Verschärfung des Emissionshandels zu einer Steigerung auf 55 EUR/t CO<sub>2</sub> bis 2035 [164].

## **4.2.4 Fahrweisen und Betriebsstrategieoptionen**

Unter Berücksichtigung aller oben beschriebenen Aspekte, werden unterschiedliche Betriebsstrategieoptionen verfolgt. Betriebsstrategien stellen dabei eine Kombination aus Fahrweisen und der Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten sowie der originären Zielausrichtung des Betreibers dar. Die relevanten Förderbedingungen, wie z. B. das KWKG, beeinflussen in hohem Maße die Wirtschaftlichkeit der Anlagen und werden in einem separaten Kapitel 4.1 näher beschrieben.

### **4.2.4.1 Varianten/Optionen**

Die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten von KWK-Anlagen hat zu teils sehr unterschiedlichen Betriebsstrategien geführt. Um dennoch eine gewisse Allgemeingültigkeit und qualitative Bewertung der Optionen zu erhalten, ist eine Klassifizierung nach verschiedenen Kriterien notwendig. In einer Bewertungsmatrix (Tabelle 27) wird daher in der ersten Ebene nach den vier typischen Leistungsklassen für KWK-Anlagen unterschieden. Weiterhin werden alle Leistungsklassen nach dem Prinzip der Zielausrichtung des jeweiligen Betreibers unterteilt. Schließlich werden alle denkbaren Varianten/Optionen im Hinblick auf die möglichen Fahrweisen bewertet.

### **4.2.4.2 Leistungsklassen**

Die Leistungsklasse bis 10 kW wird als Mikro-KWK bezeichnet, während Mini-KWK-Anlagen in die Leistungsklasse 10 kW bis 50 kW klassifiziert werden. KWK-Anlagen mit einer Leistung von 50 kW bis 2.000 kW werden als Klein-KWK-Anlagen bezeichnet. Anlagen mit mehr als 2.000 kW Leistung werden als große KWK-Anlagen zusammengefasst und umfassen Gasturbinen, GuD-Anlagen sowie Großmotoren (Große BHKW).

### **4.2.4.3 Zielausrichtung**

Als weitere Unterteilung wird die Zielausrichtung des Betreibers bzw. die Aufgabe der KWK-Anlage berücksichtigt. Zwischen der Objektversorgung und der allgemeinen Versorgung wird folgendermaßen unterschieden.

Von Objektversorgung spricht man typischerweise bei der primär KWK-basierten Strom- und Wärmeversorgung von Wohngebäuden, im Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungs-Sektor sowie in Industrieunternehmen. Insbesondere im Bereich der Wohngebäude werden die Anlagen aktuell größtenteils wärmegeführt betrieben. Für die Objektversorgung werden überwiegend KWK-Anlagen der Leistungsklasse Mikro- bis Klein-KWK eingesetzt.

Unter der allgemeinen Versorgung wird im weiteren Verlauf die Versorgung von einer Vielzahl von Verbrauchern verstanden, die im weitesten Sinne an öffentliche Strom- und Wärmenetze angebunden sind. Zur allgemeinen Versorgung werden überwiegend GuD-Anlagen (von Energieversorgern) und in wenigen Fällen Großmotoren (von Stadtwerken) eingesetzt.

#### 4.2.4.4 Konkretisierung der Fahrweisen

Die grundlegenden Fahrweisen werden, wie in Abschnitt 4.2.1.2 beschrieben, in stromgeführt, wärmegeführt und stromorientiert unterteilt. Die stromorientierte Fahrweise wird in der vorliegenden Betrachtung des Weiteren in eigenstromoptimiert, netzorientiert und virtuelles Kraftwerk untergliedert.

Die Fahrweise eigenstromoptimiert ist ausgerichtet auf die möglichst hohe Nutzung des selbst erzeugten Stroms (bei zeitgleicher vollständiger Wärmeabnahme), da zumindest bei größeren KWK-Anlagen zur Objektversorgung die Stromgestehungskosten günstiger sind als der Strombezug aus dem Netz. Eigenstromoptimierte Fahrweisen werden häufig auf Grundlage von Strom- und Wärmebedarfsprognosen beispielsweise basierend auf historischen Daten sowie weiteren Informationen (Wetterdaten etc.) betrieben. Das erfordert die Verarbeitung einer Vielzahl von Informationen, die z. T. in kurzen Zeitintervallen aktualisiert werden müssen. Die Verfügbarkeit dieser Informationen ist eine Voraussetzung, die je nach betrachteter Leistungsklasse teilweise erst noch zu etablieren ist.

Eine netzorientierte Fahrweise ist dann gegeben, wenn die Anlage starke Schwankungen im lokalen Verteilnetz ausgleichen und andere Systemdienstleistungen wie Regelenergie oder Blindleistung bereitstellen kann, um einen Beitrag zur Stabilität und Konstanz der Spannung und Frequenz des Netzes anzubieten. Hierzu ist neben der Erfüllung der technischen Voraussetzungen ebenso eine ständige bidirektionale Kommunikation zwischen der Anlage und z. B. dem Verteilnetzbetreiber oder die einmalige Implementierung eines definierten Fahrplans, der Daten vom Verteilnetzbetreiber enthält, erforderlich. Bei der netzorientierten Fahrweise, die auf der wärmegeführten aufbaut, hat in der Regel die Deckung des thermischen Bedarfs des Objektes weiterhin oberste Priorität.

Wird eine Vielzahl von Energieanlagen über eine Kommunikationsschnittstelle gekoppelt und in ein Lastmanagementsystem, z. B. eines Energieversorgers, eingebunden, so spricht man von einem virtuellen Kraftwerk. Das übergeordnete Ziel ist der möglichst wirtschaftliche Betrieb der Energieerzeugung (Bestpreisvermarktung). Hierbei kann die einzelne Anlage im Objekt den lokalen Bedarf, bei KWK-Anlagen insbesondere den Wärmebedarf, decken. Zusätzlich können virtuelle Kraftwerke als Teil eines Pools Systemdienstleistungen, wie z. B. Regelenergie anbieten. In diesem Fall ordnet sich die Fahrweise der einzelnen Anlagen dem Fahrplan des virtuellen Kraftwerkes unter. Durch die verbrauchsnahe redundante Struktur und die übergeordnete gebündelte Steuerung der Anlagen wird die Versorgungssicherheit erhöht. Allerdings ist hierfür ein hoher Aufwand für die Installation der Kommunikationsstruktur notwendig. Virtuelle Kraftwerke sind typischerweise im Niederspannungsnetz angesiedelt.

Bei der Objektversorgung kann es in Ausnahmefällen vorteilhaft oder nötig sein, eine stromgeführte Fahrweise anzuwenden. Der Betreiber ist sich in dem Moment bewusst, dass die Anlage teilweise oder gänzlich vom KWK-Betrieb abweicht. Förderrechtliche Konsequenzen, wie z. B. der Wegfall des KWK-Zuschlags nach KWKG, werden in Kauf genommen. Im Sinne der Kraft-Wärme-Kopplung sollte diese Fahrweise nur temporär oder partiell, d. h. für kurze Laufzeiten oder einen kleinen Anteil der Gesamtleistung angewendet werden.

#### 4.2.4.5 Resultierende Betriebsstrategien

Mikro-KWK-Anlagen zeichnen sich durch den Einsatz in Objekten zur Wärmebereitstellung mit zusätzlicher Stromproduktion aus, unterliegen daher in der Regel einer wärmegeführten oder stromorientierten Fahrweise. Eine rein stromgeführte Fahrweise ist als eher nachteilig zu werten und weist eine niedrige Relevanz auf. Eine Eigenstromoptimierung kann dann als positiv anwendbar eingestuft werden, wenn Vorhersagemechanismen, wie z. B. Wetterprognosen oder Strombedarfsprofile, in den Betrieb mit einbezogen und durch eine angepasste Fahrweise und/oder den Einsatz von Stromspeichern zusätzliche Erlöse durch Erhöhung der Stromeigennutzungsquote erzielt werden können.

Eine netzorientierte Fahrweise wird in diesem Leistungsbereich derzeit nicht angewendet, da derart kleine Anlagen alleine nicht die nötigen Voraussetzungen zur Erbringung von Netzdienstleistungen erfüllen können. Der Zusammenschluss von vielen Mikro-KWK-Anlagen als virtuelles Kraftwerk kann prinzipiell schon heute einen - wenn auch kleinen - Beitrag in diesem Zusammenhang leisten. Aus Sicht des Objektbesitzers bietet die Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk die Option zusätzliche Erlöse (z. B. durch Contractingmodelle) einzufahren.

Dass die Integration von Mikro-KWK-Anlagen in das elektrische Versorgungsnetz zukünftig jedoch sinnvoll und notwendig ist, zeigen detaillierte Betrachtungen und aktuelle Forschungsvorhaben [232]–[235].

Die anwendbaren Betriebsstrategien für Mini-KWK-Anlagen entsprechen in weiten Teilen denen von Mikro-KWK-Anlagen, wobei insbesondere durch Zusammenschluss vieler Mini-KWK-Anlagen durchaus Gesamtkapazitäten erreicht werden, die eine Relevanz in Bezug auf Netzdienstleistungen aufweisen, wodurch der netzorientierte Betrieb an Bedeutung gewinnt.

Die Betriebsstrategien für Klein-KWK-Anlagen weisen gegenüber den vorherigen einen anderen Charakter auf. So wird deutlich, dass tendenziell die Rolle dieser Anlagen für die Systemdienstleistung oder für die allgemeine Versorgung eine zunehmende Relevanz aufweist. Das kann zu gegenläufigen Zielrichtungen beim Betrieb von gleichartigen Anlagen führen und eine pauschale Bewertung erschweren. Zum einen kann für die allgemeine Versorgung die Notwendigkeit der Wärmeversorgung zu einer rein wärmegeführten Fahrweise führen (Quartierslösung/Nahwärmenetz). Zum anderen finden sich Beispiele für einen stromgeführten Betrieb. Aufgrund von hohen elektrischen Wirkungsgraden und der Stromversorgung von Objekten oder vernetzten Verbrauchern kann in Situationen mit verminderter Wärmebedarfsanforderung (Sommermonate) auf die Option der Zwangskühlung zurückgegriffen werden. Somit bieten KWK-Anlagen dieser Leistungsklasse ein äußerst breit gefächertes Anwendungspotenzial, was sich auch in der hohen Stückzahl realisierter Anlagen widerspiegelt.

Die Betriebsstrategien für große KWK-Anlagen (> 2 MW) können im Wesentlichen gemäß ihrer Zielausrichtung in zwei Bereiche unterteilt werden. Bei Industrieanlagen ist die Betriebsstrategie von der Strategie des Unternehmens abhängig. Demnach können solche Anlagen sowohl strom- als auch wärmegeführt oder stromorientiert gefahren werden, wobei die Anbindung an ein Stromnetz eher als die Anbindung an ein Wärmenetz gegeben ist. Weiterhin können solche Anlagen auch den Bedarf des Betriebes an Prozesswärme decken. Im Hin-



blick auf eine Gesamtbetriebsstrategie sind diese Anlagen als Anlagen zur Objektversorgung zu betrachten und werden auch so in den Bewertungsszenarien behandelt.

Bei großen KWK-Anlagen der allgemeinen Versorgung ist die Betriebsstrategie in erster Linie abhängig von den erzielbaren Erlösen durch die Vermarktung von Strom und Wärme. Maßgeblich ist in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Strombereitstellungskosten zu den aktuellen durchschnittlichen Strompreisen. Die KWK-Förderlandschaft, insbesondere das KWKG, hat hierdurch einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsstrategie.

#### 4.2.4.6 Zusammenfassung

Die Betrachtungen zeigen insgesamt, dass die Wahl einer geeigneten Betriebsstrategie von vielen Faktoren abhängt und dass auch keine eindeutige Empfehlung zur Wahl der richtigen Strategie getroffen werden kann. Durch die zusammenfassende Bewertung in der folgenden Matrix (Tabelle 27) soll daher zum einen die Vielfalt der Optionen dargestellt werden. Zum anderen soll qualitativ gekennzeichnet werden, welche praktische Relevanz die Fahrweisen aus heutiger Sicht haben können, welche Fahrweisen also für die jeweilige Leistungsklasse und Zielausrichtung besonders vielversprechend sind oder bereits erfolgreich angewendet werden. Die Einstufungen sind als Tendenzen zu verstehen, da eine scharfe Abgrenzung sowohl der Leistungsklassen als auch der Zielausrichtung kaum möglich ist und auch gleichartige Anlagen - wie beschrieben - mit völlig gegenläufigen Strategien betrieben werden können.

Tabelle 27: Praktische Relevanz der Fahrweisen in Abhängigkeit von Leistung und Zielausrichtung

Leistungsklassen / kW			Zielausrichtung		stromgeführt	eigenstrom-optimiert	stromorientiert	virtuelles Kraftwerk	wärmegeführt
							netzorientiert		
Mikro-KWK	1 - 10	Objektversorgung allgemeine Versorgung							
Mini-KWK	10-50	Objektversorgung allgemeine Versorgung							
Klein-KWK	50 – 2.000	Objektversorgung allgemeine Versorgung							
GuD, Großmotor	> 2.000	Objektversorgung allgemeine Versorgung							

Legende: Praktische Relevanz	
	hoch
	mittel
	niedrig
	nicht relevant

Eine Detaillierung der Betrachtung, insbesondere im Hinblick auf wirtschaftliche Aspekte für ausgewählte Objekte, erfolgt in Kapitel 5. Hierin werden Bewertungsgrundlagen definiert, Berechnungsmodelle erarbeitet und Beispielrechnungen durchgeführt.



## 5 Modelle zur Bewertung

*Für die ökologische, energetische und wirtschaftliche Analyse unterschiedlicher Anlagenkombinationen und Betriebsweisen von KWK-Systemen wurde eine Bewertungsgrundlage erarbeitet. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt durch die Annuitätenmethode nach VDI-Richtlinie 2067 [236]. Zur ökologischen und energetischen Bewertung von KWK-Systemen wurde ein bilanzielles Verfahren entwickelt. Die Analyse der ökologischen Aspekte fokussiert dabei die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung. Die energetische Analyse ergänzt diesen Ansatz um die Ermittlung des Primärenergiebedarfs. Als wissenschaftliche Grundlage dafür wurden die relevanten Einflussparameter (spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiefaktoren) für die Bezugsregionen NRW und Deutschland im Rahmen einer Literaturrecherche erarbeitet.*

*Die erstellte Bewertungsgrundlage ist in die Detailanalyse von KWK-Systemen für ausgewählte Objekte eingeflossen. Dazu wurde der Betrieb von KWK-Anlagen in Beispielobjekten aus dem GHD- und dem Wohngebüdesektor simuliert. Das dazu erstellte Excel-Tool wurde anhand der Software EnergyPro® validiert. Anschließende Analysen zeigen, dass der GHD-Sektor ein rentables Anwendungsgebiet für den Einsatz von KWK-Anlagen sein kann, besonders wenn ein konstant hoher Strombedarf, ein konstanter Wärmebedarf im Sommer und ein kleines Verhältnis von Jahreswärme- zu Jahresstrombedarf vorliegen. Für den GHD-Sektor und die betrachteten motorischen Anlagen haben die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades und die Erhöhung des Strompreises den größten positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit. Die Analysen von Brennstoffzellenheizgeräten in Wohngebäuden unterschiedlichen Sanierungsstandes zeigt hingegen eine überwiegende Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von den Investitionskosten.*

*Eine Option zur Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils – ein zentraler Parameter zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen – ist die Integration von Stromspeichern. Die Bewertung elektrischer Speicher erfolgte auf Basis einer entwickelten dynamischen energiebilanziellen Simulation mit MATLAB® Simulink®. Die generierten zeitlich aufgelösten Analysen der Speicherladezustände ermöglichen qualitative Aussagen zur Korrelation der KWK-, Speicher- und Objekteigenschaften. Neben Langzeitenergiespeichern sowie variablen KWK-Stromkennzahlen stellt auch die Erweiterung der systemischen Modulationsfähigkeit eine Möglichkeit zur Optimierung des KWK-Stromnutzungsverhaltens dar. Die Entwicklung einer stromspeicherorientierten Regelungsstrategie im Hinblick auf eine optimierte Verknüpfung aller Teilsysteme wurde als ein zentraler Forschungsaspekt identifiziert.*

## 5.1 Bewertungsgrundlagen

Zur Bewertung der unterschiedlicher Anlagenkombinationen und Betriebsweisen von KWK-Systemen ist eine entsprechende Grundlage zu schaffen. Die Definition der relevanten Parameter und Bewertungsmethoden ist für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unabdingbar. Die Grundlagen sind zum einen auf die ökonomische Bewertung (Amortisationszeit, Vergleich zur getrennten Erzeugung) und zum anderen auf die ökologische und energetische Bewertung ausgerichtet (CO<sub>2</sub>-Einsparung, Primärenergiebedarf).

Für einen repräsentativen Vergleich mit konventionellen Energieerzeugern ist eine Benchmark-Grundlage zu erstellen. Dazu werden drei konventionelle Alternativsysteme definiert, siehe Tabelle 28.

Tabelle 28: Referenzsysteme zur Bewertung von KWK-Anlagen

	Strombereitstellung	Wärmebereitstellung
<b>Referenz 1</b>	Strom-Mix BRD	Niedertemperaturkessel mit Erdgas (BRD)
<b>Referenz 2</b>	Strom-Mix NRW	Niedertemperaturkessel mit Erdgas (NRW)
<b>Referenz 3</b>	Strom-Mix NRW	Niedertemperaturkessel mit Heizöl

Für die konventionelle Strombereitstellung werden zum einen der deutsche Strom-Mix und zum anderen der Strom-Mix in NRW angenommen. Als Referenz für die Wärmebereitstellung dienen erdgasbetriebene Niedertemperaturkessel, da diese den Bestand derzeit dominieren [47].

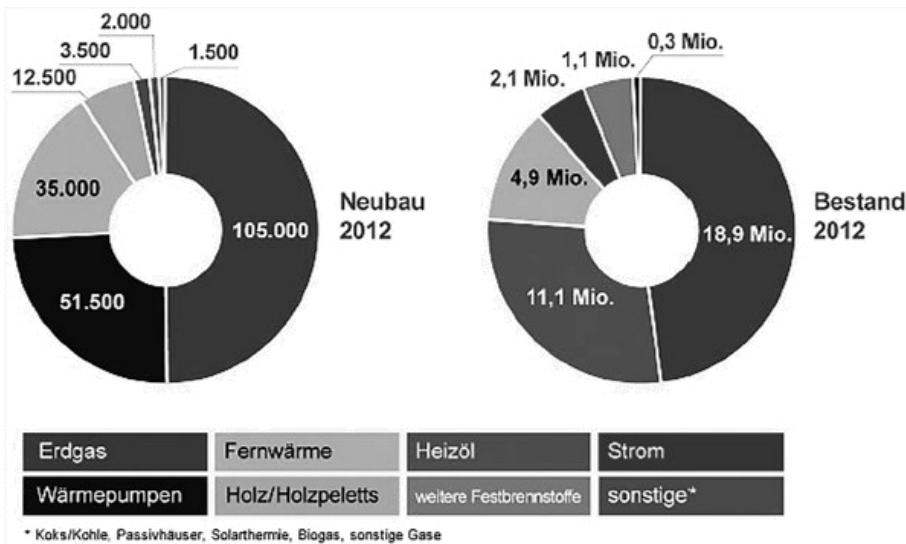


Abbildung 60: Wohnungen im Bestand und Neubau 2012 [237]

### 5.1.1 Wirtschaftliche Bewertung

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt durch eine allgemeine Methode auf Basis der Richtlinie VDI 2067 [236]. Diese behandelt die Berechnung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen und gilt für alle Gebäudearten. Bei dem Ansatz handelt es sich um eine Annuitätenmethode, welche auf der Verteilung der Kosten über die Anlagenlebensdauer basiert. Ebenfalls werden die Verzinsung und Preissteigerungen berücksichtigt.

Die wirtschaftliche Bewertung von erdgasbasierten KWK-Anlage wird durch folgende Kostenarten bestimmt:

- Kapitalgebundene Kosten
  - Investitionskosten für Wärmeerzeuger und Speicher, Elektroinstallation, Gasanschluss, Schornstein sowie Einbindung ins Heizsystem
- Verbrauchsgebundene Kosten und Erlöse
  - Gasverbrauch
  - Elektrische Hilfsenergie
  - Förderung pro kWh (Grundvergütung, KWK-Bonus etc.)
  - Substitution von Energiebezugskosten durch KWK-Eigennutzung
- Betriebsgebundene Kosten für Instandhaltung
  - Betriebsmittel (je nach KWK-Technologie z. B. Öl)
  - Wartung
  - Schornsteinreinigung

Des Weiteren ist die Ermittlung der Amortisationszeit erforderlich, welche durch die im Folgenden genannten Parameter beeinflusst wird.

- Technische Lebensdauer
- Prognostizierte Laufzeit
- Kalkulationszins
- Annuitätenfaktor
- Preissteigerung

## 5.1.2 Ökologische und Energetische Bewertung

Die ökologische und energetische Bewertung der KWK-Systeme erfolgt auf Basis einer bilanziellen Betrachtung. Die Analyse der ökologischen Aspekte fokussiert dabei die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung. Die energetische Analyse ergänzt diesen Ansatz um die Ermittlung des Primärenergiebedarfs.

### 5.1.2.1 Energetische Bewertung

Bei der Bewertung der energetischen Effizienz eines Systems werden prinzipiell zwei Methoden unterschieden. Zum einen wird der Wirkungsgrad  $\eta$  (elektrisch, thermisch) genutzt, um die Energieeffizienz des Systems zu beschreiben. Hierbei handelt es sich um ein stationäres Verhältnis von Nutzen und Aufwand. Im Bereich der Energietechnik bezieht sich der Wirkungsgrad auf einen definierten Lastpunkt, welcher i. d. R. dem Nennlastpunkt entspricht. Durch die Ermittlung der Wirkungsgrade in unterschiedlichen Lastpunkten werden entsprechende Wirkungsgradkennfelder für KWK-Anlagen ermittelt. Des Weiteren kann die energetische Bewertung eines Systems auf Basis seines Nutzungsgrades  $\bar{\eta}$  erfolgen, um dynamische Einflüsse abzubilden. Dieser gibt das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand über einen definierten Zeitraum an. Üblicherweise beträgt der gewählte Zeitraum ein Jahr, woraus sich der sogenannte Jahresnutzungsgrad ergibt. Auf diese Weise wird das Verhalten des Systems einschließlich der Teillastzustände und Anfahrvorgänge abgebildet.

### 5.1.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissions- und -Einsparungsbewertung

Die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. der entsprechenden Einsparung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber den Referenzsystemen ist primär von den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die verschiedenen Energieträger und -formen abhängig. Diese sind in Tabelle 29 angegeben. Die veranschlagten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Strom- und Wärmebereitstellung für die weiterführenden Untersuchungen zur „Analyse von KWK-Techniken für ausgewählte Objekte“ (Absatz 5.2) sind grau hinterlegt. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit ist zu berücksichtigen, dass sich die Literaturangaben auf unterschiedliche Jahrgänge beziehen.

In der entsprechenden Fachliteratur werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strom-Mixes auf unterschiedliche Energiemengen bezogen. Stromseitig werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen zum einen auf die Endenergie der Stromerzeugung und zum anderen auf die dem Endverbraucher zur Verfügung stehende Nutzenergie umgerechnet.

Angaben bezüglich der wärmeseitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen beziehen sich hingegen stets auf die Endenergie der jeweiligen Energieträger. Um eine vergleichbare Größe zur stromseitigen Emission bezogen auf die Nutzenergie zu erhalten, ist die Umrechnung in Abhängigkeit des Nutzungsgrades des Wärmeerzeugers erforderlich. Dies ist unter Annahme des Niedertemperaturkessels als Referenz weiterhin stark abhängig vom Alter des Heizsystems.

Die Nutzungsgrade aktueller Niedertemperaturkessel, welche als Referenzsystem zur Wärmebereitstellung dienen, bewegen sich in einem Rahmen von 82 % bis 94 % (s. Kapitel 2.2.2).

Tabelle 29: spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen

Energieträger und -formen	Spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen [g/kWh]	Bezugsjahr
Erdgas <sup>11</sup>	241	2014 [238]
	201,6	2012 [239]
	202	2013 [240]
	201,6	2014 [241]
Heizöl (leicht)	313	2014 [238]
	266,4	2012 [239]
	266	2010 [242]
Strom-Mix BRD	617 <sup>12</sup>	2014 [238]
	559 <sup>13</sup>	2013 [240]
Strominlandsverbrauch BRD	595 <sup>14</sup>	2013 [240]
Strom-Mix NRW	857,2	2012 [243]

<sup>11</sup> Erdgas-Zusammensetzung BRD und NRW wird als gleich angenommen.

<sup>12</sup> Bezogen auf Endenergie der Stromerzeugung.

<sup>13</sup> Bezogen auf Nutzenergie die dem Endverbrauch netto zur Verfügung steht.

<sup>14</sup> Bezogen auf den inländischen Stromverbrauch abzüglich des Stromhandelssaldos.

### 5.1.2.3 Primärenergetische Bewertung

Die Ermittlung und der Vergleich des Primärenergiebedarfs der Referenz- und KWK-Systeme erfolgt unter Berücksichtigung der spezifischen Primärenergiefaktoren für die verschiedenen Energieträger und -formen. Diese sind in Tabelle 30 gelistet. Im Rahmen der folgenden „Analyse von KWK-Techniken für ausgewählte Objekte“ (Absatz 5.2) wird der Primärenergiefaktor von Erdgas zu 1,1 und der des Strom-Mixes BRD zu 2,4 angenommen. Diese Werte sind in Tabelle grau hervorgehoben.

Tabelle 30: spezifische Primärenergiefaktoren

Energieträger und -formen	Primärenergiefaktoren
Erdgas <sup>15</sup>	1,1 [244]
Heizöl	1,1 [244]
Strom-Mix BRD	2,4 [245]
Verdrängungsstrommix KWK	2,8 [244]
Nah-/Fernwärme aus KWK <sup>16</sup>	0,7 [244]

### 5.1.2.4 Exergetische Bewertung

Zur ökologischen und energetischen Bewertung von KWK-Anlagen werden zunehmend exergetische Methoden angewandt. Die Nutzung der Exergie als Bewertungsgröße ermöglicht zusätzliche Aussagen über das theoretisch verwertbare Arbeitspotenzial eines Energie- oder Stoffstroms. Im Rahmen der Bewertung von KWK-Systemen ist die Exergieanalyse thermischer Ströme von besonderer Bedeutung, da die elektrischen Ströme unabhängig vom Erzeugungssystem identisch sind.

Als Exergie wird die maximale, theoretisch nutzbare Arbeit (mechanische oder elektrische Arbeit) eines thermodynamischen Systems verstanden, welche erreicht wird, wenn das System in vollständiges thermodynamisches Gleichgewicht mit seiner thermodynamischen Umgebung gebracht wird und dabei ausschließlich mit dieser Umgebung interagiert [81].

Die exergetische Bewertung von KWK-Systemen als Hocheffizienztechnologie fokussiert die effiziente Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Exergie. Diese Methode bewertet die Qualität der Koppelprodukte Strom und Wärme mithilfe des Exergiegehalts. Strom wird mit einem Exergiegehalt von 100 % bewertet. Die Wertigkeit der Wärmeauskopplung ergibt sich aus ihrem Temperaturniveau. Zur Bestimmung des Exergiegehalts der Wärme wird der Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$  berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung des exergetischen Bewertungsansatzes ist in [246], [247] publiziert, die auf den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung angewendet werden kann.

<sup>15</sup> fossil, bei Gaszumischung aus erneuerbaren Energien reduziert sich der PE Faktor.

<sup>16</sup> für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.

## 5.2 Analyse von KWK-Techniken für ausgewählte Objekte

Aufbauend auf den vorangegangenen Arbeiten sollen in diesem Arbeitspaket der Betrieb von KWK-Anlagen in konkreten Objekten simuliert, die Wirtschaftlichkeit geprüft und die CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparungen berechnet werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Analysen nur für das jeweilige Objekt zutreffend sind. Darüber hinaus können lediglich qualitative Hinweise auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse bzw. Trends für vergleichbare Objekte gegeben werden.

### 5.2.1 Methodisches Vorgehen

Für die mögliche Strom- und Wärmeversorgung der betrachteten Objekte werden jeweils eine Anzahl verfügbarer KWK-Anlagen mit wärmegeführter Fahrweise gemäß Kapitel 4.2.4 betrachtet und die Ergebnisse verglichen. Die Analyse der Wirtschaftlichkeit erfolgt dabei auf Basis der Richtlinie VDI 2067, siehe Kapitel 5.1.1. Zur ökologischen Bewertung werden die CO<sub>2</sub>- und die Primärenergieeinsparung mit dem Referenzsystem der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom (Kapitel 5.2.1.5) verglichen. Für den jeweils wirtschaftlichen Best-Case werden im Anschluss detaillierte Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um Auswirkungen von Veränderungen der wesentlichen Einflussparameter Investitions-, Energie- und Wartungskosten sowie einer Effizienzsteigerung der KWK-Anlagen zu untersuchen und zu bewerten.

#### 5.2.1.1 Tools

Die Berechnungen werden zum einem mit einem selbst entwickelten Excel-Tool und zum anderen einen mit EnergyPro<sup>®</sup> durchgeführt. Dieses Vorgehen ist darin begründet, dass bei der Nutzung von kommerzieller Software eine Unkenntnis über die genauen Berechnungsschritte und Entscheidungsgrenzen vorliegt und nur begrenzt Einfluss genommen werden kann. Darüber hinaus dient der Vergleich mit EnergyPro<sup>®</sup> der Validierung der Ergebnisse des Excel-Tools.

#### Excel-Tool

Das Excel-Tool wurde im Rahmen dieses Projektes ausgebaut und soll auch in nachfolgenden Projekten konsequent weiterentwickelt werden. Dabei sind die Nachvollziehbarkeit der Berechnungen, die Vorgabemöglichkeit der Anlagen-Fahrweise und die einfachere Möglichkeit der Durchführung von Sensitivitätsanalysen wesentliche Vorteile gegenüber kommerzieller Software, wie EnergyPro<sup>®</sup>.

Zentrale Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit und die CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparungen sind die Kombination aus KWK-Anlage und thermischer bzw. elektrischer Speicher sowie die Anwendung entsprechender Betriebsstrategien. Hier bietet das Tool die Option, die in Kapitel 4.2.4 und im Anhang A8 beschriebenen Fahrweisen wärmegeführt, stromgeführt und stromorientiert auszuwählen. Entsprechend der Auswahl wird stundenscharf entschieden, ob das BHKW betrieben werden kann oder nicht. Weitere Informationen zu dem Excel-Tool und den implementierten Fahrweisen sind im Anhang zu finden.



## **EnergyPro<sup>®</sup>**

EnergyPro<sup>®</sup> ist eine kommerzielle Software der Firma EMD International A/S zur Auslegung, Simulation und Analyse von Energieversorgungssystemen. Liegen keine genauen Lastgänge für ein Anwendungsobjekt vor, kann mit Hilfe der Außentemperaturverteilung oder durch Standardlastprofile unter Berücksichtigung des Jahresgesamtverbrauchs von Strom und Wärme der jeweilige Lastgang erzeugt werden.

### **5.2.1.2 Eingangsgrößen**

#### **Objektdaten**

Die objektspezifischen Eingangsgrößen sind die Strom- und Wärmebedarfsprofile auf Stundenbasis. Diese liegen entweder als erhobene Daten vor (gilt für den GHD-Sektor) oder werden auf Basis der Richtlinie VDI 4655 in Kombination mit verfügbaren Jahresverbrauchswerten ermittelt (gilt für den Wohngebäude-Sektor).

#### **KWK-Anlagen-Kenndaten**

Die technischen Eingabeparameter sind die Kenndaten der gewählten KWK-Anlage (elektrische Leistung, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad) sowie die Kapazitäten des Wärmespeichers und des optionalen Stromspeichers. Die Wärmespeicher werden derart dimensioniert, dass die maximale thermische Leistung des BHKW für zwei Stunden bei einer Temperaturspreizung von 40 K zwischengepuffert werden kann. Für das Einfamilienhaus wurde, unabhängig von der Heizleistung, eine Speichergröße von 300 L und für das Mehrfamilienhaus 1000 L angenommen [248].

#### **Investitions- und Wartungskosten**

Wirtschaftliche Eingangsgrößen sind die Anlagen- und Speicher-spezifischen Investitions- und Wartungskosten. Für verbrennungsmotorische KWK-Anlagen werden sowohl die Investitionskosten als auch die Wartungskosten in Abhängigkeit der elektrischen Leistung auf Basis der "BHKW-Kenndaten 2014/2015" der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) [19] angesetzt. In diesen Investitionskosten sind neben den Modulkosten ebenfalls sämtliche Kosten für den Transport bis hin zur Abnahme und für die Einbindung in das Objekt enthalten, wobei es sich hier um Durchschnittswerte handelt, die je nach Objekt stark variieren können. Für die Bewertung von Brennstoffzellenheizgeräten oder Mikro-Gasturbinen sind die Investitionskosten individuell festzusetzen. Bei den angesetzten Investitionskosten handelt es sich für den GHD-Sektor und das Mehrfamilienhaus (Wohnungswirtschaft) um Kosten ohne MwSt., während für die Einfamilienhäuser die Kosten inkl. MwSt. angegeben sind. Die Investitionskosten für die Wärmespeicher wurden gemäß (Kapitel 2.3.1) „sensible Wärmespeicher“ ermittelt.

#### **Finanzierungskosten**

Ein weiterer wirtschaftliche Parameter sind die Finanzierungskosten. In den untersuchten Fällen wurde eine reine Fremdfinanzierung mit einem Zinssatz von 3,35 % p.a. bei einer Laufzeit von zehn Jahren angesetzt.

## **Energiekosten**

Für eine realitätsnahe Abbildung der Energiekosten wurden reale Strom- und Gaspreise der Stadtwerke Duisburg AG unter Berücksichtigung der Gesamtverbrauchswerte der Objekte verwendet. Diese teilen sich in einen jährlichen Grundpreis für den Anschluss und einen spezifischen Arbeitspreis auf und sinken mit steigendem Bezug der Objekte.

### **(Förder-) Rechtliche Rahmenbedingungen**

Weiterhin werden die (förder-) rechtlichen Rahmenbedingungen, wie der KWK-G-Zuschlag und die Förderung von Wärmespeichern, standortabhängige Netznutzungsentgelte (0,51 Ct/kWh<sub>el</sub>), die EEG-Umlage (6,17 Ct/kWh<sub>el</sub> Stand Februar 2015) und der aktuelle "übliche Preis" für eingespeisten Strom aus KWK-Anlagen (3,21 Ct/kWh<sub>el</sub> Stand erstes Quartal 2015) berücksichtigt. Schließlich wurden als Investitionszuschüsse sowohl das Mini-KWK-Impulsprogramm als auch das progres.NRW Programm angesetzt.

### **5.2.1.3 Berechnungsvorschrift oder -Ablauf**

Unter Berücksichtigung der KWK-Anlagen-Kenndaten, der Strom- und Wärmebedarfsprofile des Objektes und der freien Kapazitäten in den Speichern wird stundenscharf über den Betrieb der Anlage entschieden, was zu einer jährlichen Volllaststundengesamtzahl führt. Mit Hilfe dieses Wertes lassen sich die jährlichen Strom- und Wärmeerzeugungsmengen bestimmen. Des Weiteren wird bei der Stromnutzung durch den stundengenauen Abgleich zwischen Stromerzeugung und Strombedarf unterschieden, ob der erzeugte Strom im Objekt selbst verbraucht, ggf. im Stromspeicher gespeichert oder in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit werden für jedes Jahr (Betrachtungszeitraum bei allen bewerteten Objekten liegt bei zehn Jahren) die Summe aus vermiedenen Kosten und den Erlösen durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme den jährlich anfallenden Kosten im Verhältnis zum Referenzsystem gegenübergestellt.

Bei den vermiedenen Kosten handelt es sich um Wärmeerlöse, substituierten Stromeinkauf sowie Erdgassteuererstattung; die tatsächlichen Erlöse bilden der Zuschlag gemäß Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-G), der übliche Preis für den eingespeisten Strom sowie das Entgelt für die vermiedene Netznutzung. Dem gegenüber stehen Kosten für den Brennstoffeinsatz in der KWK-Anlage, deren Wartungskosten, die EEG-Umlage auf den selbst verbrauchten Strom sowie die Kapitalkosten. Durch die Differenz von Kosten und Erlösen werden für jedes Jahr im Betrachtungszeitraum die Überschüsse berechnet. Diese werden mit einem konservativ abgeschätzten Kalkulationszinssatz in Höhe von 10 % abgezinst, um die barwertigen Rückflüsse zu bilden, die in der Zukunft anfallen und für die Berechnung des Kapitalwertes benötigt werden. Mit Hilfe dieser Größe ist abschließend die dynamische Amortisationszeit der KWK-Anlage zu bestimmen, die in der Praxis ein gängiges Entscheidungskriterium zur Umsetzung einer solchen Anlage ist.

#### 5.2.1.4 Ausgabegrößen

Technische Ausgabemöglichkeiten in beiden Tools sind alle relevanten Kenngrößen wie Betriebsstunden, jährliche Energieerzeugung etc. Energieverläufe und Speicherfüllstände werden grafisch dargestellt, wobei eine Darstellung mit einer Auflösung von 365 Tagen bis hin zu einem Tag in Stundenintervallen möglich ist.

Wirtschaftliche Ausgabegrößen sind die Stromgestehungskosten und abhängig vom Anwendungsfall der Kapitalwert nach 10 Jahren für die gewerbliche Nutzung oder der kumulierte Deckungsbeitrag nach zehn Jahren für den privaten Anwendungsfall. Die dynamische Amortisationszeit wird nur vom Excel-Tool berechnet.

Die Stromgestehungskosten berechnen sich durch die Differenz aus Kapitalkosten, Brennstoffkosten, Wartungskosten sowie der EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch mit den Wärmeerlösen (BHKW-Wärme dividiert durch den Kesselwirkungsgrad multipliziert mit den Brennstoffkosten), dem KWK-G-Zuschlag und der Erdgassteuererstattung.

Der kumulierte Deckungsbeitrag nach 10 Jahren gibt die Differenz von Erlösen und Kosten unter der Berücksichtigung der Investition an. Die Kosten umfassen hierbei neben den variablen Kosten ebenfalls fixe Kosten sowie Kapitalkosten. Eine Diskontierung der zukünftigen Zahlungen findet im Unterschied zum Kapitalwert nicht statt. Häufig wird der so definierte Deckungsbeitrag (Berücksichtigung direkter und indirekter sowie Finanzierungskosten) als DB 3 bezeichnet.

Der Kapitalwert (in diesem Fall nach zehn Jahren) ist eine Kenngröße, um die Vorteilhaftigkeit einer Investition zu bewerten. Er beinhaltet den auf den Planungszeitpunkt ( $t = 0$ ) abgezinsten Wert aller laufenden Kosten und Erlöse. Die anfänglichen Anschaffungskosten sind ebenfalls Teil des Kapitalwertes. Die Abzinsung (Diskontierung) erfolgt anhand des Kalkulationszinssatzes.

Die dynamische Amortisationszeit ermittelt den Zeitraum, innerhalb dessen das eingesetzte Kapital für eine Investition zuzüglich einer Verzinsung der ausstehenden Beträge wiedergewonnen wird. Die dynamische Amortisationszeit einer Investition ist somit die Zeit, die vergeht, bis der Investor die Anschaffungszahlung nebst Verzinsung wiedergewonnen hat. Da dieser Wert die Anzahl der Jahre bis zur Amortisation der Investition angibt, wird hier immer bis zur nächsten, natürlichen Zahl gerundet

Ökologische Ausgabegrößen sind die CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung im Vergleich zum Referenzsystem.

#### 5.2.1.5 Referenzsystem

Für alle folgenden Berechnungen wird unter dem Begriff "Referenzsystem" der vollständige Strombezug aus dem Netz der öffentlichen Versorgung sowie die Wärmeerzeugung über einen Kessel verstanden.

Zur Berechnung des Primärenergiebedarfs im Referenzsystem wird für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz nach EnEV2014 ein Primärenergiefaktor von 2,4 angesetzt, was zu

einem Strommixwirkungsgrad von 41,67 % führt, siehe Kapitel 5.1.2.2. Je nach Anwendungsgebiet (Wohngebäude oder Nutzung im GHD-Sektor) werden zwei verschiedene Kesselwirkungsgrade angesetzt. Für die betrachteten Wohngebäude wird der Wirkungsgrad des Referenzkessels mit 90 % angesetzt, da, unter der Annahme, dass das bestehende Energieversorgungssystem komplett saniert bzw. ersetzt werden soll, der bestehende Kessel gegen einen Brennwertkessel auszutauschen ist. Im GHD-Bereich wird nur ein Teil der Energieversorgung durch eine KWK-Anlage plus zusätzlichen Wärmespeicher realisiert. Aus diesem Grund bleiben die vorhandenen, vergleichsweise älteren Kessel bestehen. Der angenommene Wirkungsgrad für diese Kessel ist mit 85 % trotzdem hoch, um eine zu positive Darstellung der Ergebnisse zu vermeiden.

Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung werden die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix mit 559 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> und für Erdgas mit 201,6 g CO<sub>2</sub>/kWh angesetzt, siehe Kapitel 5.1.2.2.

## 5.2.2 Untersuchte Objekte

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden sechs unterschiedliche Objekte analysiert. Hierbei handelt es sich um ein voll- und ein teilsaniertes Einfamilienhaus (EFH), ein Mehrfamilienhaus (MFH), ein Hotel, ein großes Krankenhaus und ein kleines Krankenhaus, siehe Tabelle 31.

Für das Ein- und Mehrfamilienhaus lagen keine explizit gemessenen Lastgänge vor, weshalb diese mit Hilfe der Richtlinie VDI 4655 “Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ erstellt wurden. Hierbei werden als Eingangsdaten lediglich der jährliche Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf und Strombedarf sowie die Anzahl der Bewohner (EFH) bzw. der Wohneinheiten (MFH) benötigt. Die verwendeten Daten (exkl. Anzahl Bewohner bzw. Wohneinheiten) stammen aus der Studie des Institutes für Energie- und Umweltforschung IFEU (“Ökologische und ökonomische Analyse von Brennstoffzellen-Heizgeräten“) [248] und sind in Tabelle 31 aufgeführt.

Beim Einfamilienhaus handelt es sich einerseits um ein vollsaniertes Objekt der Baualtersklasse D (Baujahr zwischen 1949 und 1957) mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von 72 kWh/(m<sup>2</sup>a) und andererseits um ein teilsaniertes Objekt derselben Baualtersklasse mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von 149 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das Mehrfamilienhaus ist ebenfalls ein teilsaniertes Objekt der neueren Baualtersklasse E (Baujahr zwischen 1958 und 1969) mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von 120 kWh/(m<sup>2</sup>a) [248].

Durch die Berücksichtigung des Gebäudestandortes kann das Objekt in eine der nach Deutschem Wetterdienst 15 Klimazonen eingeteilt werden (Annahme für EFH und MFH ist der Standort Duisburg, was einer Einordnung in Klimazone 5 entspricht). Daraus resultieren eine entsprechende Verteilung von Typtagen und die Faktoren für die Verteilung der Bedarfe auf die einzelnen Tage des Jahres. Mit Hilfe der Verrechnung normierter Verbrauchswerte in einer stündlichen Auflösung können für jeden Typtag und somit für jeden Tag des Jahres Stundenwerte erzeugt werden. Auf diese Weise konnten Lastgänge für die Ein- und Mehrfamilienhäuser synthetisiert werden [117].

Für die anderen drei Objekte des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) lagen gemessene Lastgänge auf Stundenbasis sowohl für den Strom als auch für den Wärmeverbrauch vor. Bei dem kleinen Krankenhaus handelt es sich um eine Einrichtung mit 214 Planbetten; das große Krankenhaus weist in etwa die doppelte Kapazität auf (430 Planbetten). Das Hotel verfügt über 533 Planbetten. Somit ergeben sich für die ausgelegten Objekte die in Tabelle 31 dargestellten Jahresverbräuche.

Tabelle 31: Kenndaten der analysierten Objekte

Objekt	Strombedarf [MWh/a]	Wärmebedarf [MWh/a]			Anzahl Bewohner bzw. Wohneinheiten	Anzahl Planbetten
		Gesamt	Heizung	Wasser		
EFH (vollsanziert) [248]	4,5	10,8	8,9	1,9	4 Pers.	
EFH (teilsaniert) [248]	4,5	22,4	20,5 [250]	1,9	4 Pers.	
MFH (teilsaniert) [248]	12	67,4 [248]	60,4	7	8 WE <sup>17</sup>	
Hotel	1.165	1.824	-	-		533
Kleines Krankenhaus	4.082	4.599	-	-		214
Großes Krankenhaus	6.356	11.469	-	-		430

Abbildung 61 zeigt den Strom- und Wärmebedarf für das untersuchte Hotel. Dieser Verlauf ist repräsentativ für die aus dem GHD-Sektor untersuchten Objekte.

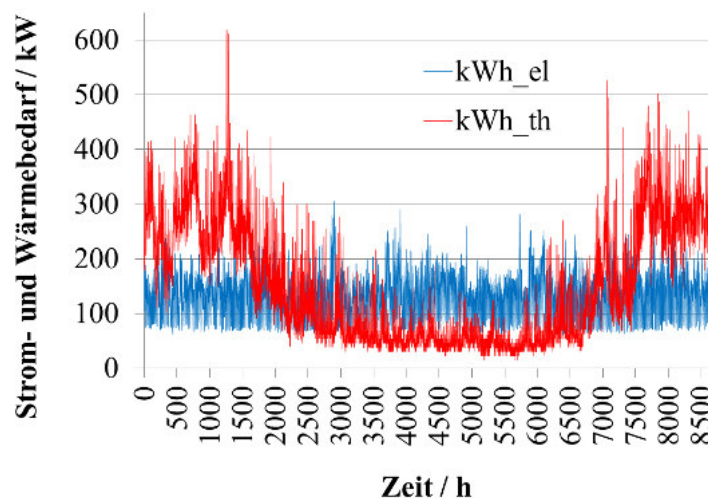


Abbildung 61: Wärme- und Stromlastprofil für das Hotel

Der Wärmebedarf ist deutlich von der Außentemperatur abhängig, sinkt aber nicht unter einen Wert von ca. 30 kW<sub>th</sub>. Die elektrische Grundlast ist mit ca. 70 kW vergleichsweise hoch. Dieser Verlauf der Lastgänge (auch im Sommer noch Wärmebedarf, hohe elektrischer Grundlast) bietet eine gute Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb einer KWK-Anlage, da eine gut ausgelegte Anlage eine hohe Anzahl an Volllaststunden erreichen kann. So ist es möglich,

<sup>17</sup> Vorliegender Wert des MFH ist eine Wohnfläche von 560 m<sup>2</sup>. Bei der Annahme einer Wohnfläche von 70 m<sup>2</sup> pro Wohneinheit ergeben sich acht Wohneinheiten.

einen großen Teil des Strombedarfs im hocheffizienten KWK-Betrieb selbst zu erzeugen, was den vergleichsweise teuren Fremdbezug von Strom substituiert und die Energiekosten senkt.

Mit Hilfe der Lastgänge können, wie in Abbildung 62 dargestellt, Jahresdauerlinien für die einzelnen Anwendungsobjekte erzeugt werden, in denen sowohl Grundlast als auch Spitzenlast abzulesen sind.

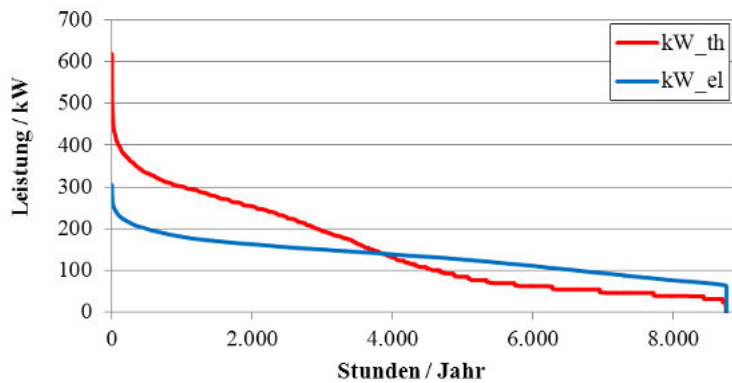


Abbildung 62: Jahresdauerlinien für den Anwendungsfall Hotel

### 5.2.3 Auswertung der Objekte

Um die Eignung einer KWK-Anlage in den untersuchten Objekten bewerten zu können, müssen sowohl ökonomische als auch ökologische Kennzahlen verglichen bzw. ausgewertet werden. Für eine erste Abschätzung eines effizienten Betriebes einer KWK-Anlage eignet sich die Laufzeit bzw. Angabe der Volllaststunden der Anlage. Für eine wirtschaftliche Bewertung wird die Amortisationszeit herangezogen, welche in direkter Abhängigkeit zu dem Kapitalwert der Anlage nach zehn Jahren steht.

#### 5.2.3.1 KWK im GHD-Sektor

##### Objekt Hotel

Für das Objekt Hotel wurden 12 motorische BHKW mit unterschiedlichen elektrischen Leistungen ( $P_{el} = 65-200$  kW) bewertet. In Abbildung 63 sind die ermittelten Volllaststunden dargestellt. Prinzipiell ist der zu erwartende Trend sinkender Volllaststunden mit steigender elektrischer Leistung bei einer durchschnittlichen Stromkennzahl zu erkennen. Bei genauerer Betrachtung ergeben sich jedoch Abweichungen von diesem Trend. Dies ist darin begründet, dass für die simulierte wärmegeführte Fahrweise die reale Stromkennzahl der betrachteten BHKW einen wesentlichen Einfluss auf die Volllaststundenzahl hat. Aufgrund der signifikant höheren Stromkennzahl insbesondere des BHKW mit einer Leistung von  $135$  kW<sub>el</sub> und der im Verhältnis entsprechend geringeren thermischen Leistung kann dieses BHKW wesentlich länger betrieben werden, als Anlagen vergleichbarer elektrischer Leistungen aber geringerer Stromkennzahl.

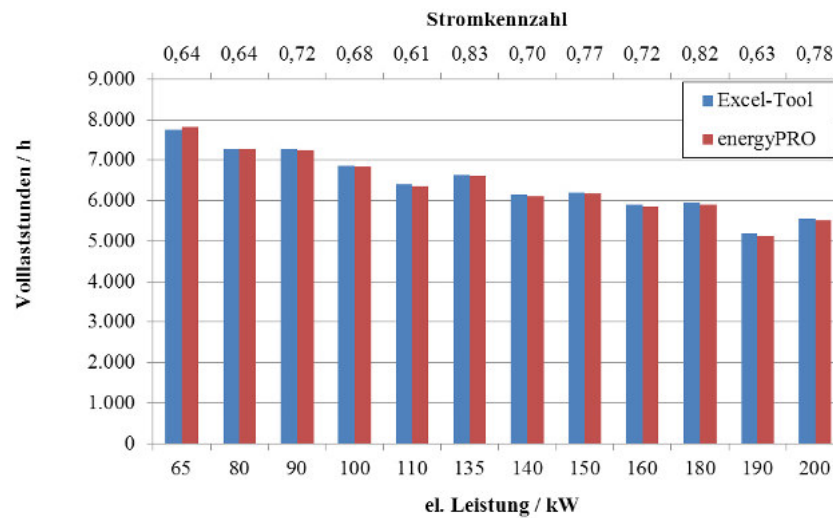


Abbildung 63: Volllaststunden für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel

Im Vergleich der Ergebnisse der beiden Berechnungstools ergeben sich Abweichungen von unter 1,5 %.

In Abbildung 64 sind die auf Basis der ermittelten Volllaststunden errechneten kumulierten Deckungsbeiträge nach 10 Jahren und der Stromdeckungsgrad, d. h. wie viel Prozent des Strombedarfs durch das BHKW gedeckt werden kann, dargestellt. Da EnergyPro® den Kapitalwert nicht ausgibt, wird hier trotz gewerblicher Nutzung der kumulierte Deckungsbeitrag gemäß beider Tools verglichen. Der anfängliche Anstieg des kumulierten Deckungsbeitrages ist durch zwei Effekte begründet. Einerseits sinken mit zunehmender Anlagengröße die relativen Investitionskosten. Andererseits kann mit zunehmender Anlagengröße trotz abnehmender Volllaststundenzahl ein höherer Anteil des Strombedarfs durch Eigenproduktion gedeckt werden. Somit verringert sich der teurere Fremdbezug.

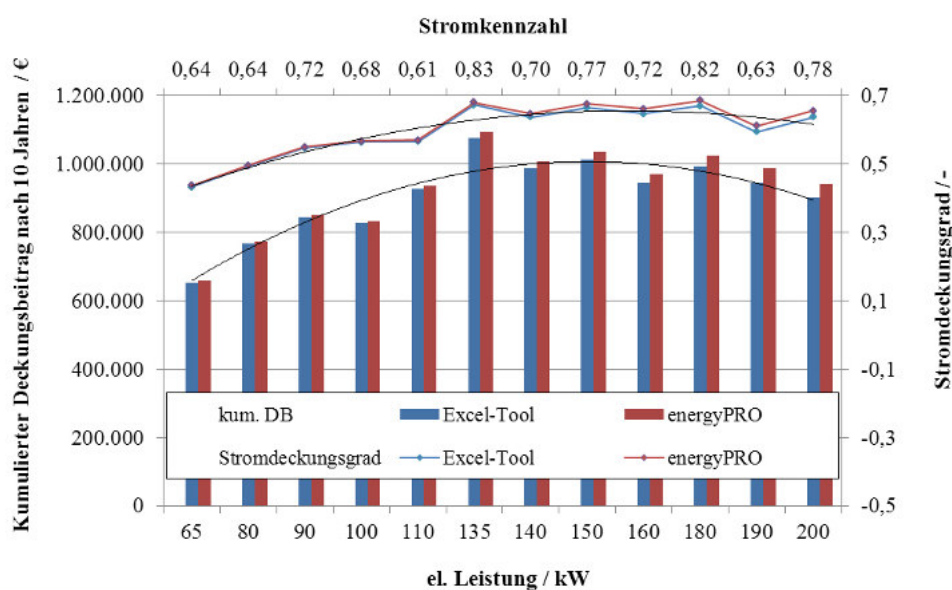


Abbildung 64: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren und der Stromdeckungsgrad für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel

Die Trendlinie des kumulierten Deckungsbeitrages zeigt weiter auf, dass dieser ab einer Anlagengröße von ca. 150 kW<sub>el</sub> sinkt. Ursache dafür ist, dass die thermische Leistung mit zunehmender Anlagengröße zu groß für den Wärmebedarf des Hotels ist. Die Anlagenlaufzeit sinkt so stark, dass trotz höherer elektrischer Leistungen der Stromdeckungsgrad stagniert bzw. wieder abfällt. In beiden Verläufen ist wiederum die Abhängigkeit von der Stromkennzahl zu erkennen. Der maximale kumulierte Deckungsbeitrag nach 10 Jahren stellt sich folgerichtig für das BHKW mit einer Leistung von 135 kW<sub>el</sub> ein.

Da sich die Berechnungen der wirtschaftlichen Kennzahlen auf die Volllaststunden beziehen, sind die Abweichungen der Ergebnisse zwischen dem Excel-Tool und EnergyPro<sup>®</sup> mit unter 4,6 % ebenfalls gering. Die leichte Zunahme der Abweichungen gegenüber denen bei der Berechnung der Volllaststundenzahl ist durch die steigende Anzahl an Rechenschritten einhergehend mit einer Zunahme des Einflusses von Rundungsfehlern begründet. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Tools ermöglicht es, sich bei der weiteren Betrachtung auf das Excel-Tool zu beschränken.

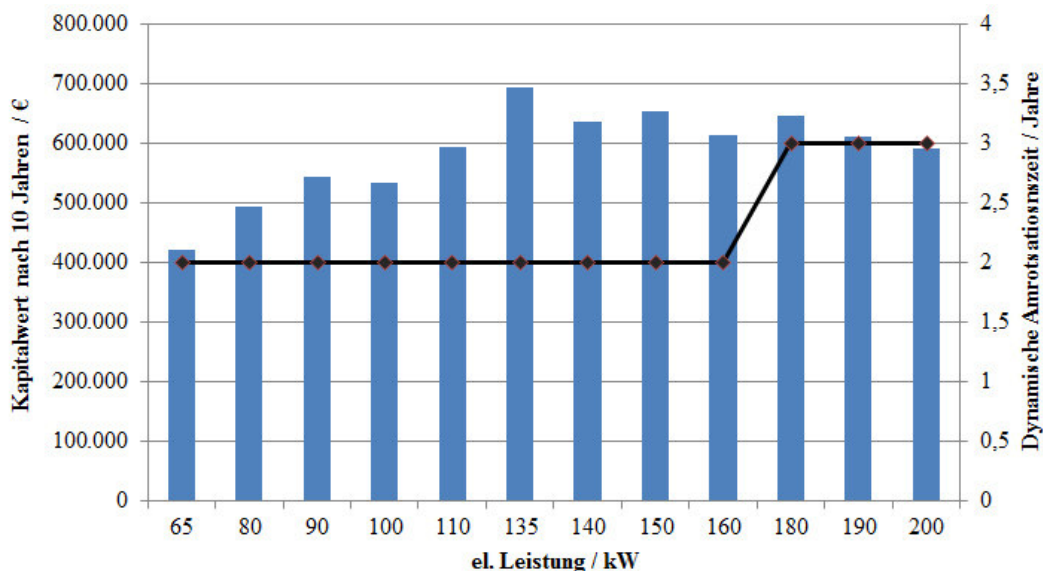


Abbildung 65: Kapitalwert nach 10 Jahren und dynamische Amortisationszeit für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel

Proportional zum kumulierten Deckungsbeitrag verhält sich der Kapitalwert. Dieser und die dynamische Amortisationszeit sind in Abbildung 65 dargestellt. Da die Amortisationszeit in Perioden angegeben wird, ist dieser als ganzzahlige Wert angegeben. Bis zu einer Anlagengröße von 180 kW<sub>el</sub> beträgt die dynamische Amortisationszeit 2 Jahre. Erst mit 190 kW<sub>el</sub> nimmt diese zu.

### Objekte kleines und großes Krankenhaus

Analog zu den Analysen für das Hotel wurden für das kleine Krankenhaus 18 Anlagen mit verschiedenen Leistungsgrößen (310 kW<sub>el</sub> bis 1.166 kW<sub>el</sub>) simuliert. Der maximale Kapitalwert nach zehn Jahren von rund 2,7 Mio. EUR ergibt sich dabei für ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> mit einer Stromkennzahl von 0,87. Die Amortisationszeit beträgt 1 Jahr und die Volllaststunden betragen rund 6.700 Stunden.



Für das große Krankenhaus wurden 20 Anlagen mit verschiedenen Leistungsgrößen (530 kW<sub>el</sub> bis 2.739 kW<sub>el</sub>) simuliert. Hier errechnet sich der maximale Kapitalwert nach zehn Jahren zu rund 4,7 Mio. EUR für ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 854 kW<sub>el</sub> mit einer Stromkennzahl von 0,96. Die Amortisationszeit beträgt ebenfalls 1 Jahr und die Volllaststunden rund 7.700 Stunden.

### 5.2.3.2 KWK im Wohngebäudesektor

Für die Wohnobjekte teil- bzw. vollsaniertes Einfamilienhaus und teilsaniertes Mehrfamilienhaus ist aufgrund der geringen Wärme- und Strombedarfe die Auswahl kommerziell verfügbarer KWK-Anlagen geringer als bei den vorangegangenen Objekten aus dem GDH-Sektor.

Ausgehend von einem vollständigen Austausch einer alten Heizungsanlage fallen für das Referenzsystem Investitionskosten für einen alternativen Wärmeerzeuger (angesetzt mit 7.000 EUR), einen Wärmespeicher sowie die Installationskosten an. Im Vergleich dazu setzen sich die zusätzlichen Investitionskosten für eine Mikro-KWK-Anlagen nur aus den Modul- sowie den erhöhten Installationskosten zusammen. Bei den BZHG ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass zum Teil Spitzenlastkessel und ggf. auch Wärmespeicher integriert sind. Diese Kosten müssen dementsprechend von den Gesamtinvestitionskosten der BZHG bei vorhandenem Spitzenlastkessel und ggf. Wärmespeicher abgezogen werden.

#### Objekt vollsaniertes Einfamilienhaus (EFH)

Für das vollsanierte EFH wurden drei Mikro-KWK-Anlagen simuliert, wobei es sich neben einer verbrennungsmotorischen Anlage um zwei BZHG handelt. In Tabelle 32 sind die wichtigsten Angaben inkl. der zusätzlichen Investitionskosten gegenüber dem Referenzsystem für die Anlagen aufgeführt.

Tabelle 32: Technische und wirtschaftliche Kenndaten der ausgelegten KWK-Anlagen für das EFH

Technologie	P <sub>el</sub> P <sub>th</sub>	Modul	Einbin- bin- dung	Wartung	integr. Speicher	integr. Kessel	Förde- rungen	Zusatz- Invest- Kosten*
BZHG	750 W 1 kW	23.205 EUR [249]	3.750 EUR	300 EUR / a [249]	✓	✓	4.940 EUR	14.598 EUR
BZHG	1 kW 1,8 kW	22.610 EUR [249]	5.000 EUR	470 EUR / a [249]	✗	✓	4.940 EUR	15.670 EUR
VM	1 kW 2,5 kW	11.406 EUR	6.730 EUR	3,88 Ct/kW <sub>h<sub>el</sub></sub>	✗	✗	3.325 EUR	14.811 EUR

\* Vergleich zum Referenzsystem

Auffallend sind die starken Unterschiede der Stromkennzahlen und der Wartungskosten sowie die ähnlichen zusätzlichen Investitionskosten der drei Systeme. Anhand von Abbildung 66 wird deutlich, dass keine der simulierten Mikro-KWK-Anlagen im Vergleich zum Referenzsystem bei wärmegeführter Fahrweise wirtschaftlich betrieben werden kann und dass der kumulierte Deckungsbeitrag nach 10 Jahren in vergleichbarer Größenordnung liegt. Das beste Ergebnis erzielt hier das BZHG mit 0,75 kW<sub>el</sub> aufgrund der höchsten eigenverbrauchten KWK-Strommenge und moderaten Wartungskosten. Trotz der höheren eigenverbrauchten

KWK-Strommenge im Vergleich zur motorischen Mikro-KWK-Anlage führen die höheren Wartungskosten für das BZHG mit 1,0 kW<sub>el</sub> zu dem schlechtesten Ergebnis.

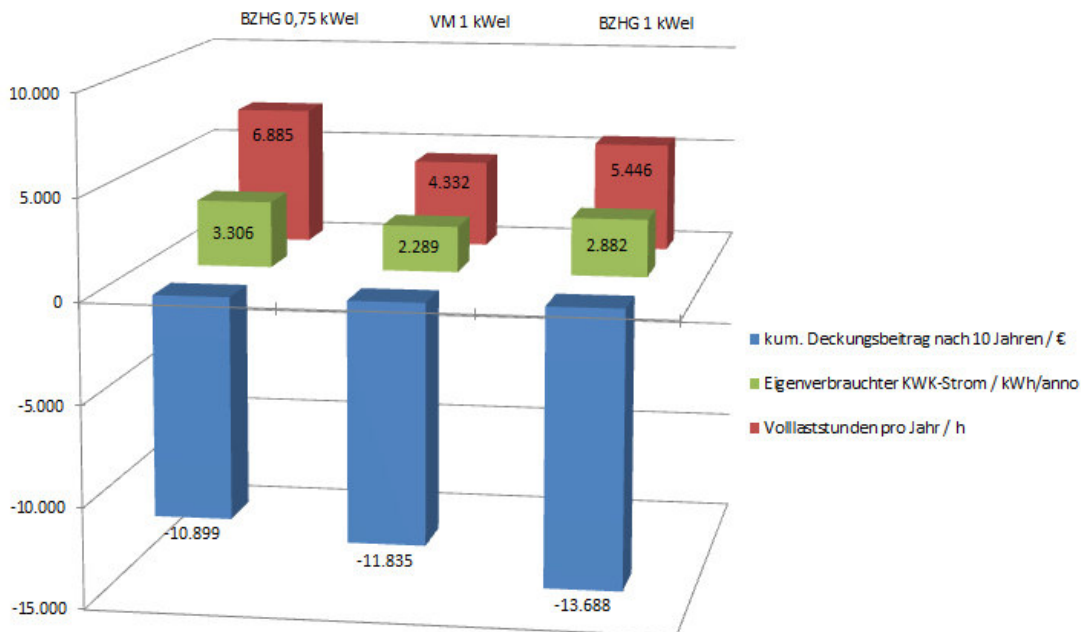


Abbildung 66: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren, eigenverbraucher KWK-Strom und Volllaststunden pro Jahr aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im vollsanierten Einfamilienhaus

Bedingt durch die hohen Investitionskosten des BZHG mit 0,75 kW<sub>el</sub> ist jedoch ein wirtschaftlicher Betrieb trotz eines geeigneten Verhältnisses von Strom- und Wärmeproduktion nicht möglich. Daher ist die Senkung der Investitionskosten der wichtigste Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit von BZHG. Dieses wird in Kapitel 5.2.4 detaillierter untersucht.

In Abbildung 67 sind die ermittelten CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparungen der verschiedenen Mikro-KWK-Anlagen im Vergleich zum Referenzsystem dargestellt.

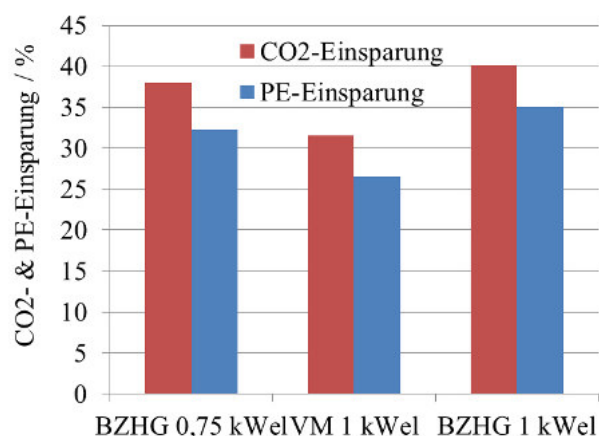


Abbildung 67: CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung der verschiedenen BHKW im vollsanierten Einfamilienhaus pro Jahr

Bedingt durch den höheren Gesamtwirkungsgrad von 98 % des BZHG mit 1,0 kW<sub>el</sub> kann trotz einer geringeren Laufzeit von 1.439 Betriebsstunden geringfügig mehr CO<sub>2</sub> bzw. Pri-

märenergie eingespart werden, als mit dem BZHG mit 0,75 kW<sub>el</sub> und einem Gesamtwirkungsgrad von 90 %. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich zur verbrennungsmotorischen Anlage aufgrund des geringeren elektrischen und Gesamtwirkungsgrads des Motors.

### Objekt teilsaniertes Einfamilienhaus (EFH)

Für die Analyse des teilsanierten EFH werden die gleichen Mikro-KWK-Anlagen wie für das vollsanierte EFH simuliert, siehe Tabelle 32.

Die in Abbildung 68 dargestellten Ergebnisse zeigen nur moderate Abweichungen der Volllaststunden, der eigenverbrauchten KWK-Strommenge sowie folgerichtig auch dem kumulierten Deckungsbeitrag nach 10 Jahren. Das ermittelte Ranking ist hier auf die unterschiedlich hohen zusätzlichen Investitions- und Wartungskosten zurück zu führen.

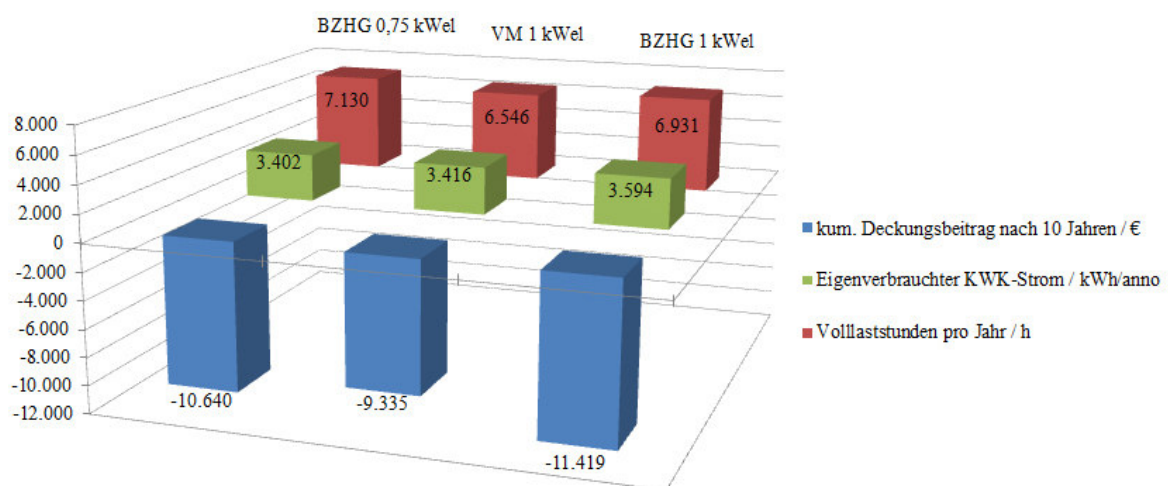


Abbildung 68: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren, eigenverbraucher KWK-Strom und Volllaststunden pro Jahr aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im teilsanierten Einfamilienhaus

Auch hier gilt es im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Einflussfaktoren zu ermitteln, um Handlungsempfehlungen für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser hocheffizienten Technologien zu erreichen.

### Objekt Mehrfamilienhaus

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Simulation der Energieversorgung des teilsanierten Mehrfamilienhauses. Hier wurden vier verbrennungsmotorische KWK-Anlagen und zwei BZHG ausgelegt (siehe Tabelle 33). Die Stromkennzahlen variieren zwischen 0,25 und 2,5.

Tabelle 33: Technische und wirtschaftliche Kenndaten der ausgelegten BHKW für das MFH

Technologie	P <sub>el</sub> P <sub>th</sub>	Modul	Einbin- dung	Wartung	integr. Speicher	integr. Kessel	Förde- rungen	Zusatz- Invest- Kosten*
BZHG	1 kW 1,8 kW	19.000 EUR	5.000 EUR	470 EUR / a	×	✓	4.940 EUR	12.060 EUR
BZHG	1,5 kW 0,6 kW	25.000 EUR	7.500 EUR	600 EUR / a	×	×	5.360 EUR	27.140 EUR
VM	1 kW 2,5 kW	9.585 EUR	5.655 EUR	3,88 Ct/kWh <sub>el</sub>	×	×	3.325 EUR	11.915 EUR

VM	1,9 kW 7,6 kW	12.860 EUR	7.590 EUR	3,68 Ct/kWh <sub>el</sub>	✘	✘	4.428 EUR	16.022 EUR
VM	2,6 kW 6,5 kW	14.850 EUR	8.760 EUR	3,89 Ct/kWh <sub>el</sub>	✘	✘	4.856 EUR	18.754 EUR
VM	4 kW 8,7 kW	18.090 EUR	9.225 EUR	4,23 Ct/kWh <sub>el</sub>	✘	✘	5.080 EUR	22.235 EUR

\* Vergleich zum Referenzsystem

Anhand des in Abbildung 69 dargestellten kumulierten Deckungsbeitrages nach zehn Jahren wird deutlich, dass Mikro-KWK-Anlagen bereits in einem vergleichsweise kleinen teilsanierten Mehrfamilienhaus (560 m<sup>2</sup>) eine ökonomisch sinnvolle Variante sein können. Das für KWK-Anlagen ungünstige Verhältnis von Strom- zu Wärmebedarf dieses Gebäudes führt jedoch dazu, dass bei der hier simulierten wärmegeführten Fahrweise und der resultierenden hohen Laufzeit insbesondere die beiden größeren motorischen Anlagen erhebliche Mengen Strom ins Netz einspeisen müssen. Folgerichtig erzielen diese beiden Anlagen auch neben dem BZHG mit 1,5 kW<sub>el</sub> die schlechtesten Ergebnisse im Vergleich.

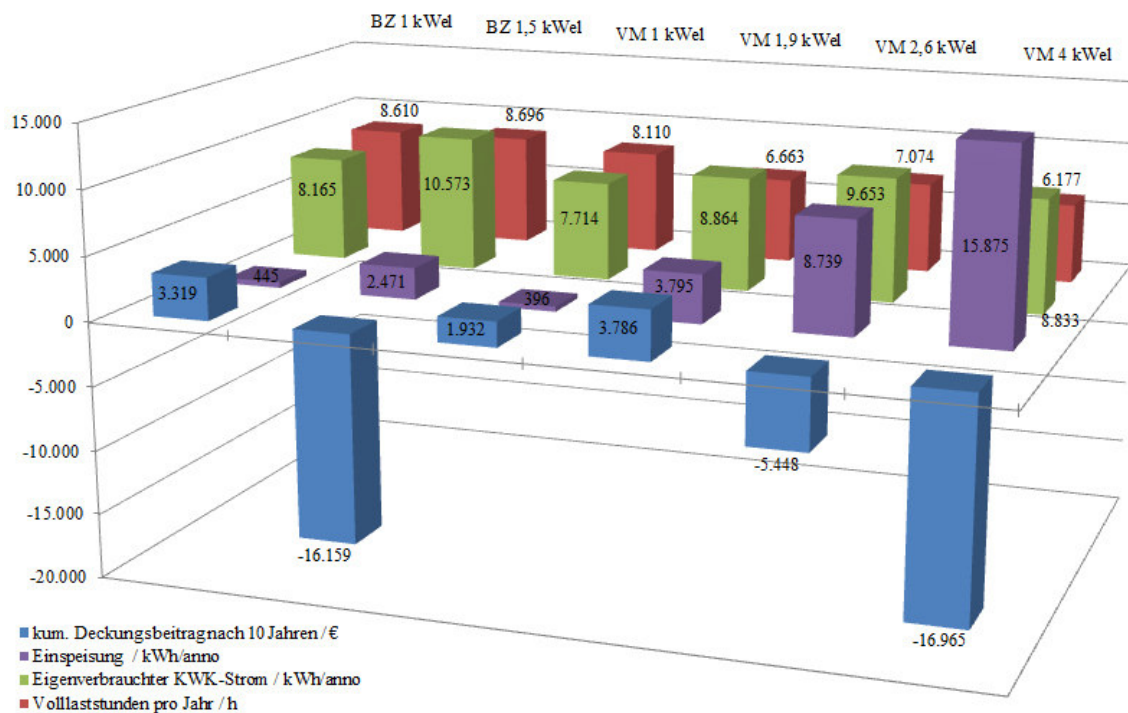


Abbildung 69: Ergebnisse aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im teilsanierten Mehrfamilienhaus  
 Das negative Ergebnis des BZHG mit 1,5 kW<sub>el</sub> ist in erster Linie auf die hohen Investitionskosten zurück zu führen. Darüber hinaus führt die geringe thermische Leistung dieser Anlage zu einem annähernd ganzjährigen Dauerbetrieb und somit aufgrund der verhältnismäßig hohen Stromkennzahl in Kombination mit dem geringen Strombedarf des MFH zu einer signifikanten Einspeisung. Ein sehr positives Ergebnis erzielt das BZHG mit 1,0 kW<sub>el</sub> aufgrund der verhältnismäßig geringen zusätzlichen Investitionskosten und des Stromkennzahl-bedingten hohen Stromeigennutzungsanteils. Das beste Ergebnis in diesem Vergleich erzielt die motorische Anlage mit 1,9 kW<sub>el</sub>. Dies liegt an der geringsten Stromkennzahl und einer mittleren elektrischen Leistung.

In Abbildung 70 sind die CO<sub>2</sub>- und die Primärenergieeinsparungen der simulierten Anlagen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hocheffizienztechnologie BZHG die höchsten Einsparpotenziale aufweist. Die sehr hohen Einsparungen des BZHG mit 1, 5 kW<sub>el</sub> sind wesentlich durch die starke Substitution des Fremdbezuges begründet. Neben der nicht so hohen elektrischen Effizienz der motorischen Anlagen führen auch die kürzeren Laufzeiten zu den geringeren CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparungen der motorischen Anlagen. Dennoch liegen auch hier die CO<sub>2</sub>-Einsparungen über 25 %. Wird an dieser Stelle im Referenzsystem statt des CO<sub>2</sub>-Emissionskoeffizienten des Deutschen Strommix der von NRW angesetzt, fallen die CO<sub>2</sub>-Einsparungen noch deutlich höher aus, siehe Kapitel 5.1.2.2.

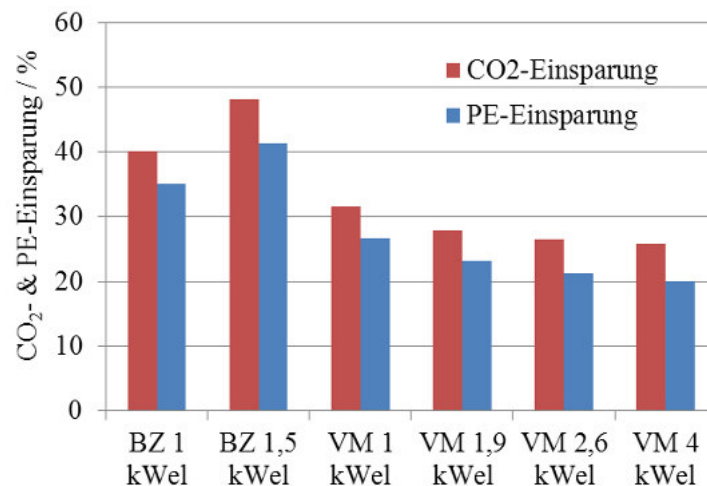


Abbildung 70: CO<sub>2</sub>- & PE-Einsparungen für das Objekt teilsaniertes MFH

## 5.2.4 Sensitivitätsanalysen

Die in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Eingangsgrößen sind vor dem Hintergrund technischer Weiterentwicklung und geänderter Energiekosten zukünftig nicht konstant (steigende Energiekosten, reduzierte Investitionskosten, Effizienzsteigerungen der Anlagen etc.). Um die Auswirkungen von Änderungen dieser Parameter auf die ermittelten Größen wie Stromgestehungskosten und Kapitalwerte bzw. Deckungsbeiträge abzuschätzen, werden im Folgenden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Variiert werden die Faktoren, die den größten Einfluss auf die Ergebnisse haben. Hierbei handelt es sich um die angesetzten Strom- und Erdgaspreise, die Investitions- und Wartungskosten sowie den elektrischen Wirkungsgrad der betrachteten Anlagen. Es wird je nur ein einzelner Parameter bei Fixierung der anderen variiert, um den Einfluss des einzelnen Parameters identifizieren zu können. Die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads wird durch eine Anhebung der elektrischen Leistung bei konstantem Brennstoffeinsatz sowie konstanter thermischer Leistung bzw. thermischer Wirkungsgrad und somit einem steigenden Gesamtwirkungsgrad realisiert.

### 5.2.4.1 KWK im GHD-Sektor

Ausgewählt werden für die drei Anwendungsobjekte des GHD-Sektors je die Best-case-Varianten. Die Energiekosten sowie die Investitions- und Wartungskosten werden dabei in den Grenzen -30 bis +30 % bzw. der elektrische Wirkungsgrad in den Grenzen 0 bis 10 % variiert.

Betrachtet man die in Abbildung 71 dargestellten Auswirkungen der Variationen auf den Kapitalwert nach zehn Jahren für das Objekt Hotel in Kombination mit dem BHKW mit 135 kW<sub>el</sub> und  $\sigma = 0,83$ , so sind anhand der Steigung der Geraden die wichtigsten Einflussfaktoren unmittelbar zu erkennen.

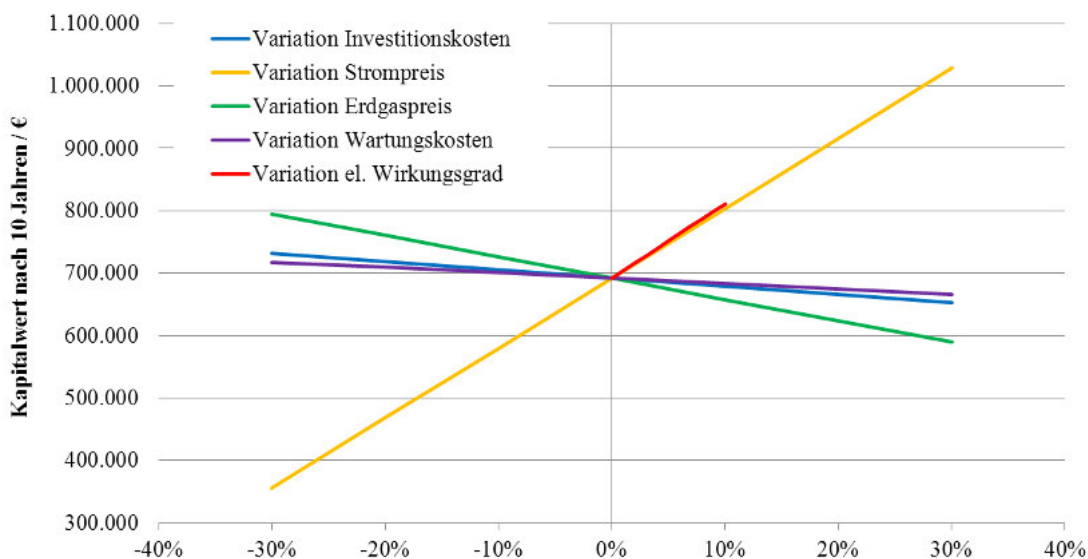


Abbildung 71: Kapitalwert nach 10 Jahren für das Hotel bei Parametervariation

Den stärksten Einfluss auf das Ergebnis hat eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades. Steigt dieser, so kann bei wärmegeführter Fahrweise bei gleichem Brennstoffeinsatz mehr Strom erzeugt und dieser im Objekt selbst genutzt werden. Dies wiederum senkt den teuren Fremdbezug. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Strombezugspreis. Steigt dieser, so steigt bei gleichem Stromeigennutzungsanteil die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage gegenüber dem Referenzsystem. Umgekehrt ist der Einfluss des Erdgaspreises, jedoch ist hier die Auswirkung auf die Rentabilität geringer. Einen vergleichsweise schwachen Einfluss hat die Variation der Parameter Investitions- und Wartungskosten.

Zudem wurden die Auswirkungen von Variationen auf die Stromgestehungskosten untersucht. Anhand von Abbildung 72 wird deutlich, dass eine Variation des Erdgaspreises den größten Einfluss auf die Stromgestehungskosten aufweist. Des Weiteren wirkt sich eine Variation des elektrischen Wirkungsgrades ebenfalls stark auf die Stromgestehungskosten aus, weshalb gerade dieser direkt beeinflussbare Faktor im Fokus der Optimierungen verbrennungsmotorischer BHKW liegt.

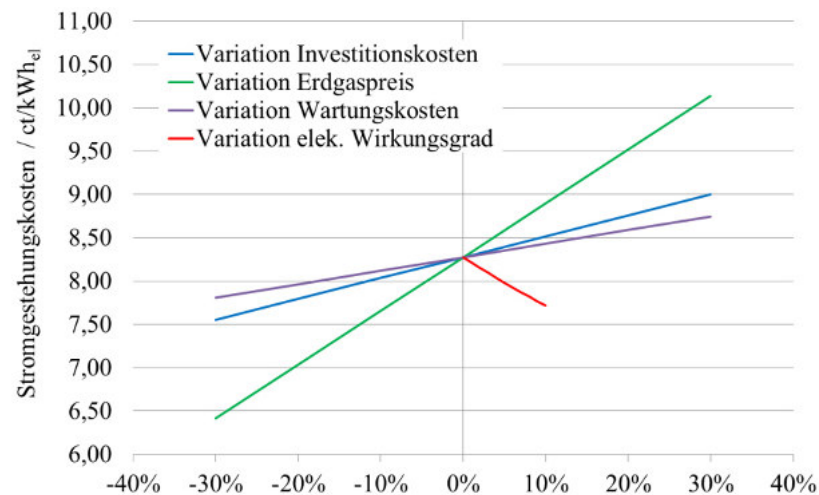


Abbildung 72: Stromgestehungskosten bei Variation verschiedener Eingangsparameter für den Anwendungsfall Hotel

Neben den oben genannten Parametern hat die aktuelle Fördersituation starke Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Betrieb einer KWK-Anlage. In Abbildung 73 sind neben der aktuellen Fördersituation (KWK-G2012 & EEG2014) drei weitere Förderszenarien und deren Auswirkung auf die Höhe der Stromgestehungskosten exemplarisch für das Objekt Hotel dargestellt.

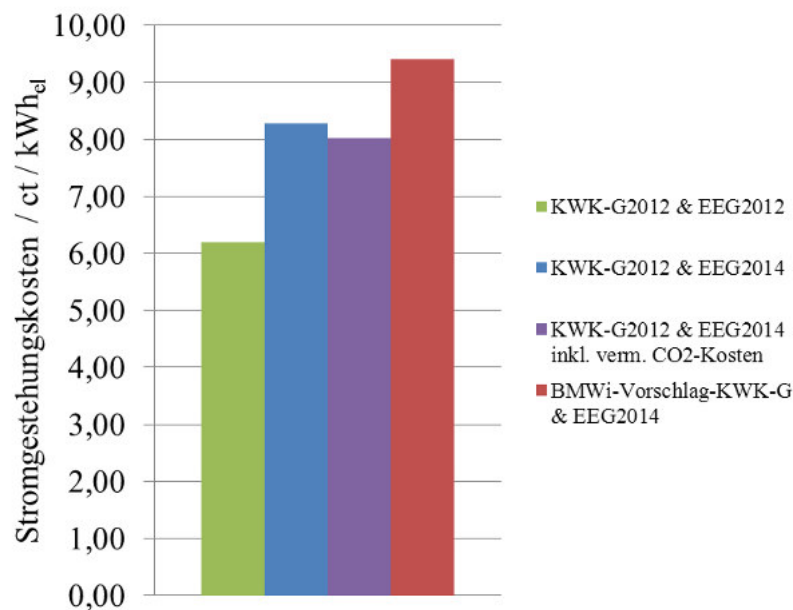


Abbildung 73: Auswirkung verschiedener Förderszenarien auf die Stromgestehungskosten für das Objekt Hotel

Bei dem Szenario KWK-G2012 & EEG2012 handelt es sich um das aktuell gültige KWK-G und das alte EEG aus dem Jahr 2012, bei dem die Eigenstromversorgung noch vollständig von der EEG-Umlage befreit war. Das Szenario KWK-G2012 & EEG2014 inkl. vermiedener CO<sub>2</sub>-Kosten beschreibt die aktuelle Gesetzeslage unter Berücksichtigung eines Emissionspreises von 20 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub></sub>. Da durch den Einsatz von hocheffizienten KWK-Anlagen die CO<sub>2</sub>-

Emissionen im Vergleich zur getrennten Erzeugung stark verringert werden können, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionskosten über vermiedene Kosten als Erlöse in den Stromgestehungskosten zu berücksichtigen, was diese deutlich senkt. Im dritten Szenario BMWi-Vorschlag-KWK-G & EEG2014 werden das aktuelle EEG sowie die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie vorgeschlagenen Änderungen im Rahmen des “Vorschlag für die Förderung der KWK - KWK-G 2015“ für das KWK-G berücksichtigt [250]. Hierbei handelt es sich um den Ausbau der Förderung von eingespeistem KWK-Strom und der Verringerung der Förderung für den eigenerzeugten Strom sowie Einschränkungen in der Förderdauer. Dies zieht einen starken Anstieg der Stromgestehungskosten nach sich und ist mit den im KWKG festgeschriebenen Zielen (Ausbau der KWK bzw. des Anteils des KWK-Stroms an der Stromerzeugung in Deutschland) nicht zu vereinbaren.

Für die weiteren Objekte aus dem GHD-Bereich (kleines und großes Krankenhaus) weisen die Ergebnisse vergleichbarer Tendenzen auf.

#### **5.2.4.2 KWK im Wohngebäudesektor**

Im Folgenden werden für die “Best-case-Anlagen“ der Objekte Ein- und Mehrfamilienhaus der elektrische Wirkungsgrad, die Strom- und Erdgaspreise sowie die Investitions- und Wartungskosten variiert und deren Einfluss auf den kumulierten Deckungsbeitrag nach 10 Jahren untersucht. Da die analysierten Mikro-KWK-Anlagen im Gegensatz zu den betrachteten BHKW im GHD-Sektor entweder unwirtschaftlich sind oder am Rande der Wirtschaftlichkeit stehen, werden nur Variationen betrachtet, die das Betriebsergebnis (kumulierter Deckungsbeitrag nach zehn Jahren) positiv beeinflussen sollten (bspw. Steigerung Stromkosten, Senkung Investitionskosten etc.). Des Weiteren findet diese Variation in einem Rahmen bis 50 % statt. Der elektrische Wirkungsgrad wird hingegen nur um bis zu 10 % gesteigert.

Beim Anwendungsobjekt vollsaniertes Einfamilienhaus hat sich das BZHG mit einer elektrischen Leistung von 0,75 kW als beste betrachtete Anlage herausgestellt. In Abbildung 74 ist deutlich zu sehen, dass die Investitionskosten für das Brennstoffzellenheizgerät die stärksten Auswirkungen auf den kumulierten Deckungsbeitrag nach zehn Jahren haben. Erst wenn die Investitionskosten um knapp 40 % gesenkt werden ist ein wirtschaftlicher Betrieb im Vergleich zur getrennten Erzeugung möglich. Wie auch bei den für den GHD-Sektor betrachteten KWK-Anlagen hat eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades ebenfalls einen starken Einfluss auf die Rentabilität der Anlage. Im Verhältnis zu den bereits genannten Parametern beeinflusst die Variation des Strompreises das Ergebnis weniger und die Variation des Erdgaspreises ebenso wie die der Wartungskosten das Ergebnis nur gering. Ohne eine signifikante Reduzierung der Investitionskosten kann ein wirtschaftlicher Betrieb dieses BZHG nicht erreicht werden.



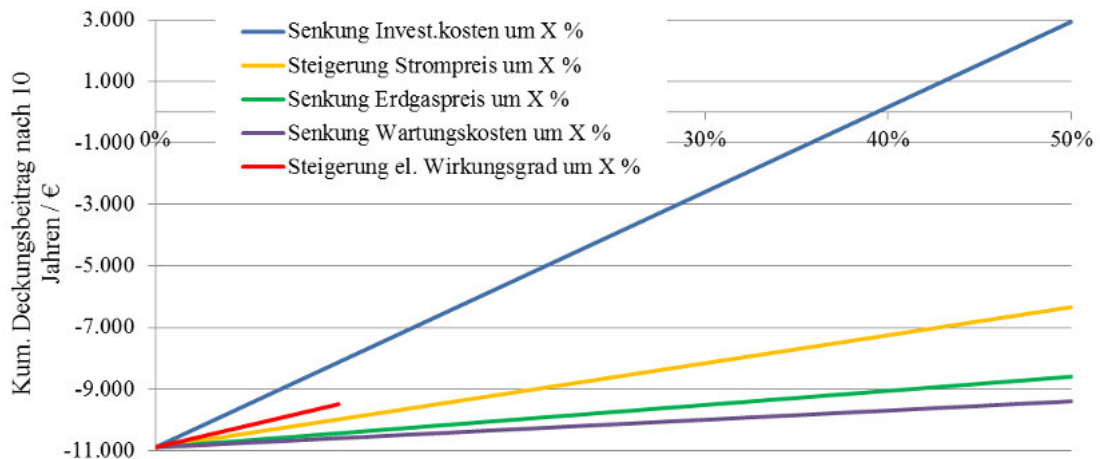


Abbildung 74: Sensitivitätsanalyse BZHG (0,75 kW<sub>el</sub>) im vollsanierten EFH

Für die „Best-Case-Anlage“, die motorische KWK-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1 kW im teilsanierten Einfamilienhaus ergibt sich das in Abbildung 75 dargestellte Ergebnis. Im Rahmen der Variationen kann kein positives Ergebnis für diese Anlage erzielt werden! Erst mit einer Reduzierung der Investitionskosten um über 50 % kann ein positiver kumulierter Deckungsbeitrag realisiert werden. Im Gegensatz zum BZHG (im Objekt vollsaniertes EFH) hat der elektrische Wirkungsgrad einen stärkeren Einfluss als die Investitionskosten. Das Maß des Einflusses nimmt von der Senkung des Strompreises, über die Steigerung des Erdgaspreises und bis zur Senkung der Wartungskosten ab.

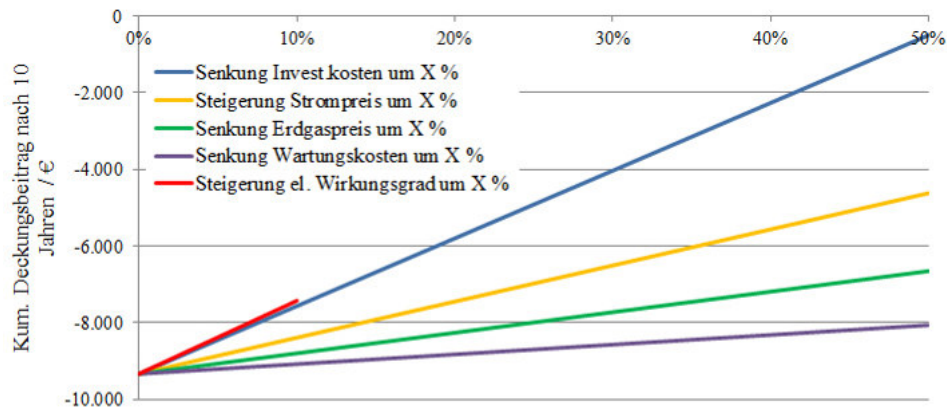


Abbildung 75: Sensitivitätsanalyse motorische Mikro-KWK-Anlage (1 kW<sub>el</sub>) im teilsanierten EFH

Aufgrund dieses negativen Ergebnisses wurden auch die Parameter der im Vergleich zweitbeste Anlage, das BZHG mit 0,75 kW<sub>el</sub> variiert. Dabei zeigt sich ein vergleichbares Ergebnis zum vollsaniertem EFH. Durch eine Reduzierung der Investitionskosten um 38 % kann für das Objekt teilsaniertes EFH ein positives Ergebnis erzielt werden.

Für das Objekt teilsaniertes Mehrfamilienhaus wurde die motorische Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1,9 kW und einer Stromkennzahl von 0,25 durch Variation der Parameter analysiert, siehe Abbildung 76. Aufgrund dieser sehr geringen Stromkennzahl hat die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades (durch Anhebung der elektrischen Leistung bei konstanter thermischer Leistung!) den stärksten Einfluss, da somit die Menge an eigenverbrauchttem KWK-Strom steigt und der Fremdbezug sinkt. Wie auch bei der motorischen Anlage im

GHD-Objekt Hotel so hat auch hier die Steigerung des Strompreises einen höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit als die Senkung Investitionskosten. Dennoch ist die Steigung des Verlaufs der Senkung Investitionskosten für diese kleine motorische Anlage steiler als bei den in bereits höherer Stückzahl produzierten größeren motorischen BHKW. Einen geringeren Einfluss auf die Rentabilität haben wiederum die Senkung des Erdgaspreises sowie die Reduzierung der Wartungskosten.

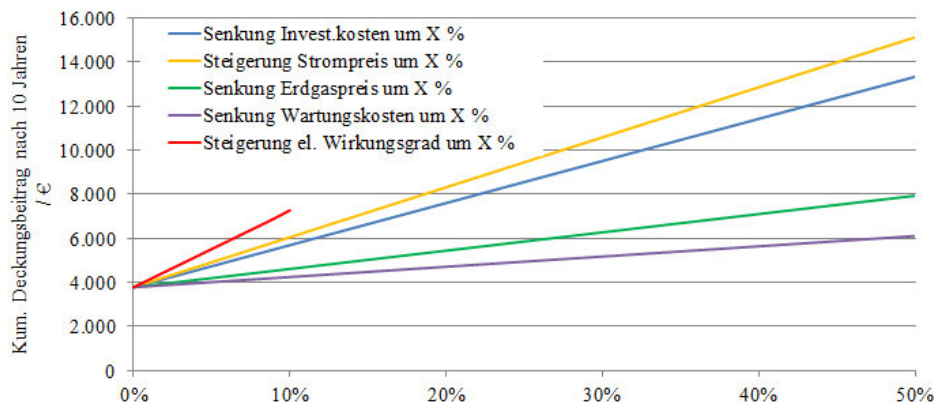


Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse Verbrennungsmotor (2,6 kW<sub>el</sub>) im Mehrfamilienhaus

### 5.2.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde der Betrieb verschiedener KWK-Anlagen in unterschiedlichen Beispielobjekten sowohl aus dem GHD- als auch aus dem Wohngebäudesektor simuliert. Hierzu wurde ein erstelltes Excel-Tool zunächst erweitert und anhand der kommerziellen Software EnergyPro<sup>®</sup> positiv validiert und im Folgenden für die Berechnungen verwendet.

Um Aussagen über die Rentabilität von KWK-Anlage treffen zu können, wurden verschiedene Kenngrößen wie die dynamische Amortisationszeit, der Kapitalwert nach zehn Jahren im GHD-Bereich (folglich mit Renditeerwartung) und der kumulierte Deckungsbeitrag nach zehn Jahren im Bereich der Wohngebäude für eine Anzahl verfügbarer KWK-Anlagen verglichen. Die Ergebnisse gelten quantitativ lediglich für die konkreten Objekte. Darüber hinaus können aber qualitative Aussagen für weitere ähnliche Objekte der gleichen Sektoren getätigt werden.

Die Analysen haben gezeigt, dass der GHD-Sektor ein rentables Anwendungsgebiet für den Einsatz von KWK-Anlagen sein kann. Bei den hier betrachteten Objekten handelt es sich aufgrund der Bedarfsprofile (Strombedarf konstant hoch, Wärmebedarf im Sommer konstant & Verhältnis Jahreswärme- zu Jahresstrombedarf klein) um für KWK sehr vorteilhafte. Ein solcher Bedarf existiert auch in anderen Bereichen des GHD-Sektors, wie beispielsweise Schulen und Schwimmbädern. In Bereichen, in den das Strombedarfsprofil starken Schwankungen unterliegt, ist die Wirtschaftlichkeit zum Teil nicht gegeben bzw. muss diese im Einzelfall überprüft werden. Für derartige Bereiche lagen jedoch keine Bedarfsprofile in Stundenauflösung vor. Die Existenz von Referenzlastprofilen auf Stundenbasis für verschiedene GHD-Sektoren wäre daher erstrebenswert. Für die betrachteten Objekte wie auch für andere Objekte des GHD-Sektors sind für einen wirtschaftlichen Betrieb bei der Auswahl einer geeigneten

KWK-Anlage auf eine zu den Bedarfen passende Anlagengröße sowie Stromkennzahl zu achten. Bei wärmegeführter Fahrweise ist dabei ein möglichst hoher Stromeigennutzungsanteil das Hauptkriterium für einen rentablen Betrieb. Daher haben für den GHD-Sektor und die hier betrachteten motorischen Anlagen die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades sowie eine Erhöhung des Strompreises die größten positiven Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit. Da verbrennungsmotorische BHKW bereits in größeren Stückzahlen produziert werden, sind die Investitionskosten und auch die Wartungskosten im Vergleich zu anderen Techniken auf einem sehr geringen Niveau, weshalb hier keine signifikanten Veränderung mehr zu prognostizieren ist.

Im Wohngebäudesektor konnte insbesondere für Brennstoffzellenheizgeräte durch die Analysen von Einfamilienhäusern unterschiedlichen Sanierungsstandes und eines teilsanierten Mehrfamilienhauses deutlich die starke Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von den Investitionskosten identifiziert werden. Weitere Faktoren wie der elektrische Wirkungsgrad und die Stromkosten sind zwar ebenfalls signifikant, jedoch stehen die Investitionskosten im Fokus der Betrachtung. Neben weiterer Forschung und Entwicklung gilt es insbesondere mittels der Erhöhung der Stückzahlen und entsprechenden Skaleneffekten, diesen Kostenfaktor zu senken. Dies würde zu einer erheblichen Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissions-Einsparung im Wohngebäudesektor führen. Hierzu ist unter anderem ein flankierendes Technologie-Einführungsprogramm (TEP) empfehlenswert. Die Studie der Firma Roland Berger Strategy Consultants über den Fortschritt des europäischen Energiesystems hat gezeigt, dass eine signifikante Reduzierung der Investitionskosten durch eine Steigerung der Stückzahlen darstellbar ist [37]. Darüber hinaus wird im Bereich der Wohngebäude der Wärmebedarf auch bedingt durch Sanierungs-/Dämmmaßnahmen weiter abnehmen, so dass zukünftig neben der wesentliche Voraussetzung der Senkung der Investitionskosten auch eine Steigerung der Stromkennzahl im Fokus der Entwicklung stehen sollte.

Schließlich haben politische Entscheidungen weit reichende Lenkungswirkung auf die Wirtschaftlichkeit einer KWK-Anlage, weshalb diese immer unter Berücksichtigung der Ziele der Energiewende und des Klimaschutzes getroffen werden sollten.

Der Ausbau von KWK in den betrachteten Objekten bzw. Sektoren würde zu einer erheblichen Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissions-Einsparung führen. Dabei hängen sowohl das Primärenergie- als auch das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial unmittelbar von der elektrischen Effizienz der Anlagen ab.

Mit dem Abschluss dieser Arbeiten stehen nun eine Methodik und das entsprechende Werkzeug für eine detaillierte Objektanalyse (Wohngebäude- bis GHD-Sektor) sowie für Auswahl und die Auslegung geeigneter KWK-Anlagen in Kombination mit thermischen und optional auch elektrischen Speichern für Gebäude zur Verfügung. Als weiterer Baustein ist die Implementierung externer Preissignale im Rahmen zukünftiger Arbeiten geplant.

### 5.3 Erweiterte Bewertung von kombinierten Speichersystemen

Der Stromeigennutzungsanteil<sup>18</sup> wurde unter anderem in [251] als ein zentraler Parameter zur Erhöhung der wirtschaftlichen Effizienz von KWK-Systemen identifiziert, was auch die durchgeführten exemplarischen Falluntersuchungen in Kapitel 5.2 bestätigen. Eine Möglichkeit zur Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils besteht in der Integration von Stromspeichern, wodurch elektrische Leistungs- und Lastspitzen geglättet werden können. Die Änderungen korrelieren auch mit einer Änderung des Stromdeckungsgrads<sup>19</sup>, der ebenfalls untersucht wird. Im Rahmen dieses Teilkapitels werden allgemeine Auslegungsansätze – unter der Annahme eines wärmegeführten Anlagenbetriebs – erarbeitet.

#### 5.3.1 Methodischer Ansatz

Erste, fragestellungsspezifische Excel-basierte Werkzeuge wurden bereits im Rahmen der DVGW Systemanalyse [252] entwickelt, woraus Erfahrungen und kritisch zu berücksichtigende Grenzen der vereinfachten Abbildung von Systemen abgeleitet werden konnten. Neben bereits vorhandenen detaillierten Modellen in der hochaufgelösten dynamischen Simulationsumgebung Modelica / Dymola, wurde im Rahmen des Projekts eine dynamische energiebilanzielle Simulation auf Basis von MATLAB® Simulink® zur Fokussierung multiparametrischer Fragestellungen entwickelt und umgesetzt.

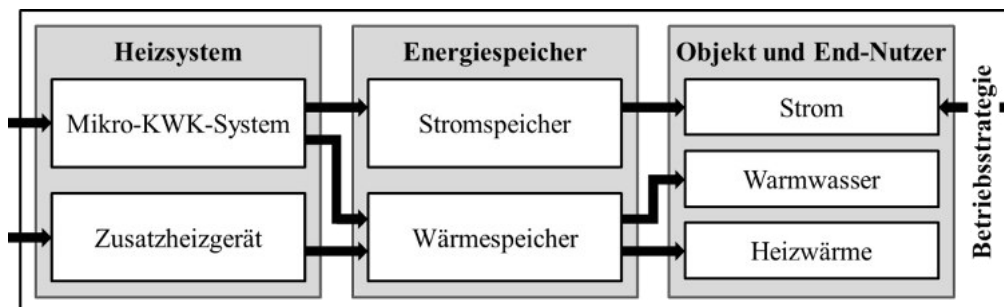


Abbildung 77: Übersichtsdarstellung der energie-bilanziellen Verknüpfungen der simulationstechnisch abgebildeten Teilsysteme

Um auf der einen Seite das Betriebsverhalten von unterschiedlichen Teilsystemen in unterschiedlichen Situationen zu analysieren und um auf der anderen Seite Einflüsse einzelner Parameter und qualitative Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern zu bewerten, werden unterschiedliche Analyse- und Auswertungsmethoden eingesetzt. Die erzeugten Datensätze für die Analysen basieren auf einer Vielzahl an Simulationsergebnissen. Allgemeine Objekteigenschaften sowie ein standardisiertes Nutzerverhalten sind integriert um die Energiebedarfe zeitlich zu differenzieren. Das Betriebsverhalten wird von verschiedenen Teilsystemen abgeleitet, welche durch Systemparameter innerhalb einer marktrepräsentativen Parameterbandbreite variiert werden können, siehe Abbildung 77.

<sup>18</sup> Der Stromeigennutzungsanteil beschreibt das Verhältnis von bereitgestelltem zu selbstgenutzten KWK-Strom. Da der selbstgenutzte KWK-Strom den Fremdstrombezug ablöst und damit im Verhältnis zur Einspeiseförderung hohe spezifische Stromkosten einspart, ist ein hoher Stromeigennutzungsanteil wirtschaftlich attraktiv.

<sup>19</sup> Der Stromdeckungsgrad beschreibt das Verhältnis von selbstgenutzten KWK-Strom zum Gesamtstrombedarf. Ein hoher Stromdeckungsgrad entspricht somit einem geringen Anteil an Fremdstrombezug.

### 5.3.1.1 Objekt- und nutzerspezifische Eigenschaften

Die objekt- und nutzerabhängigen Energiebedarfe können variiert werden um einen größtmöglichen Einsatzbereich von KWK-Systemen sowie der peripheren Speichertechnologien abzudecken. Der Gesamtenergiebedarf ist dabei von der Anzahl an Bewohnern, der Wohnfläche sowie dem Effizienzstandard des Objektes abhängig. Im gewählten Ansatz kann dem objektseitigen Effizienzstandard ein wohnflächenspezifischer Heizwärmebedarf zugeordnet werden. Die angesetzten spezifischen Strom- und Trinkwarmwasserwärmebedarfe sind abhängig von der Anzahl an Bewohnern.

Die zeitliche Verteilung der unterschiedlichen Energiebedarfe basiert auf einem standardisierten und reproduzierbaren Jahresverlauf der substantiell aus dem Ansatz der VDI 4655 [117], mit einigen Anpassungen, abgeleitet werden kann. Hierbei wird angenommen, dass das Jahr in zehn repräsentative Typtage aufgeteilt werden kann. Jeder Tag eines Jahres wird einer der zehn Typtagkategorien in Abhängigkeit der mittleren Außentemperatur, des Bedeckungsgrades sowie des Wochentages zugeordnet. Typtagspezifische Parameter schlüsseln die Verteilung der Jahresenergiebedarfe auf die jeweiligen Typtage auf. Normierte Tagesprofile in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute sind im gewählten Ansatz für jeden Typtag und Energietyp (Heizwärme, Trinkwarmwasser und Strom) zu Grunde gelegt. Die zu Verfügung stehenden Parameter zur Aufschlüsselung der Jahresenergiebedarfe sind jedoch nur für repräsentative Klimazonen in Deutschland anwendbar und basieren auf Ergebnissen vermessener Objekte im Rahmen eines begrenzten Untersuchungszeitraums. Daher wurde im Rahmen dieses Projekts eine Parameterkorrekturmethode zur Abbildung beliebiger Ort und Stützjahre entwickelt und angewendet. Die Aufschlüsselung des Strom- und des Trinkwarmwasserbedarfs beruhen auf dem angesprochenen Ansatz. Im Gegensatz hierzu ist die Energiebedarfsverteilung des Jahresheizwärmebedarfs grundlegend angepasst worden. Der tägliche Heizwärmebedarf wird in Abhängigkeit der quadratisch-gewichteten, geglätteten, mittleren Außentemperatur vorgenommen. Dieses Vorgehen berücksichtigt die methodischen Annahmen aus [253] in einem leicht angepassten Ansatz. Neben der geänderten tagesabhängigen Bedarfsverteilung werden die Tagesprofile der VDI 4655 durch angepasste Standardlastprofile aus [136] mit dem Fokus auf den Wärmebedarf für die Simulationen verwendet. Für die durchgeführten Analysen werden die Tagesmitteltemperatur- und Bedeckungsgradverläufe für Düsseldorf als Landeshauptstand von Nordrhein-Westfalen des Jahres 2006 zu Grunde gelegt.

### 5.3.1.2 Systeme zur Wärmebereitstellung

Das KWK-Aggregat stellt gleichzeitig Wärme und Strom bereit und repräsentiert eines der zentralen Teilsysteme im Rahmen der Gesamtuntersuchung. Das Teilsystem ist durch unterschiedliche Gleichungen und beschreibende Parametersätze in die Modellierung integriert. Die beschreibenden Parametersätze sind abhängig von der gewählten Technologie und ermöglichen eine marktrepräsentative Abbildung des KWK-Aggregats im Rahmen der Simulation. Datensätze für Otto- und Stirling-Motoren sowie für PEM- und SOFC-Brennstoffzellen sind integriert. Die thermische Nennleistung der KWK-Aggregate stellt einen variablen Eingangsparameter für die Bewertung und Analyse der Aggregatsauslegung dar. Die Stromkennzahl des KWK-Aggregats wird genutzt um KWK-Aggregate miteinander zu vergleichen und

ist vom dem Hintergrund der Analyse des Betriebsverhaltens von Stromspeichern von entscheidender Bedeutung. Auf Grundlage von unterschiedlichen Parameterdatensätzen aus [255] ist das Startverhalten in Abhängigkeit der gewählten Technologie integriert.

Neben dem eigentlichen KWK-Aggregat wird üblicherweise ein Zusatzheizgerät (ZHG) installiert, um die Lieferung der geforderten Wärme zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine automatisierte Auslegung des Zusatzheizgerätes implementiert. Die angesetzte thermische Leistung des Zusatzheizgerätes ist im gewählten Ansatz unabhängig von der thermischen Leistung des KWK-Aggregats und wird über die Heizlast nach [256] sowie eine jahresmittlere Leistung zur Trinkwarmwasserbereitung beschrieben. Unter Berücksichtigung von Modulationsbereichen von marktverfügbaren Brennwertgeräten – die üblicherweise als Zusatzheizgeräte eingesetzt werden – wird eine untere Modulationsgrenze des Zusatzheizgerätes von 20 % unterstellt.

### 5.3.1.3 Wärme- und Stromspeicher

Ein Wärmespeicher wird eingesetzt um den Wärmebedarf von der Wärmebereitstellung der Heizsysteme zeitlich zu entkoppeln. Dies stellt einen Betrieb des KWK-Systems in einem optimalen Betriebspunkt mit höchster Effizienz sicher und verringert Taktungen, die zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen würden. Der – im Rahmen dieser Untersuchung – eingesetzte Wärmespeicher entspricht einem konventionellen wasserbasierten Speicher. Die heizungstechnische Verschaltung der Teilsysteme wird nicht tiefergehend detailliert, da der Wärmespeicher in einem energie-bilanziellen Ansatz, analog zu [252] in das Gesamtsystem integriert ist. Dieser Ansatz ist anwendbar, da der mittlere Energieinhalt des Wärmespeichers unabhängig von der Speicherhöhe ist. Der mittlere Energieinhalt kann aus der mathematischen Integration der Temperaturverteilung über die Gesamthöhe des Speichers ermittelt werden. Unter diesen Bedingungen ist der maximale energietechnische Wärmespeicherinhalt direkt von der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, dem enthaltenen Wasservolumen sowie der maximal nutzbaren Temperaturdifferenz abhängig. Die maximale Mitteltemperaturdifferenz des Wärmespeichers wird mit 20 K im Rahmen der Simulation angesetzt. Neben der eigentlichen simulationstechnischen Beschreibung des Wärmespeichers sind auch Wärmeverluste in Abhängigkeit der wirkenden Temperaturdifferenz von mittlerer Wärmespeichertemperatur zur Aufstellraumtemperatur implementiert.

Der Einsatzbereich von Stromspeichern ist vergleichbar jenem der zuvor aufgezeigten Wärmespeichern. Der Stromspeicher wird eingesetzt um die nutzerseitigen elektrischen Leistungsanforderungen von der bereitgestellten elektrischen Energie des KWK-Systems zu trennen. Analog zum Wärmespeicher ist der Stromspeicher als ein energie-bilanzielles Teilmodell in der Simulation enthalten. In Abhängigkeit der simulationstechnisch abgebildeten Stromspeichertechnologie (Blei- oder Lithium-basierte Speicher) sind vorkonfigurierte Parametersätze in Anlehnung an marktverfügbare Systeme zur Beschreibung des Speicherverhaltens integriert. Die zulässige Entladungstiefe sowie maximale Be- und Entladeleistung stellen die wesentlichen Unterschiede der Technologien im Hinblick auf die Parametersätze dar. Um den Stromspeicher mit der elektrischen Verteilung des Objektes verknüpfen zu können, ist ein Wechselrichter mit einer lastflussrichtungsunabhängigen Effizienz in die Simulation inte-

griert. Der Stromspeicher zeichnet sich durch eine ladungszustandsabhängige Selbstentladung, in abhängig von der gewählten Technologie, aus. Die resultierenden Verluste sind im Rahmen der Simulation implementiert.

#### 5.3.1.4 Wärmegeführte Betriebsstrategie

Eine allgemeingültige Regelungsvorgabe für KWK-Systeme ist nicht verfügbar. Herstellererfahrungen sowie unterschiedliche Zielvorgaben sind in die Systemregelung integriert. Ferner sind die Systemregelungen abhängig von der hydraulischen Verschaltung der Teilsysteme. Daher wird eine allgemeine wärmegeführte Regelstrategie angenommen. Die Möglichkeit einer KWK-Leistungsmodulation ist nicht integriert. Die resultierende Regelung der thermischen Systeme basiert auf fünf Schaltzuständen, die auf dem Ladezustand des thermischen Speichers beruhen und abhängig von einer Vielzahl an Parametern und Systemgrößen sind.

##### ➤ ZHG An (Max)

Das ZHG arbeitet in Volllast, sofern der Ladezustand des Wärmespeichers unter einen minimalen Grenzwert fällt. Hierzu wird angenommen, dass ein Zusammenhang zwischen minimalen Ladezustand und der Anzahl an Bewohnern besteht. Diese Annahme beruht darauf, dass ein Mindestenergieinhalt im Speicher zur Warmwasserbereitung zu zur Verfügung stehen muss. Der Grenzwert des Schaltzustands wird in einer, auf diese Untersuchung angepassten, Interpretation der Vorgaben aus [257] quantifiziert.

##### ➤ ZHG An (Min)

Um ein Absinken des Wärmespeicherladezustands unter den zuvor genannten unteren Grenzwert zu vermeiden, wird das Zusatzheizgerät bereits vor Erreichen des Grenzwertes angeschaltet. Die regelungstechnisch abgefragte Leistung des Zusatzheizgerätes ist abhängig vom Ladezustand des Wärmespeichers. Der Schaltzustand basiert auf einer zeitlich-abhängigen Verschiebung des zuvor beschriebenen Schaltzustandes. Der angesetzte Schaltzustand wird von der erwarteten thermischen Energie des Zusatzheizgerätes innerhalb eines Betriebs von 15 Minuten bei Minimallast abgeleitet.

##### ➤ ZHG Aus

Um einen überhöhtes Takten des Zusatzheizgerätes zu vermeiden, ist eine Hysterese in die Systemregelung integriert. Die Ausschaltbedingung wird, wie beim vorherigen Schaltpunkt, in Abhängigkeit einer zeitlichen Ladezustandsverschiebung abgeleitet.

##### ➤ KWK An

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Schaltbedingungen ist die Einschaltbedingung für das KWK-Aggregat variabel. Die Einschaltbedingung basiert weiterhin auf dem Ladezustand bzw. die noch zur Verfügung stehende Kapazität des Wärmespeichers. Die Einschaltbedingung „KWK An“ entspricht dem arithmetischen Mittelwert aus der Ausschaltbedingung des Zusatzheizgerätes „ZHG Aus“ und der Ausschaltbedingungen des KWK-Aggregats „KWK Aus“. Sofern die erwartete Laufzeit des KWK-Aggregats jedoch eine Laufzeit von einer Stunde unterschreiten würde, wird die Einschaltbedingungen in Richtung der Ausschaltbedingung des Zusatzheizgerätes verschoben um eine minimale Laufzeit des KWK-Aggregats garantieren zu können.

### ➤ KWK Aus

Wenn der mittlere Energieinhalt des Wärmespeichers dem maximalen relativen Speicherinhalt entspricht, wird das KWK-Aggregat ausgeschaltet.

Die Verknüpfung der unterschiedlichen Schaltbedingungen sowie die resultierenden abgefragten normierten Leistungen sind im Anhang (Kapitel 8) dargestellt. Hierbei handelt es sich um die regelungstechnisch geforderten Leistungen, die jedoch – in Abhängigkeit des Anfahrverhaltens des Teilsystems – erst mit einer technologieabhängigen Verzögerung innerhalb der Simulation bereitgestellt werden.

Das regelungstechnisch resultierende Betriebskennfeld ist in Abhängigkeit des Ladezustands des Wärmespeichers in Abbildung 78 dargestellt. Der Betriebsbereich zeichnet sich durch die implementierten Hysteresen für das KWK-Aggregat und das Zusatzheizgerät durch zwei, richtungsabhängige Verläufe aus.

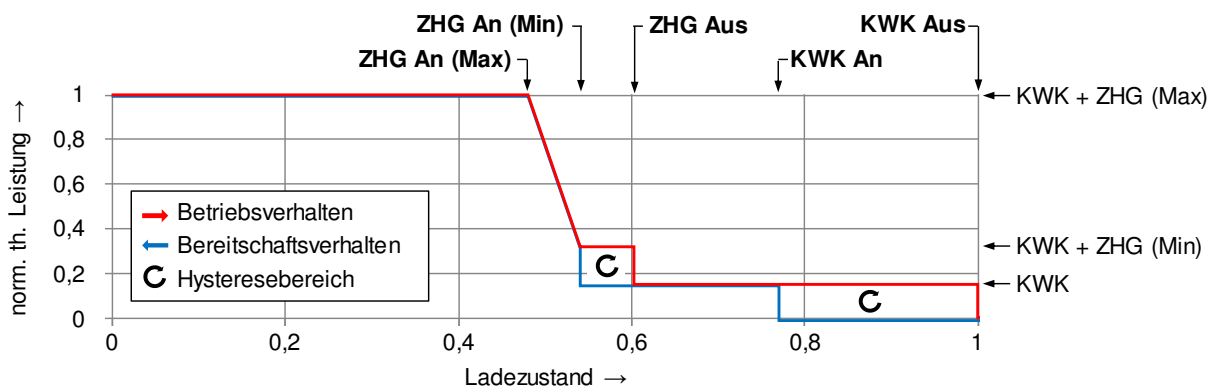


Abbildung 78: Exemplarische normierte wärmegeführte Betriebsweise für ein Wärmespeichervolumen von 500 l, einer thermischen Nennleistung des KWK Systems von 2,5 kW, einer maximalen Leistung des Zusatzheizgerätes von 13,9 kW sowie 3 Bewohnern. [258]

Durch den adaptiven Ansatz können beliebige Regelungsstrategien und -vorgaben in die Modellumgebung implementiert werden, sodass beispielsweise ein netzdienliches, ein stromgeführtes oder auch ein preissignalgeführtes Verhalten zukünftig abgebildet werden können.

### 5.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse in diesem Kapitel sind hinsichtlich der beiden vorgestellten Analysemethoden unterschieden. Die Simulationsergebnisse beziehen sich auf das bereits erwähnte Referenzjahr 2006 für den Standort Düsseldorf unter Berücksichtigung eines Glättungsfaktors zur Mitteltemperaturermittlung von 0,5 sowie auf den folgenden grundlegenden Parametern. Der Wärmeenergiebedarf und die damit verknüpften tytagabhängigen Lastprofile leiten sich aus einer Wohnfläche von 120 m<sup>2</sup> in Kombination mit einem spezifischen Raumwärmebedarf von 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) ab. Die Bewohnerstruktur des Objektes kennzeichnet sich durch 3 Bewohner aus, die mit einem spezifischen Wärmeenergiebedarf für Warmwasser von 500 kWh/(Person·a) beschreiben werden. Aufbauend auf diesen Vorgaben ergibt sich ein kumulierter Wärmebedarf von 25.500 kWh/a. Das BHKW ist mit einem, für Otto-Motoren typisches Anfahrverhalten, implementiert und kann leistungstechnisch durch eine thermische



Leistung von 2,5 kW sowie eine elektrische Leistung von 1,0 kW beschrieben werden. Die resultierende Stromkennzahl als Verhältnis von elektrischer zu thermischer Leistung des Systems liegt bei 0,4. Der ZHG ist mit einer thermischen Nennleistung von 12,9 kW so bemessen, dass es angeforderte Wärmeanfragen jederzeit bedienen kann. Durch die untere Modulationsgrenze von 20 % der Nennlast kann das ZHG sehr flexibel mögliche Wärmeanforderungen unter der Prämisse einer möglichst hohen KWK-Betriebszeit realisieren. Der angesetzte Wärmespeicher beinhaltet ein Wasservolumen von 500 l und enthält aufgrund der getätigten temperaturabhängigen Annahmen einen Energieinhalt von 11,4 kWh im maximalen Ladezustand. Die aufgezeigten Objekt-, Nutzer- und Systemeigenschaften werden für die folgenden Analysen fixiert. Zusätzliche notwendige oder speziell variierbare Parameter innerhalb der verschiedenen nachfolgenden Analysen werden gesondert erläutert.

### 5.3.2.1 Zeitlich differenzierte Ergebnisse

Die zeitlich differenzierte Analyse erfolgt unter Berücksichtigung eines elektrischen Speichers auf Basis der charakteristischen Eigenschaften einer Lithiumbatterie mit einer Bruttokapazität von 5 kWh. Der Gesamtstrombedarf für die angenommenen 3 Bewohner resultiert aus einem spezifischen Strombedarf von 1.379 kWh/(Person·a). Als normierte Vergleichsgröße zur Auslegung von KWK-System wird in Anlehnung an die entwickelte Kenngröße in [258] das Verhältnis vom objektseitigen Strom- zu Wärmebedarf herangezogen. Für das untersuchte Gebäude ergibt sich eine objektseitige Stromkennzahl von 0,162, die zum eingesetzten Mikro-KWK-System mit einer Stromkennzahl von 0,4 in Verbindung gebracht werden kann. Die Auswirkungen einer Variation der objektseitigen Stromkennzahl werden in der multiparametrischen Systemanalyse untersucht.

Die zeitliche differenzierte Analyse beruht weiterhin auf der Bewertung des zeitlich aufgelösten Systemverhaltens. Die Zuordnung der Typtage hinsichtlich der Jahreszeit ist vor dem Hintergrund einer wärmegeführten Betriebsweise von hoher Bedeutung, da an Typtagen der Kategorie „Sommer“ kein objektseitiger Heizwärmebedarf vorhanden ist und die thermischen Energiebereitstellungssysteme lediglich zur Bereitung von Trinkwarmwasser angefordert werden. Zur verbesserten Nachvollziehbarkeit der nachfolgend untersuchten Speicherzustandsprofile ist in Abbildung 79 die mittlere, geglättete Außentemperatur aufgetragen, die weiterhin entsprechend der jahrzeitlichen Typtagzuordnung unterlegt ist. Ferner sind die zu Grunde gelegten Grenzen zur Zuordnung der jahreszeitlichen Typtagkategorie (15 °C, 5 °C) gestrichelt dargestellt.

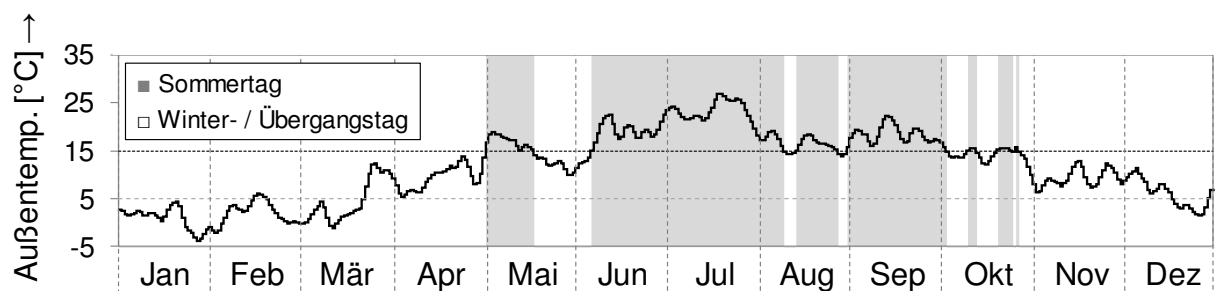


Abbildung 79: Geglätteter Verlauf der Tagesmitteltemperatur über das Referenzjahr, graphische Unterlegung der Sommertage sowie Auftragung der typtagzuordnenden Grenztemperaturen

Erwartungsgemäß führt die gemittelte Außentemperatur in den Sommermonaten zu einer einhergehenden Eingruppierung der jeweiligen Typtage in die Kategorie „Sommer“, welche grau unterlegt sind. Die graue Unterlegung setzt sich in den folgenden, zeitlich differenzierten Speicheranalysen fort und erleichtert die Ableitung und erhöht die Nachvollziehbarkeit von Schlussfolgerungen.

## Wärmespeicher

Unter Berücksichtigung der Prämissen der aufgezeigten wärmegeführte Betriebsstrategie fällt der Ladezustand des Wärmespeichers nicht unter einen systemkonfigurationsabhängigen minimalen Ladezustand. Dieses gewährleistet die Verfügbarkeit einer Reservespeicherkapazität zur Sicherstellung des Trinkwarmwasserbedarfs. Der simulationstechnisch resultierende, zeitlich aufgelöste (arithmetische Tagesmittelwerte der minutenbasierten Rohdaten) Verlauf des relativen Wärmespeicherladezustands ist in Abbildung 80 dargestellt.

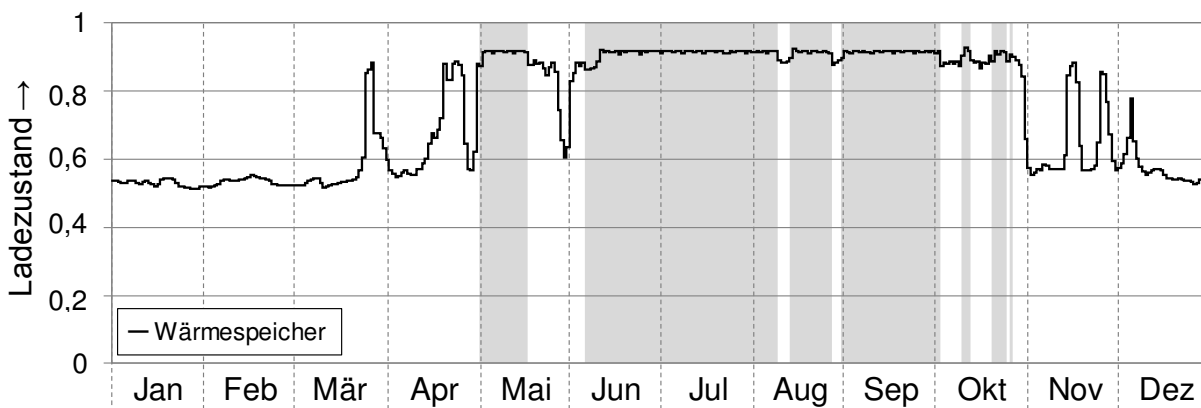


Abbildung 80: Verlauf des tagesmittleren Ladezustands des Wärmespeichers über das Referenzjahr

Ein lediglich gering-zeitversetzter Zusammenhang zwischen dem Ladezustand des thermischen Speichers und der gemittelten Tagesaußentemperatur ist erkennbar. Vor allem während der Winterperiode (an Tagen mit einer Außentemperatur von weniger als 5 °C) ist das KWK-System oft nicht in der Lage, den Gesamtwärmebedarf zu decken, sodass das ZHG angefordert wird. Diese Aussage ist aus dem niedrigen Ladezuständen vor dem Hintergrund der definierten Systemanforderungsgrenzwerte innerhalb der Betriebsstrategie ableitbar. Während der Sommermonate (an Tagen mit einer Außentemperatur von mehr als 15 °C) ist das KWK-System in der Lage, die geforderte thermische Energie zur Verfügung zu stellen. Folglich ist der Ladezustand des Wärmespeichers in diesen Zeiträumen konstant auf einem hohen Niveau. Während dieser Zeit wechselt der Betriebsstatus des KWK-Systems zwischen ein und aus verhältnismäßig häufig und das Zusatzheizgerät ist – zumindest theoretisch – nicht erforderlich. Während der verbleibenden Übergangszeit variiert der Ladezustand des Wärmespeichers zwischen einem hohen und niedrigen Zustand, was auf einen kombinierten Betrieb des ZHG und dem KWK-System schließen lässt.

## Stromspeicher

Im Gegensatz zum aufgezeigten Verhalten des thermischen Speichers kann der zeitliche Verlauf des Speicherladezustands des elektrischen Speichers, dargestellt in Abbildung 81, als nahezu entgegengesetzt beschrieben werden. Die Arbeitspunkte variieren zwischen dem maximalen Ladezustand des Speichers von 100 % und dem technologieabhängigen minimalen Speicherladezustand, der durch die arithmetische Tagesmittelung der Minutenwerte leicht oberhalb des eigentlichen Entladungsminimums von rund 15 % liegt.

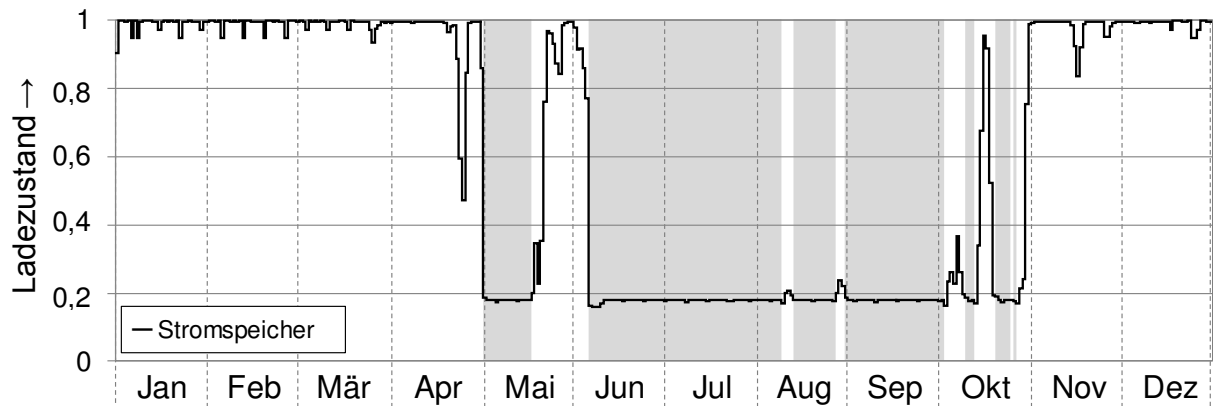


Abbildung 81: Verlauf des tagesmittleren Ladezustands des Stromspeichers über das Referenzjahr

Das Zusatzheizgerät hat keinerlei Einfluss auf den Stromspeicher, sodass aus den stromspeicherseitigen zeitlich aufgelösten Ladezustandsdiagrammen keine Aussagen zum ZHG abgeleitet werden können. Das KWK-System zeichnet sich durch einen nahezu durchgängigen Betrieb des KWK-Systems in Winter- und Übergangszeiten aus. In diesen Zeiträumen liefert das Mikro-KWK-System mehr Strom als objekt- bzw. nutzerseitig benötigt wird, sodass sich der elektrische Speicher im Tagesmittel nahezu durchgehend auf dem maximalen Ladeniveau des Stromspeichers befindet. Während der Sommermonate taktet das Mikro-KWK-System, sodass die gelieferte elektrische Energie – je nach Tageslaufzeit und Tagesenergiebedarf – den objekt- bzw. nutzerseitigen Energiebedarf nicht decken kann. Folglich ist der Arbeitsbereich des elektrischen Speichers im unteren Ladezustandsbereich innerhalb der Sommermonate zu verorten.

## Übergreifende Erkenntnisse

Aus den zeitlich aufgelösten Analysen der Speicherladezustände, können qualitative Interessenschwerpunkte für Analyse abgeleitet werden. Beispielsweise ist eine Korrelation zwischen der KWK-, den Speicher- sowie den Objekteigenschaften zu erwarten. Vor dem Hintergrund der aufgezeigten, marktüblichen Betriebsstrategie kann eine Optimierung der – eingangs als wirtschaftlichkeitsbeeinflussende Hebel identifizierten – Benchmarks (Stromeigennutzungsanteil und Stromdeckungsgrad) durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden.

Auf der einen Seite besteht ein Einsatzpotenzial für einen langfristigen Wärmespeicher um die KWK-Betriebszeit innerhalb der Sommermonate zu verlängern sowie auf der anderen Seite für einen langfristigen elektrische Speicher, um überschüssigen Strom aus der Heizperiode in die Sommersaison verlagern zu können. Ferner können alternative Mikro-KWK-Regelungsstrategien zu einer verbesserten Systemperformance beitragen, was im Rahmen dieser Studie nicht tiefergehend untersucht wird.

Bei der wärmegeführten Betriebsweise stehen zwei zentrale Größen im Fokus zur Potenzialabschätzung. Das Verhältnis von Anlagenleistung zu Speichervolumen ist eine maßgebliche Größe zur Bewertung der systemischen Flexibilität. Als variable Größe der nachfolgenden Parametervariationen wird die Veränderung der objektseitigen Anforderungen bei gleichbleibenden System- und Technologieeigenschaften untersucht. Durch die Veränderung der objektseitigen Stromkennzahl – als Verhältnis des objekt- und nutzerabhängigen Jahresstrom zum -wärmebedarfs – kann ein besseres Verständnis der Einflussparameter erreicht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können weitere Optimierungspotenziale zu Erreichung eines höheren Stromeigennutzungsanteils oder eines höheren Stromdeckungsgrads aufzeigen.

### 5.3.2.2 Ergebnisse der Parametervariation

Im Hinblick auf die Ergebnisse der zeitlich differenzierten Analyse wird die objektbezogene Stromkennzahl zwischen 0,05 und 0,45 variiert. Das Verhalten des thermischen Speichers ist identisch zu jenem in Kapitel 5.3.2.1 (Abbildung 80) dargestellten Verhalten, da lediglich der objektseitige Strombedarf – bei einem konstanten Jahreswärmebedarf – verändert wird.

Um den Einfluss des elektrischen Speichers qualitativ bewerten zu können, wird dieser im Rahmen einer übergelagerten Parametervariation untersucht. Die Simulationen zur objektseitigen Stromkennzahlvariation werden einerseits ohne einen elektrischen Speicher (0 kWh) und andererseits mit einem installierten elektrischen Speicher auf Lithium-Ionen-basis mit einer Bruttoleistung von 5 kWh durchgeführt.

Da ein Vergleich zeitlich differenzierter Speicherladungs- und Teilsystemleistungsverläufe bei einer Vielzahl an durchgeführten Simulationen nicht sinnvoll anwendbar ist, wird bei der Parametervariation lediglich der Einfluss des variierten Parameters auf eine Benchmarkgröße aufgezeigt. Eine parameterdifferenzierte Untersuchung des detaillierten dynamischen Verhaltens der einzelnen Teilsysteme ist somit nicht mehr direkt möglich. Die nachfolgenden Untersuchungen fokussieren sich auf die Parametereinflüsse und den damit ableitbaren Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf den Stromeigennutzungsanteil und den Stromdeckungsgrad.

## Stromeigennutzungsanteil

Der Einfluss der objektseitigen Stromkennzahl auf den Stromeigennutzungsanteil ist in Abbildung 82 als Kurvenschar für den wärmegeführten KWK-Betrieb mit und ohne Stromspeicher aufgetragen. Unabhängig davon, ob ein Stromspeicher integriert ist oder nicht, führt eine Erhöhung der objektseitigen Stromkennzahl zu einem erhöhten Stromeigennutzungsanteil. Dieser Zusammenhang kann anhand der Beziehung zwischen der Strombereitstellung des Mikro-KWK-Systems und der – über das Jahr nahezu konstanten – Stromnachfrage erklärt werden. Vor allem in der Winterzeit, in der ein nahezu kontinuierlicher Mikro-KWK-Betrieb vorliegt, können höhere objekt- und nutzerseitige Strombedarfe abgedeckt werden.

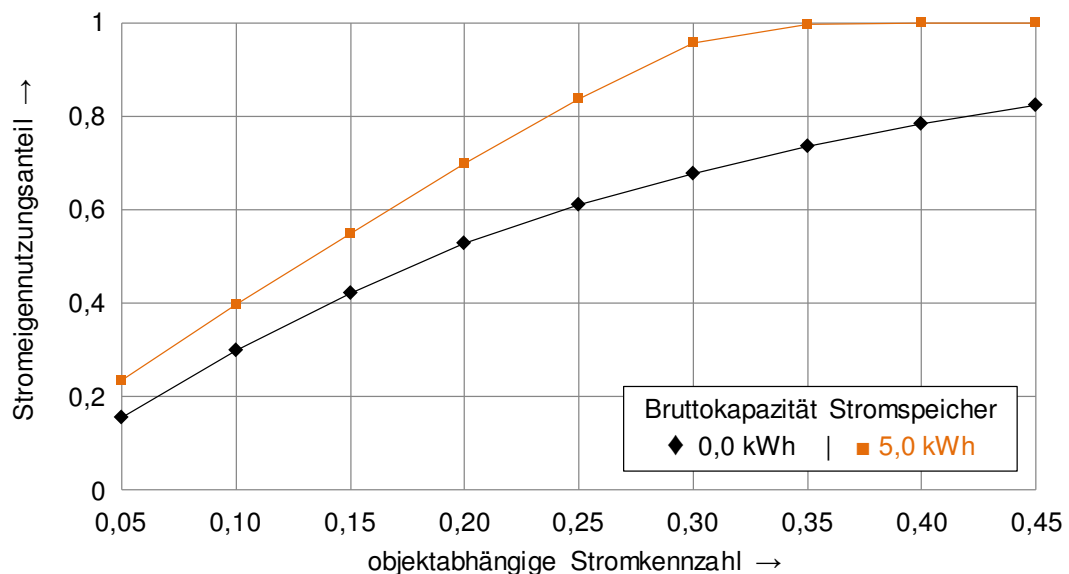


Abbildung 82: Einfluss der objektabhängigen Stromkennzahl auf den Stromeigennutzungsanteil

Durch den Einsatz eines Stromspeicher (mit einer hier angenommenen Bruttokapazität von 5 kWh) kann der Stromeigennutzungsanteil signifikant erhöht werden. Die nutzerseitig angefragte elektrische Leistung ist in den aufgezeigten Systembeispielen zu einigen Zeiten des Tages höher als die elektrische Leistung der KWK-Anlage, selbst wenn der Gesamtstrombedarf des Objekts (bei kleiner Stromkennzahl) sehr gering ist. Durch die Integration eines elektrischen Speichers in das Gesamtsystem können nutzerseitige höhere oder Spitzenleistungsanfragen jedoch oft durch eine Kombination aus der elektrischen Leistung des KWK-Systems (sofern in Betrieb) und der zur Verfügung stehenden Batterieleistung abgedeckt werden.

Ferner können die aufgezeigten Verläufe hinsichtlich der Änderungen bei einer Variation der KWK-Stromkennzahl übertragen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein direkter entgegengesetzter Zusammenhang zwischen objektseitiger und KWK-Stromkennzahl – sofern kein Stromspeicher integriert ist – besteht, da die thermische und somit betriebsbestimmende Grundlage identisch ist. Durch die Integration des Stromspeichers erfolgt eine zeitliche Lastverschiebung auf der elektrischen Seite, sodass lediglich eine Ähnlichkeit zum entgegengesetzten Verlauf bei der Transformation der Abszisse zur KWK-Stromkennzahl zu erwarten ist.

## Stromdeckungsgrad

Die nachfolgende Abbildung 83 zeigt die Veränderung des Stromdeckungsgrads bei Variation der objektabhängigen Stromkennzahl in Abhängigkeit der Stromspeicherkapazität auf. Unabhängig davon ob ein Stromspeicher installiert ist, sinkt der Stromdeckungsgrad des KWK-Systems bei steigender objektseitiger Stromkennzahl. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strombedarf und die damit einhergehend nutzerseitig angefragte elektrische Leistung die elektrische Leistung und bereitgestellte Arbeit des KWK-Systems deutlich übersteigt, selbst wenn das KWK-System beispielsweise im Winter nahezu konstant in Betrieb ist.

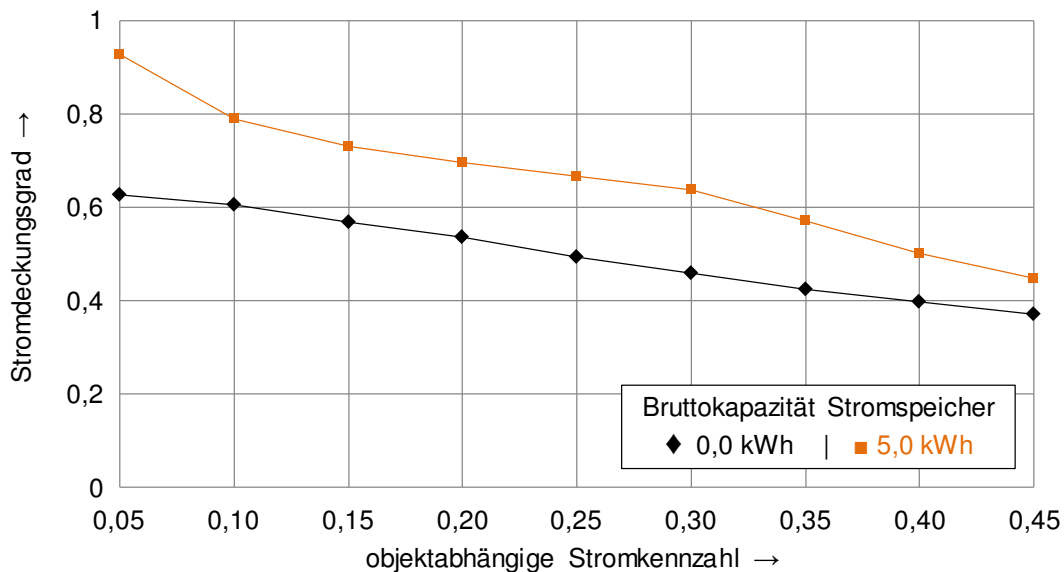


Abbildung 83: Einfluss der objektabhängigen Stromkennzahl auf den Stromdeckungsgrad

Der stromseitige Deckungsgrad nimmt mit einer Zunahme der objektseitigen Stromkennzahl ab, selbst wenn ein Stromspeicher installiert ist. Durch die Integration eines Stromspeichers kann die Deckungsgradreduktion jedoch gedämpft werden, da vor allem im Winter die bereitgestellten Energiemengen des KWK-Systems zwischengespeichert werden können um erhöhte Anfragen zu späteren Zeitpunkten zu decken.

Analog zum Stromeigennutzungsanteil sind eine direkte entgegengesetzte Abszissentransformation beim Betrieb mit einem Wärmespeicher und eine ableitbare Ähnlichkeit bei der Transformation beim Betrieb mit einem Wärme- und Stromspeicher zu erwarten.

Der Vergleich der Verläufe des Stromeigennutzungsanteils und des Stromdeckungsgrads zeigen auf, dass nahezu antiproportionale Verlaufcharakteristika vorliegen. Eine Erhöhung der objektseitigen Stromkennzahl führt zu einer Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils bei gleichzeitiger Reduktion des Stromdeckungsgrads. Durch eine höhere nutzerseitige Stromanfrage kann die bereitgestellte Energie des KWK-Systems häufiger im Objekt genutzt werden, zeitlich ist jedoch ein erhöhter Bedarf an Strom aus dem Netz erforderlich um die verbleibenden Strombedarfe decken zu können.

### 5.3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Verschiedene Parameter beeinflussen eine synergetische Verbindung zwischen objekt- und nutzerspezifischen Energiebedarfen, KWK- und ZHG-Leistungen und Eigenschaften sowie den integrierten thermischen und elektrischen Speichern. Der Einfluss der objektbezogenen Stromkennzahl in Kombination mit fixierten KWK- und ZHG-Systembeschreibungen bei einer wärmegeführten Betriebsstrategie wurde anhand einer Parametervariation nachvollziehbar an einer exemplarischen Case-Study dargestellt. Mögliche Optimierungspotenziale des KWK-Stromnutzungsverhaltens sind durch den Einsatz von elektrischen Speichern aufgezeigt worden. Unterschiedliche Maßnahmen zur Erhöhung des Stromeigennutzungsanteil sowie des Stromdeckungsgrads sind identifiziert worden.

Neben Langzeitenergiespeichern sowie variablen und einstellbaren KWK-Stromkennzahlen stellt auch die Erweiterung der systemischen Modulationsfähigkeit eine Möglichkeit zur Optimierung des KWK-Stromnutzungsverhaltens dar. Die Entwicklung einer stromspeicherorientierten Regelungsstrategie im Hinblick auf eine optimierte Verknüpfung aller Teilsysteme wird als ein zentraler Forschungsaspekt identifiziert, um die ganzheitlichen Möglichkeiten der Integration von elektrischen Speichern beim Einsatz von KWK synergetisch zu nutzen.





# 6 Forschungsagenda

*Die Ergebnissen der Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts und die Auswertung der durchgeführten Workshops stellen in Verbindung mit den Ergebnissen anderer KWK-Studien die Grundlage für die – in Teilen landesspezifische – KWK-Forschungsagenda dar. Die Integration weiterer Forschungsinstitute in das **Virtuelle Institut | KWK.NRW** geht voran, sodass eine nachhaltige, umfassende und übergreifende Weiterführung und Erweiterung der landesspezifischen Forschungsagenda auch in Zukunft gesichert wird.*

---

## **Erzeugungstechnologie**

- *Brennstoffzellen*
- *Verbrennungsmotoren*
- *Gasturbinen und Dampfturbinen*
- *Weitere Technologien*
- *Brennstoffqualität*

## **Infrastruktur**

- *Wärme- und Kältenetze*
- *Stromnetze*
- *Gasnetze*
- *Wärme- und Kältespeicher*
- *Stromspeicher*

## **System- und Pfadanalysen**

- *Energiebereitungs- und -versorgungssysteme*
- *Objekt- und Fernwärme-KWK*
- *KWK-Potenziale für Industriebranchen*
- *Analyse der Wärme-, Kälte- und Strombedarfe*
- *Untersuchung und Klassifizierung von Wärmesenken*

## **Rahmenbedingungen und Hemmnisse**

- *Genehmigungs- und Beantragungsverfahren*
- *Volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen*
- *Markt- und Vertriebsmodelle*
- *Kommunikation und Akzeptanz bei der Bevölkerung*

# Erzeugungstechnologien

---

## Brennstoffzellen

---

Die Optimierung der Produktion und Fertigungsverfahren stellt einen wesentlichen Forschungsbereich für die erfolgreiche Markteinführung bzw. Marktdurchdringung der Brennstoffzellentechnik dar. Die Herstellung und Assemblierung der Stacks sollte, z. B. durch eine reduzierte Anzahl an Prozessschritten, vereinfacht werden. Für die Systemfertigung sollten intelligente (teil-) automatisierte Lösungen erarbeitet werden, die auch die Qualitätssicherung bei der Massenfertigung adressieren.

Ferner liegt ein Hebel zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellen in der Formulierung von Standards zur Reduktion der Systemkosten durch die Nutzung von Synergieeffekten. Dieser Ansatz fokussiert einen vermehrten Einsatz von Gleichteilen und dient damit der Überführung in eine standardisierte Komponenten-Herstellung. Hier sind herstellerübergreifende Entwicklungen anzustreben. Dies gilt gleichermaßen für die Implementierung von Standards hinsichtlich der hydraulischen und elektrischen Schnittstellen der Systeme.

Des Weiteren steht die technische Weiterentwicklung und Optimierung im Fokus der Forschung. Zahlreiche Effekte, wie beispielsweise die Senkung von Wartungskosten, die Steigerung der Lebensdauer sowie die Erhöhung der Robustheit und der Zyklenstabilität der Systeme insbesondere des Stacks, sind zentrale Entwicklungsthemen. Einen signifikanten Anteil zur Optimierung von Wartungskosten stellt die Optimierung der Entschwefelung dar. Hier sind günstigere Verfahren sowie geeignete Sensoren zu entwickeln. Erfolgreiche Forschung und Entwicklung in diesen beiden Themenkomplexen würde nicht nur die Wartungskosten reduzieren, sondern durch verlängerte Serviceintervalle auch die Ausfall- bzw. Wartungszeiten verringern. Um das gesamte Potenzial der Brennstoffzellentechnik zu heben, ist die weitere Ausschöpfung des elektrischen Wirkungsgradpotenzials bei konstantem Gesamtnutzungsgrad bei Nenn- und Teillast mittel- und langfristig von entscheidender Bedeutung und sollte daher kontinuierlich forschungstechnisch begleitet werden.

---

- *Optimierte Herstellungsprozessketten*
- *Komponentenoptimierung*
- *Qualitätssicherung bei Massenfertigung*
- *Implementierung von herstellerübergreifenden Standardisierungen*
- *Verfahrensoptimierung zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads sowie des Gesamtnutzungsgrads bei Nenn- und Teillast*
- *Erhöhung der Robustheit sowie Zyklenstabilität*
- *Reduktion der (Stack-) Degradation*
- *Optimierung der Entschwefelung & Entwicklung geeigneter Gassensoren*
- *Reduzierung der Ausfall- bzw. Wartungszeiten*

---

## Verbrennungsmotoren

---

Der Hauptforschungsbereich bei verbrennungsmotorischen KWK-Systemen besteht sowohl in der Erhöhung der Flexibilität als auch in der Verbesserung der Effizienz. Durch den Betrieb in Teillast können sich KWK-Systeme optimal an äußere Führungsgrößen anpassen. Hierfür stehen jedoch die Erhöhung der Teillastfähigkeit bzw. die Absenkung der Mindestlast sowie die damit einhergehende emissionstechnische Verbesserung des Teillastbetriebs im Forschungsvordergrund. Neben der Teillasteffizienz stellen auch die allgemeine Erhöhung der Gesamtsystemeffizienz sowie des elektrischen Wirkungsgrads essentielle Forschungsinhalte dar. Um den Betrieb der Systeme zu optimieren, ist eine Reduzierung von möglichen ausfall- sowie von notwendigen wartungsbedingten Stillstandszeiten von Interesse.

---

- *Erhöhung der Teillastfähigkeit/Absenkung der Mindestlast*
- *Steigerung der Gesamteffizienz sowie des elektrischen Wirkungsgrads*
- *Emissionsminderung bei Nenn- und Teillast*
- *Reduzierung von möglichen Ausfall- sowie von notwendigen Wartungszeiten*

---

## Gasturbinen und Dampfturbinen

---

Anlagen mit Gasturbinen, Dampfturbinen sowie kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozessen gehören zu den effektivsten Maschinen zur kraftwerkstechnischen elektrischen Energieerzeugung. Aufgrund der zunehmenden Produktion elektrischer Energie durch erneuerbare Energien wachsen die Anforderungen an einen schnelleren und damit flexibleren Betrieb. Diese Anforderungen führen im Rahmen der Entwicklung und Weiterentwicklung von Gasturbinen und Dampfturbinen zu einer Fokussierung der Bereiche der Erhöhung der Teillastfähigkeit / Absenkung der Mindestlast, der Emissionsminderung bei Teillast, der bedarfsabhängigen Verschiebung des Leistungsoptimums sowie der Erhöhung der Anzahl der Startups und der Laständerungsgeschwindigkeit.

---

- *Erhöhung der Teillastfähigkeit/Absenkung der Mindestlast*
- *Emissionsminderung bei Teillast*
- *Verschiebung des Leistungsoptimums der Maschinen*
- *Erhöhung der Anzahl der Startups*
- *Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit*

## Weitere Technologien

---

Neben den zuvor genannten Technologien gibt es weitere KWK-Technologien – wie z. B. Stirling-Motoren und Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Anlagen bzw. Techniken zur KWK-Betriebsoptimierung, wie thermochemische Rekuperatoren und thermoelektrische Generatoren. Hierbei stellen die Optimierung und die Erweiterung von KWK-Einsatzbereichen, beispielsweise durch die Variation der Stromkennzahl sowie der Einsatz von alternativen KWK-Anwendungen, einen Forschungsschwerpunkt zur weiteren Effizienzerhöhung dar. Ab- und Adsorptionskältemaschinen können zu einer Verbesserung des KWK-Betriebs führen. Hierfür ist eine angepasste Optimierung der Kältemaschinen notwendig. Unter Berücksichtigung der Interaktion der Systeme mit der Peripherie sollte der Einsatz der KWK-Technologien untersucht und demonstriert werden.

---

- *Einsatzbereiche für Stirling-Motor und Organic-Rankine-Cycle Systeme*
- *Optionen für thermochemische Rekuperatoren und thermoelektrische Generatoren*
- *Potenziale für Kältemaschinen, die mit KWK-Wärme betrieben werden (KWKK)*

## Brennstoffqualität

---

Schwankungen der lokalen Erdgasbeschaffenheit treten häufiger auf und fallen stärker aus, sodass der Betrieb der KWK-Technologie beeinflusst wird. Gasbeschaffenheitsschwankungen können sich je nach Technologie und Leistungsgröße u. a. auf die Betriebssicherheit (Flame-Out, Flammenrückschlag), die Effizienz (Klopffverhalten), die Emissionen (NO<sub>x</sub>, CO) sowie die Lebensdauer auswirken, sodass mögliche Effekte erforscht werden sollten.

Einhergehend mit den Schwankungen der Erdgasbeschaffenheit ist die Möglichkeit der Substitution von konventionellen durch alternative Brennstoffe für KWK zu nennen. Wechselwirkungen mit Wasserstoff oder SNG (Synthetic Natural Gas) als Verknüpfung zwischen Power-to-Gas und KWK als effiziente Rückverstromungstechnologie stellen einen zentralen Forschungsschwerpunkt dar. Ferner sollten LNG (Liquefied Natural Gas) sowie biogene Gase hinsichtlich der Verträglichkeit mit verschiedensten KWK-Anwendungen untersucht werden.

Weiterhin ist die Untersuchung von Fuel-Switch-Effekten von hohem Interesse, wobei kohlebefeuerte Anlagen durch gasbasierte KWK-Anlagen ersetzt werden, da hier ein hohes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial – auch aus wirtschaftlicher Sicht – vorhanden zu sein scheint. Auch in der öffentlichen Versorgung wird die Umstellung oder der Ersatz von Kohle-KWK-Anlagen bedeutend. Ein weiterer Aspekt des Fuel-Switches stellt die großflächige Umstellung von L- auf H-Gas (low und high calorific gas) im übertragenen Sinne dar. Auch hier sind Untersuchungen zur Verträglichkeit in KWK-Anlagen notwendig.

---

- *Regionale Schwankungen der Gasbeschaffenheit*
- *Konventionelle und alternative Brennstoffe für KWK (neben Erdgas)*
- *Bewertung und Nutzung von Fuel-Switch-Effekten*
- *Verträglichkeit der Gasbeschaffenheit in Bezug auf KWK-Anwendungen*

---

# Infrastruktur

---

## Wärme- und Kältenetze

---

Die Bedeutung von Fernwärmenetzen (FW-Netzen) auf dem Wärmemarkt nimmt zu. Das Potenzial an Fernwärme ist insbesondere in dichtbesiedelten Gebieten hoch. KWK-Anlagen sind für den größten Teil der Fernwärmeerzeugung zuständig. Dazu kommt die Tatsache, dass Wärme aus verschiedenen Quellen in ein gemeinsames FW-Netz einfließen kann. Dies ist auch für KWK-Anlagen eine Option, flexibel gefahren werden zu können, indem überschüssige Wärme in ein FW-Netz eingespeist wird, wenn lokal kein Bedarf vorhanden ist. In diesem Zusammenhang sind die Auswirkungen einer Öffnung von FW-Netzen auch für weitere Einspeiser zu untersuchen. Die Einspeisung bezieht sich auf konventionelle Wärmeerzeugung, auf die Nutzung von Abwärme aus verschiedenen Industriebranchen sowie auf die Wärmeerzeugung durch erneuerbare Energien. Durch die Öffnung der Netze können Produzenten und Verbraucher sowie mögliche Prosumer integriert werden, sodass die Durchleitung von Wärme in vorhandenen Wärmenetzen ermöglicht werden kann. Eine Vielzahl von technischen und rechtlichen Fragestellungen ist noch offen, so dass die wirtschaftliche Relevanz ebenfalls Gegenstand von Untersuchungen sein sollte.

Zur Versorgungssicherheit und Steigerung der Qualität von Wärmenetzen besteht ein Bedarf zur Entwicklung von automatisierten Systemen zur Überwachung und Lokalisierung von Leckagen in solchen Netzen.

Wärmenetze mit niedriger Vorlauftemperatur (Low-Ex) sind hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit, der systemischen Effizienz und der Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Vor dem Hintergrund des Einsatzes von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ist zu untersuchen, inwiefern die Erbauung oder die Umwandlung vorhandener Wärmenetze zu Kältenetzen sinnvoll bzw. möglich ist.

Da Wärmenetze teilweise historisch gewachsen sind und ihre eigenen Kundenkreise bedienen, ist eine optimale „Neuauslegung“ schwierig und teilweise nicht sinnvoll. Es empfiehlt sich die Erstellung umfassender Detailinformation über FW-Netze in NRW, um weitere Planungsaktivitäten zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist die Wechselwirkung mit den Planungsaktivitäten hinsichtlich der Gasnetze zu berücksichtigen. Geeignete Modellierungen und Simulationen von FW-Netzen könnten diese Planungsaktivitäten erheblich erleichtern.

- 
- Öffnung von FW-Netzen für weitere Einspeiser (Industrieabwärme, erneuerbare Energien, Prosumer) und zur erweiterten Durchleitung von Wärme
  - Automatisierte Systeme zur Überwachung und Lokalisierung von Leckagen
  - Konzeptionierung von Low-Ex-Wärmenetzen
  - Potenzialermittlung für den Einsatz von Kältenetzen
  - Erstellung umfassender Detailinformation über FW-Netze
  - Modellierung und Simulation von FW-Netzen

## Stromnetze

---

Die Netzstabilisierung erfolgt derzeit vornehmlich durch Frequenzhaltung. Die Netzstabilisierung durch Spannungshaltung ist eine eher lokale Anforderung, die typischerweise auf den unteren Spannungsebenen erfolgt. In diesen Ebenen sind zukünftig die stärksten Änderungen und somit auch Schwankungen und Belastungen zu erwarten. KWK-Anlagen können prinzipiell netzkonforme und netzdienliche Systemdienstleistungen erbringen. Plan- und steuerbare KWK bietet in Kombination mit fluktuierenden erneuerbaren Energien Möglichkeiten zur regionalen Stabilisierung des Stromnetzes. Das Potenzial von KWK in diesem Zusammenhang ist weiter zu untersuchen. Es ist zu analysieren und zu definieren, was netzkonformes und netzdienliches Verhalten in Zukunft ausmacht und welchen Beitrag zur Systemdienstleistung große KWK-Anlagen, virtuelle Kraftwerke und Smart Grids mit Beteiligung von KWK leisten können.

Unabhängig von rechtlichen Vorgaben (z. B. Mittelspannungsrichtlinie) gibt es die Möglichkeit KWK, am Regelenergiemarkt einzubringen oder diese zukünftig in einem lastabhängigen Tarif netzkonform zu betreiben. Anhand von Messdaten aus dem Netzanschluss kann eine automatische Anpassung der Leistung und des  $\cos \varphi$  in bestimmten Grenzen erfolgen. Die positiven Effekte hieraus sollten weiter untersucht werden.

Für die Marktdurchdringung in der Wohnungswirtschaft sind rechtssichere Geschäftsmodelle zu entwickeln, für die klare Regeln bei Kundenanlagen wichtig sind.

---

- *Beitrag der KWK-Anlagen zum netzgerechten / -dienlichen Verhalten*
- *Untersuchung der KWK-Einsatzbarkeit zur Spannungs- und / oder Frequenzhaltung*
- *Analyse von Smart Grids und virtuellen Kraftwerke hinsichtlich möglicher Systemdienstleistungen*
- *Nutzung von Messdaten aus dem Netzanschluss zur Betriebsoptimierung*

## Gasnetze

---

Im Bereich der Gasnetze stehen die Wechselwirkungen von Gas- und Fernwärmenetzen leistungsübergreifend auf allen Ebenen im Fokus. Diese Thematik enthält mögliche Entwicklungsperspektiven von Arealnetzen und somit eine Antwort auf die Fragestellung, ob Gebiete durch konventionelle gas- oder durch KWK-basierte Wärmeversorgung erschlossen werden sollten. Ferner kann durch den Einsatz von LNG ein möglicher Ausbau von Gasnetzen reduziert werden, indem LNG in örtlicher Nähe zu einem KWK-System zur Verfügung gestellt wird.

Das verfügbare Gasnetz bietet eine enorme Flexibilitätsoption für das elektrische Netz durch den Einsatz von Power-to-Gas. KWK-Systeme als effiziente Rückverstromungstechnologie spielen in diesem Zusammenspiel eine entscheidende Rolle, sodass deren Einsatzmöglichkeiten tiefergehend untersucht werden sollten.

---

- *Untersuchung von Wechselwirkung von Gas- und Fernwärmenetzen*
- *Erhebung von Entwicklungsperspektiven von Arealnetzen*
- *Bewertung von LNG Versorgungsstrukturen als Option für KWK*

---

## Wärme- und Kältespeicher

---

Der Einsatz von Wärmespeichern ermöglicht eine Entkopplung von Erzeugung und Bedarf. Hierbei stehen drucklose thermische Speicher, Druck- und Dampf- sowie Eisspeicher im Vordergrund. Neben konventionellen, warmwasserbasierten Speichern, deren Schichtungsverhalten je nach Technologieanforderung optimiert werden kann, stehen Phase-Change-Material (PCM)-Speicher sowie thermochemische Speicher verstärkt im Fokus der Forschung. Durch den erweiterten Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sind die Erforschung und die Untersuchung der Einsetzbarkeit von Kältespeichern sinnvoll. Die Speicher-eigenschaften (Kinetik, Lastwechsel, Energiedichte) sowie neue Regelstrategien stellen wichtige Forschungsbereiche dar, die zu einer weiteren Erhöhung der Flexibilität von KWK-Systemen führen können. Neben den technisch möglichen Komponenten liegen die Identifikation und Hebung von Kostenreduktionspotenzialen, vor allem von innovativen Speichertechnologien, im Interessensbereich der KWK-Stakeholdergruppen.

---

- *Weiterentwicklung von wasserbasierten Speichern, PCM Speichern, thermochemischen Speichern*
- *Speicherverhalten und -eigenschaften (Kinetik, Lastwechsel, Energiedichte)*
- *Temperatur- und Druckniveau (Low-Ex, Eisspeicher und Dampfspeicher)*
- *Identifikation und Hebung von Kostenreduktionspotenzialen*

---

## Stromspeicher

---

In Kombination mit Stromspeichern kann KWK noch flexibler betrieben werden. Damit diese Kombination auch wirtschaftlich realisiert werden kann, müssen die Kosten von Batteriespeichern durch kontinuierliche Materialforschung und Entwicklung günstigerer Fertigungsverfahren wesentlich gesenkt und die Lebensdauer gesteigert werden. Das Speicherverhalten sowie die Speichereigenschaften (Lastwechsel, Leistungsverträglichkeit, Energiedichte) sollten hinsichtlich der optimalen Interaktion mit KWK angepasst werden. Darüber hinaus kann die Erprobung und Weiterentwicklung funktionaler Speicher im kombinierten Einsatz mit KWK einen signifikanten Beitrag zum Ausgleich von Netzschwankungen leisten.

---

- *Kostenreduktion durch Materialforschung und verbesserte Fertigungsverfahren*
- *Untersuchung und Anpassung der Speicherverhalten und -eigenschaften*
- *Erarbeitung von Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer*

## System- und Pfadanalysen

---

### Energiebereitungs- und -versorgungssysteme

---

Die Entwicklung und Implementierung eines intelligenten bedarfs- und wetterprognose-basierten Energiemanagementsystems kann leistungsübergreifend zur Verbesserung des KWK-Betriebs führen. Durch die Kombination mit Wärme- und Stromspeichern kann die regelungstechnische Flexibilität weiter gesteigert werden.

Die systemische Verschaltung von unterschiedlichen Versorgungstechnologien (z. B. Power-to-Heat, Gas- und Elektro-Wärmepumpe) kann vor dem Hintergrund volatiler Energiepreise zu einer gesamtsystemtechnischen Verbesserung führen. Diese Effekte sind in Bezug auf eine regionale Anwendbarkeit sowie eine praktische Umsetzbarkeit durch theoretische sowie praktische Untersuchungen zu bewerten.

Durch den vermehrten Einsatz von erneuerbarer Energien ergeben sich örtlich aufgelöste Lastzustände im Stromnetz, die zu einer Beeinflussung anderer Netze sowie des KWK-Betriebs führen können. Eine quantitative, regional und zeitlich aufgelöste Residuallast würde eine Grundlage für weitere Forschungsfragestellungen im Themenfeld der KWK darstellen. Hierbei sollte untersucht werden, welches Potenzial KWK im Hinblick auf die Residuallast bietet. Durch eine netzseitige Erweiterung um „indirekte“ Speicher (z. B. Power-to-Gas, Power-to-Heat) kann KWK als hocheffiziente Technologie zu einer flexiblen Verschiebung von Lasten auf unterschiedlichen Ebenen beitragen.

---

- *Potenzialanalyse zur intelligenten, prognoseabhängigen und flexiblen Steuerung von KWK-Anlagen*
- *Kombination von unterschiedlichen Teilsystemen (z. B. KWK mit Power-to-Heat, Gas- und Elektro-Wärmepumpen etc.)*
- *Interaktion von Strom-, Wärme- und Gasnetzen unter Berücksichtigung funktionaler Speicher*

### Objekt- und Fernwärme-KWK

---

Aufgrund der unterschiedlichen Dichte des Bedarfs an Wärme und Kälte, sowohl für Haushalte als auch im GHD Sektor, stellt sich die Frage nach einer wirtschaftlichen Optimierung zwischen KWK-Anlagen in der Objektversorgung und KWK-Anlagen der öffentlichen Fernwärmeversorgung. Die Grenze ist jedoch nur unter der Annahme von Rahmenbedingungen bestimmbar und kann sich in beide Richtungen verschieben. Diese komplexe Optimierung soll vor dem Hintergrund z. B. sich entwickelnden Wirkungsgraden, verändernden Netzkosten oder zukünftig wachsenden EE-Anteilen untersucht werden.

---

- *Wirtschaftliche Optimierung zwischen Objekt- und Fernwärme-KWK*
- *Untersuchung des Einflusses von äußeren Rahmenbedingungen*



---

## KWK-Potenziale für Industriebranchen

---

Studienergebnisse zeigen, dass in einigen Industriebranchen (z. B. Papier, Ernährung, Textil) der Bedarf an Wärme in dem Bereich 300 °C bis 500 °C, der durch neue oder zusätzliche KWK-Anlagen gedeckt werden kann, erheblich ist. Dieses KWK-Potenzial spezieller Industriebranchen sollte detailliert erfasst werden, zumal aufgrund der angenommenen Wachstumsraten einiger Industriebranchen ein zusätzlicher Wärmebedarf bis 2030 zu erwarten ist. Diese Informationen sollen helfen, neue KWK-Potenziale in der Industrie darzustellen.

Bei KWK-Bestandsanlagen in der Industrie ist die Erhöhung der Stromkennzahl ein wichtiges Thema, um die industrielle KWK-Stromerzeugung ohne Erschließung neuer Wärmesenken deutlich zu erhöhen. Eine Untersuchung des Einsatzes angepasster Erzeugungstechnologien ist daher sinnvoll.

---

- *Detaillierte Erfassung des KWK-Potenzial spezieller Industriebranchen*
- *Erhöhung der KWK-Stromerzeugung durch eine Steigerung der Stromkennzahl*

---

## Analyse der Wärme-, Kälte- und Strombedarfe

---

Die Ermittlung von Potenzialen für Objekt- und Fernwärme-KWK ist bereits in unterschiedlichen Studien für einzelne Bereiche durchgeführt worden. Eine ausgedehnte räumliche und zeitliche Auflösung von Wärme-, Kälte- und Strombedarfen stellt einen zentralen Forschungsschwerpunkt dar. Darüber hinaus sollten Referenzlastprofile für verschiedene GHD-Sektoren erarbeitet werden. Neben dem Status Quo sollten Entwicklungserwartungen an die Bedarfe ebenfalls regional und zeitlich aufgelöst ermittelt werden. Hierauf aufbauend ist eine Potenzialanalyse für unterschiedliche KWK-Leistungsgrößen durchführbar, aus der die weitere Entwicklung des KWK-Ausbaus in Abhängigkeit von unterschiedlichen Pfaden abgeleitet werden kann.

---

- *Potenziale für Objekt und Fernwärme-KWK*
- *Räumliche und zeitliche Auflösung KWK-Potenziale*
- *Referenzlastprofile für GHD-Sektor*
- *Status Quo, Entwicklungserwartung und Potenziale*

---

## Untersuchung und Klassifizierung von Wärmesenken

---

Die quantitative und qualitative Analyse von Wärmesenken als Einsatzbereich für potenzielle KWK-Anwendungen stellt eine Forschungsaufgabe dar. Neben der räumlichen Identifikation von Wärmesenken in der Nähe von z. B. Strom-Hot-Spots steht die Nutzbarmachung von Wärmesenken über neue Wärmenetze (z. B. Low-Ex) im Vordergrund. Die Identifikation der ableitbaren Hebelwirkung zur CO<sub>2</sub>-Einsparung durch KWK sollte Effekte von Dauerläufern sowie periodischen Lasten in Abhängigkeit der Einsatzbereiche und Leistungsklassen berücksichtigen. Durch den Einsatz von Speichern kann auch bei Kältenetzen ein optimierter KWK-Betrieb erreicht werden, welcher jedoch noch zu bewerten ist.

---

- *Ermittlung der Hebelwirkung zur CO<sub>2</sub>-Einsparung durch KWK*
- *Untersuchung von Dauerläufern, periodischen Lasten, Sektoren, Leistungsklassen*

# **Rahmenbedingungen und Hemmnisse**

---

## **Volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen**

---

Die Lenkungswirkung der Rahmenbedingungen von Förderungen über Gesetze bis hin zu Markteinführungsprogrammen ist enorm. Sie stellt einerseits eine große Chance, andererseits jedoch auch ein Hemmnis dar. Für den Erfolg einer finanziellen Flankierung bei der Einführung oder Ausweitung CO<sub>2</sub>-armer Technologien ist Kontinuität elementar. Nur so ist Planungssicherheit gegeben und nur so kann Vertrauen in eine neue Technologie aufgebaut werden. Die Untersuchung von unterschiedlichen Förderungen und Anreizmechanismen im Hinblick auf betriebs- sowie volkswirtschaftliche Auswirkungen in Bezug auf NRW stellt einen essentiellen Forschungsauftrag dar. Aussagen, welche Bedingungen am schnellsten zu einer dauerhaften Implementierung der KWK-Technologie ohne Förderung führen, sind daraus abzuleiten.

Ferner wären die Entwicklung, die Bewertung sowie die Erstellung einer Umsetzungsempfehlung zur Novellierung der Netzentgeltregelung sinnvoll. Die Erarbeitung eines transparenten Regelungsverfahrens unter Berücksichtigung von örtlichen und zeitlichen Einflussgrößen ist vor dem Hintergrund der erhöhten netzseitigen Anforderungen zielführend.

---

- *Lenkungswirkung von Förderungen, Gesetzen sowie Markteinführungsprogrammen*
- *Untersuchung der betriebs- und volkswirtschaftlichen Auswirkungen*
- *Örtliche und zeitliche Erweiterung der Netzentgeltregelung*

## **Genehmigungs- und Beantragungsverfahren**

---

Der Aufwand zur Beantragung einer KWK-Anlage ist stark von der Leistung abhängig. Bereits bei KWK-Anlagen mit geringer Leistung sind sehr viele Akteure, wie z. B. Verteilnetzbetreiber, BAFA, Hauptzollamt, ggf. Fördermittelgeber, durch den potenziellen KWK-Betreiber einzubeziehen. Neben den Formalien (Genehmigungen, Beantragungen u. ä.) stellen die derzeitigen Abrechnungsmodelle ein Hemmnis für KWK dar, da zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Jahres unterschiedliche Meldungen gemacht werden müssen. Es sind rechtssichere Vorschläge zur Vereinfachung des Prozesses und damit zur Senkung der Transaktionskosten zu entwickeln. Sofern eine Anpassung der Verfahren nicht möglich ist, könnte der Einsatz einer zentralen Servicestelle für die Antragsabwicklung zu einer verbesserten KWK-Akzeptanz führen. Die Reduktion des Betreiberaufwands bzw. die Einrichtung einer Servicestelle sollte wissenschaftlich begleitet werden um, Verbesserungen quantifizieren zu können.

---

- *Vereinfachung von Beantragungen sowie Abrechnungsmodellen*
- *Initiierung einer zentralen Servicestelle für die Antragsabwicklung*

---

## Markt- und Vertriebsmodelle

---

Die in der Diskussion befindlichen Strommarktmodelle (Energy-only-Markt vs. Kapazitätsmarkt) stellen auch für die KWK wichtige Rahmenbedingungen dar. Bei der Untersuchung der Marktmodelle ist die unter Umständen neu zu bewertende Wirkung von Anreizsystemen von besonderer Bedeutung. Die Position der Erzeugungstechnologie Kraft-Wärme-Kopplung innerhalb unterschiedlicher Marktmodelle sowie die Auswirkung von optimierten und angepassten Fahrweisen von KWK-Systemen sind auf Objekt- sowie auf die verschiedenen Netzebenen zu untersuchen. Die Rolle und der resultierende Hebel von neuen Betriebsstrategien bei KWK-Anlagen sollten zwischen Theorie und Praxis verglichen werden. Durch optimierte Vertriebsmodelle (z. B. unterschiedliche Contractingvarianten) kann ein zu erwartender Zubau von KWK in Abhängigkeit der marktspezifischen Rahmenbedingungen berechnet werden.

---

- *Erarbeitung geeigneter Marktmodelle inkl. Contracting*
- *Optimierte / angepasste Fahrweisen*
- *Rolle und Hebel der Betriebsstrategie von KWK-Anlagen*

---

## Kommunikation und Akzeptanz bei der Bevölkerung

---

Für den leistungsklassenübergreifenden Ausbau der KWK ist die Schulung und Weiterbildung von Planern im Handwerk eine Grundvoraussetzung. Hier sollten Synergien der in NRW vorhandenen Einrichtungen genutzt werden, um neue Instrumente zu erarbeiten und umzusetzen. KWK sollte verstärkt in Lehrpläne von technischen Studiengängen und in didaktische Konzepte der entsprechenden Weiterbildung einfließen.

Im Sinne der Vermarktung von Produkten wie z. B. Smartphones könnte ein erweiterter Imageaufbau zu einer schnelleren Verbreitung der KWK in NRW führen. Hierbei sollten vor allem die regionalen Eigenschaften von NRW berücksichtigt und in den Fokus gerückt werden. Die wissenschaftliche Begleitung einer erweiterten landesseitigen Ausrichtung auf KWK im Zusammenschluss mit erneuerbaren Energien kann die resultierenden Ergebnisse quantitativ erfassen und qualitativ bewerten. In diesem Zug sollte über die Einführung eines Qualitätsmerkmals (z. B. ein Blaustrom-Labeling) von KWK-Strom entwickelt und umgesetzt werden. Dies könnte, analog zum Grünstrom-Labeling für erneuerbare Energien, zu einer erweiterten Akzeptanz und Aufmerksamkeit bei der Bevölkerung führen. Zusätzlich würde dies die herausragende Position des Landes NRW zum Thema KWK über NRW-Grenzen hinaus unterstützen.

---

- *Synergetische Optimierung des Schulungs- und Weiterbildungsangebots*
- *Darstellung von KWK im Rahmen des Wandels von Strom- und Wärmemarkt*
- *Imageaufbau und Pflege durch KWK-Strom als Qualitätsmerkmal*



# 7 Verzeichnisse

V 1	Literaturverzeichnis .....	186
V 2	Abbildungsverzeichnis .....	199
V 3	Tabellenverzeichnis .....	203

## V 1 Literaturverzeichnis

- [1] G. Schaumann and K. W. Schmitz, Eds., Kraft-Wärme-Kopplung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] Stirling Institut Potsdam gGmbH, "Geräteübersicht 2014 - Mikro KWK auf Basis von Stirlingmotoren." 2014.
- [3] R. A. Zahoransky, Energietechnik Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [4] G. Dubielzig, "Mikrogasturbinen für den kleinen Leistungsbereich," innovation & energie, no. 03\_2008, p. 10.
- [5] Bayrisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, "Klimaschutz durch effiziente Energienutzung Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen." 2007.
- [6] "Einsatzgebiete von MicroTurbinen." [Online]. Available: <http://www.microturbine.de/index.php/preise/einsatzgebiete>. [Accessed: 02-Oct-2014].
- [7] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, "Direkte Trocknung mit Abgasen aus KWK-Anlagen." energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Jan-2014.
- [8] E-quad Power Systems GmbH, "Leistungsklassen." [Online]. Available: <http://www.microturbine.de/index.php/preise/leistungsklassen>. [Accessed: 08-Sep-2014].
- [10] E-quad Power Systems GmbH, "C50 Mikrogasturbine zur Erzeugung von Strom und Wärme." .
- [11] E-quad Power Systems GmbH, "C65 Mikrogasturbine zur Erzeugung von Strom und Wärme." .
- [12] E-quad Power Systems GmbH, "C200 Mikrogasturbine zur Erzeugung von Strom und Wärme." .
- [13] DEPRAG SCHULZ, "Green Energy Turbine - Aus kleinen Mengen Prozessgas Strom gewinnen." .
- [14] DEPRAG SCHULZ, "Turbinentechnologie zur Nutzung überschüssiger Energie." Feb-2014.
- [15] D. Stallinger, "Kosten Mikrogasturbinen für Universitäts-Projekt."
- [16] "Kraft-Wärme-Kopplung - Die Energieeffizienten." [Online]. Available: <http://www.die-energieeffizienten.de/KWK.html>. [Accessed: 04-Dec-2014].
- [18] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Litfaß-Platz 3, 10178 Berlin and Stadt Frankfurt am Main -Der Magistrat- Energiereferat, Energiekonzepte Versorgungstechniken, Galvanistraße 28, 60486 Frankfurt am Main, "BHKW-Kenndaten 2011." energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Jul-2011.
- [19] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, "BHKW-Kenndaten 2014/2015." energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Oct-2014.
- [20] "Die nächste Generation der Gasmotoren," cogen, no. 05.2011, pp. 5–8.
- [21] Initiative Brennstoffzelle, Initiative Brennstoffzelle. [Online]. Available: <http://www.ibz-info.de/home/presse>. [Accessed: 27-Feb-2014].
- [22] Nedstack, PEM Fuel Cells, "Chlorine H2 Recovery," 2014. [Online]. Available: <http://www.nedstack.com/applications/chlorine-h2-recovery>. [Accessed: 07-Mar-2014].
- [23] A. Bachor, W. Binde, M. Buller, M. Fischer, J. Matics, E. Schmieder, W.-H. Scholz, P. Selzam, B. Thomas, D. Weisenberger, and R. Zilch, "Statusreport 2013 Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Status und Perspektiven," Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Oct. 2013.
- [24] V. Diebels and A. Dauensteiner, "Geräteangebot." Initiative Brennstoffzelle (IBZ) | c/o EWE Vertrieb GmbH, Apr-2015.
- [25] Enefarm, "Advanced Cogeneration and Energy Utilization Center Japan." [Online]. Available: [http://www.ace.or.jp/web/works/works\\_0090.html](http://www.ace.or.jp/web/works/works_0090.html). [Accessed: 01-Jun-2015].
- [26] A. Dauensteiner, "Callux-Praxistest fürs Eigenheim bereitet den Weg in den Markt," presented at the Berliner Energietage 2015, Berlin, 29-Apr-2015.
- [27] "ene.field," 27-Feb-2014. [Online]. Available: <http://enefield.eu/>. [Accessed: 27-Feb-2014].
- [28] Doosan Fuel Cell America, Inc., "PureCell Model 400 fuel cell system Produktdatenblatt." 2014.

- [29] N2telligence, "Energy Generation and Fire Prevention with Fuel Cell Technology." 2012.
- [30] H. Ozawa, "Recent Developments of SOFC-GT systems in MHPS," presented at the 3rd International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells for Next Generation Power Plants: Gasifier-SOFC systems, Warschau, 02-Jun-2014.
- [31] Bloomenergy, "ES-5700 Energy Server, Produktdatenblatt." 2012.
- [32] Fuel Cell Energy, "300 Kilowatts DFC 300 Produktdatenblatt." 2013.
- [33] Ballard Power Systems, Inc., "CLEARgen Specification Sheet." Feb-2012.
- [34] Carter, Dan, "Latest Developments in the Ene-Farm Scheme," fuelcelltoday, 27-Feb-2013. [Online]. Available: [http://www.fuelcelltoday.com/media/1846139/13-02-27\\_latest\\_developments\\_in\\_the\\_ene\\_farm\\_scheme.pdf](http://www.fuelcelltoday.com/media/1846139/13-02-27_latest_developments_in_the_ene_farm_scheme.pdf). [Accessed: 14-Jan-2014].
- [35] EnergieAgentur.NRW, "KWK NRW - Strom trifft Wärme," 27-Feb-2014. [Online]. Available: <http://www.kwk-fuer-nrw.de/nrweukwk-investitionszuschuss--23534.asp>. [Accessed: 27-Feb-2014].
- [36] S. Schwab, "Brennstoffzellen-Initiative Heinsberg fördert effiziente und günstige Stromproduktion vor Ort," 07-Feb-2014. [Online]. Available: <http://brennstoffzelle.mmserver.eu/aktuelles/>. [Accessed: 07-Feb-2014].
- [37] H. Ammermann, P. Hoff, M. Atanasiu, J. Aylor, M. Kaufmann, and O. Tisler, Advancing Europe's energy systems: stationary fuel cells in distributed generation : a study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Luxembourg: Publications Office, 2015.
- [38] VIK, <http://www.die-energieeffizienten.de/KWK.html>, Verschiedene Arten von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. .
- [39] Vorlesung KWK Anlagen und Systeme, Dr. Ing. M. Blesl. .
- [40] Bremer Energie Institut, Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in NRW. .
- [41] B. Eikmeier, M. Klobasa, F. Toro, and G. Menzler, "Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in Nordrhein-Westfalen," Abschlussbericht, May 2011.
- [42] Buch Energietechnik, K. Kugeler, P.-W. Phlippen. .
- [43] "Verbreitung - ORC- Fachverband." [Online]. Available: <http://www.orc-fachverband.de/verbreitung.html>. [Accessed: 29-Sep-2014].
- [44] F. Heberle, M. Preißinger, and D. Brüggemann, "Multitalent Organic Rankine Cycle." Lehrstuhl für technische Thermodynamik und Transportprozesse.
- [45] V. Pacheco and J. Meinert, "ENERGIE AUS ABWÄRME – THERMOELEKTRISCHE MATERIALIEN FÜR INDUSTRIELLE ANWENDUNGEN." Fraunhofer IFAM.
- [46] C. Spieker, "Thermochemische Rekuperation." WTZ-Vortragsreihe „Energietage“: Nutzung von Verlustenergien, speziell Abgasenergie in Roßlau, 10-Sep-2013.
- [47] J. Adolf, U. Schabla, A. Lücke, M. Bräuninger, L. Leschus, L. Ehrlich, A. Otto, B. Oschatz, and B. Mailach, "Shell BDH Hauswärme-Studie: Klimaschutz im Wohnungssektor – Wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030," Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.), BDH (Hrsg.), HWWI, iTG, Hamburg, Köln, Studie, May 2013.
- [48] R. Knaupp, "Energie-Workshop für KEiM-Lehrkräfte." 19-Feb-2008.
- [49] M. Scharp, "Zukunft des Bauens und Wohnens," Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin, Werkstattbericht Nr. 115, Jun. 2011.
- [50] W. Kaag, P. Ndi Ndi, T. Ummenhofer, F. Dröse, T. Zinke, M. N. Fisch, T. Beier, and P. Eickmeyer, "Forschungsprojekt 'energieeffiziente Sanierung von Bürogebäuden der 50er bis 70er Jahre – Erarbeitung einer Planungshilfe,'" Institut für Baukonstruktion und Industriebau, Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Institut für Gebäude- und Solartechnik, Braunschweig, Abschlussbericht, Mar. 2008.
- [51] G. Hausladen and T. Hamacher, "Leitfaden Energienutzungsplan," Technische Universität München Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik und Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, München, Jun. 2011.
- [52] Solarpraxis AG, "Wärme aus Erneuerbaren Energien: Kosten sparen - Wohnwert steigern - Umwelt schonen," Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Energieeffizienz im Gebäudebereich, Berlin, Feb. 2007.

- [53] Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e. V., "Heizkessel für Öl und Gas: Brennwertkessel können mehr." 25-Sep-2014.
- [54] "Effiziente Wärmeversorgung: Ratgeber für Eigentümer von Wohngebäuden." Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Abteilung VI – Bauwesen, Städtebau, Wohnungswesen (Hrsg.), 06-Jul-2004.
- [55] W. Gerstinger, "Wesentliche Inhalte der Novellierung der Energieeinsparverordnung (EnEV)." 21-Nov-2013.
- [56] G. Giebeler, R. Fisch, H. Krause, F. Musso, K.-H. Petzinka, and A. Rudolphi, Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung, 1. Auflage. Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2008.
- [57] M. Fischer, B. Scherber, and F. Burmeister, "Systemanalyse - Abschlussbericht Teil 1, Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern," Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen, Abschlussbericht DVGW Forschungsprojekt G 5/04/09, 2011.
- [58] Buderus, "Preisliste: Öl-/Gas-Heizkessel." 2014.
- [59] Zukunft ERDGAS e. V. (Hrsg.), "Die Erdgas-Brennwertheizung." wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Jan-2014.
- [60] J. Knissel, H. Menje, and R. Born, "Niedertemperatur- und Brennwertkessel: Wissenswertes über moderne Zentralheizungsanlagen," Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Ausgabe: 2/2005, Überarbeitung: 06/2008.
- [61] N. Diefenbach, T. Loga, M. Großklos, and C. Herbert, "Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand." IWU Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Annastr. 15, 64285 Darmstadt, 01-Nov-2002.
- [62] "Effiziente Systeme und erneuerbare Energien, Technologie- und Energie-Forum." Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik E. V. (Hrsg.), 2013.
- [63] Solaranlagen Portal, "Preise für Solarthermie Kollektoren," 2014. .
- [64] D. Zech, T. Jenssen, and L. Eltrop, "Technologien, Emissionen, Kosten – ein Überblick über Möglichkeiten der Wärmeversorgung von Wohngebäuden mit Erneuerbaren Energien," Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Abteilung Systemanalyse und Erneuerbare Energien, Stuttgart, Dec. 2009.
- [65] S. Ramesohl, K. Arnold, M. Kaltschmitt, F. Scholwin, F. Hofmann, A. Plättner, M. Kalies, S. Lulies, G. Schröder, W. Althaus, W. Urban, and F. Burmeister, "Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Studie im Auftrag des BGW/DVGW, Band 1," Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik (UMSICHT), Gaswärme-Institut e.V. Essen, Endbericht, 2005.
- [66] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), "Pelletheizungen: Marktübersicht, 7., überarbeitete Auflage." Jan-2013.
- [67] A. Neumann and B. Hirschl, "Überarbeitung der Vergabegrundlage für die Umweltzeichen 'Holzpelletöfen' (RAL-UZ 111) und Holzpelletkessel (RAL-UZ 112) sowie Überprüfung des Rahmens für ein Umweltzeichen für Hackschnitzelanlagen," Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Geschäftsstelle Berlin, Berlin, Nov. 2010.
- [68] RWE Effizienz GmbH, "Pelletheizung, Comeback der Holzbefuerung." .
- [69] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), "Hackschnitzelheizungen: Marktübersicht, 4., aktualisierte Auflage." 2012.
- [70] "Factsheet: Heizen mit Hackgut." Österreichischer Biomasse-Verband, 2014.
- [71] M. Merk, "Effiziente Holzheiztechnik - Welche Heizung für wen? Hinweise zur Auswahl des passenden Heizsystems," presented at the AG Biofestbrennstoffe, Strauber, 11-May-2013.
- [72] H. Hartmann, K. Reisinger, P. Turowski, and P. Roßmann, "Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen, 3., vollständig überarbeitete Auflage." Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.), 2013.
- [73] Energiebüro MOL, and Netzwerk BIOFestbrennstoff MOL, "Infoblatt: Heizen mit Hackschnitzeln." 2009.
- [74] "Bioenergie.2020.NRW: Biomasseaktionsplan zum nachhaltigen Ausbau der Bioenergie in Nordrhein-Westfalen." Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), 2009.



- [75] J. Uth, "Marktübersicht: Scheitholzvergaser-/Kombikessel, 8. Auflage,." Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2012.
- [76] "Holzeinschlag und Holzverkauf: Wegweiser für bayrische Waldbesitzer." Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), 2010.
- [77] "Das Energiesparschwein: Informationen zum Wärmeschutz und zur Heizenergieeinsparung für Eigenheimbesitzer und Bauherren." Umweltbundesamt Fachgebiet „Energieeffizienz“ (Hrsg.), 2013.
- [78] Bundesverband Wärmepumpen e.V., "Absatzzahlen 2013: Wärmepumpen-Markt trotz hohen Strompreisen," 24-Jan-2014. .
- [79] H. Krause, W. Köppel, M. Fischer, P. Hansen, P. Markewitz, W. Kuckshinrichs, and J.-F. Hake, "Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern," DVGW, DBI, GWI, FZJ, Bonn, Abschlussbericht DVGW Forschungsprojekt G 5-04-09, 2011.
- [80] I. Täschner, "BDEW - Steckbriefe zu Heiztechniken und additiven Erdgasanwendungen." Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Fachausschuss/Projektgruppe „Gasanwendungen“, Ergänzungen 04/2009-2007.
- [81] S. Bargel, "Entwicklung eines exergiebasierten Analysemodells zum umfassenden Technologievergleich von Wärmeversorgungssystemen unter Berücksichtigung des Einflusses einer veränderlichen Außentemperatur," Dissertation der Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2010.
- [82] H. Kühl, "Keramische Hochtemperatur-Heizelemente - Heizen und Zünden mit Keramik." Verband der Keramischen Industrie e. V., 24-Jul-2013.
- [83] S. Günther, "Warmwasserspeicher oder Durchlauferhitzer zur Wasserbereitung." energieheld GmbH.
- [84] H.-M. Groscurth and S. Bode, "'Power-to-heat' oder 'Power-to-gas'?", arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik, Hamburg, Discussion Paper Nr. 9, 2013.
- [85] N. Gerhardt, C. Richts, P. Hochloff, T. Müller, J. Hilpert, O. Antoni, and W. Schulz, "Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien, Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten," Fraunhofer IWES, Stiftung Umweltenergierecht, Fraunhofer IFAM, Berlin, Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Jun. 2014.
- [86] K. Grashof, E. Hauser, and H. Guss, "Aktionsprogramm flexible Kapazitäten: Die nächsten Schritte zum Erhalt der Stromversorgungssicherheit," IZES gGmbH Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken, Nov. 2013.
- [87] N. Diefenbach, H. Cischinsky, M. Rodenfels, and K.-D. Clausnitzer, "Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand." Bremer Energie Institut (BEI), Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 12-Sep-2010.
- [88] Alfons Oebbeke, "Dämmstoff Magazin: Wärmeleit Zahlen /  $\lambda$ -Werte," Wärmeleit Zahlen /  $\lambda$ -Werte, 2014.
- [89] H. Drück, S. Bachmann, and H. Müller-Steinhagen, "WÄRMESPEICHER FÜR SOLARANLAGEN - HISTORIE UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN." 02-Nov-2006.
- [90] Vaillant, "Datenblatt Allstore VPS." .
- [91] Bruderer, "Bruderer Katalog 2011 Teil 4." 2011.
- [92] Viessmann Werke GmbH & Co KG, "Viessmann Vitocell Datenblatt." May-2012.
- [93] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., "bdew Warmwasser im Gewerbe." wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2004.
- [94] "Eigenschaften von Wasser in Tabellen," 27-Apr-2006. .
- [95] Huch GmbH Behälterbau, "Heizungspufferspeicher PSX." [Online]. Available: <http://www.huch.com/img/produkte/pdf/PSX.pdf>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [96] Höhne Wärme- u. Energiesysteme GmbH & Co. KG, "Heizungspufferspeicher PSH." [Online]. Available: <http://www.baudochselbst.com/Speicher/Pufferspeicher/Preis-Kosten/Preise-Pufferspeicher-Stahl.pdf>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [97] TWL Technologie GmbH, "Pufferspeicher P." [Online]. Available: <http://www.derhandwerksmeister.com/heizung/puffer-speicher-boiler/99/pufferspeicher-200-10000-1-alle-varianten-waehlbar?c=2204&sCoreId=cd7d281b3c9bb896d0cac242c8395e93>. [Accessed: 02-Sep-2014].

- [98] Schindler + Hofmann, "Pufferspeicher 300L, 500L, 600L, 825L." [Online]. Available: [http://www.kamdi24.de/Zubehoer/Pufferspeicher-Installation/Pufferspeicher-ohne-Brauchwasser?gclid=COD41o\\_FqrsCFskEwwodizwA4w](http://www.kamdi24.de/Zubehoer/Pufferspeicher-Installation/Pufferspeicher-ohne-Brauchwasser?gclid=COD41o_FqrsCFskEwwodizwA4w). [Accessed: 02-Sep-2014].
- [99] Enter Therm, "PSM300, PSM500, PSM800." [Online]. Available: <http://www.heizung-ablager.de/de/Pufferspeicher/Pufferspeicher/Pufferspeicher?x9c41f=c74cd5b6d4b7af97a8b887723-aa29e83>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [100] NEHS GmbH, "NPS 300, NPS 500, NPS 825." [Online]. Available: <http://www.herstellershops.de/Speichertechnik/Pufferspeicher/Pufferspeicher-ohne-Waermetauscher/>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [101] Vilcaso, "Pufferspeicher Typ EPS 300, Pufferspeicher Typ EPS 500, Pufferspeicher Typ EPS 600, Pufferspeicher Typ EPS 825." [Online]. Available: <http://vilcaso.de/Speicher/Pufferspeicher/>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [102] Alpha Thermotec, "Pufferspeicher PSI 500, Pufferspeicher PSI 600, Pufferspeicher PSI 800." [Online]. Available: <http://alphathermotec.com/products/pufferspeicher-mit-isolierung/>. [Accessed: 02-Sep-2014].
- [103] Deutsche Energie - Agentur GmbH, "Steigerung der Flexibilität und Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch die Kombination mit Wärmespeichern.," 20-Apr-2012. .
- [104] D. Laing, "Wärmespeichertechnologien für Energieeffizienz in Industrieanwendungen," 07-Mar-2012. .
- [105] Dr. Harald Mehling, "Latentwärmespeicher," 2002. .
- [106] Bine Informationsdienst, "Thermochemische Speicher." Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 2001.
- [107] Vaillant GmbH, "Zeolith-Gas-Wärmepumpe Vaillant." .
- [108] Viessmann Werke GmbH & Co KG, "Gas-Adsorptionswärmepumpe Viessmann," Feb-2014. .
- [109] Siemens-Elektrogeräte GmbH, "Siemens Zeolith Spülmaschinen," 25-Sep-2014. .
- [110] Zeo Tech GmbH, "Zeolith Preis," 25-Sep-2014. .
- [111] G. Fuchs, B. Lunz, and D. U. Sauer, "Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität – Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien." ISEA, RWTH Aachen, 2012.
- [112] J. Noack and J. Tübke, "A Comparison of Materials and Treatmen of Materials for Vanadium Redox Flow Battery." Applied Electrochemistry, Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2010.
- [113] A. Parasuraman, "Review of material research and development for vanadium redox flow battery applications." Electrochimica Acta, 2012.
- [114] T. Loga, N. Diefenbach, and R. Born, "Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden," Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Nov. 2011.
- [115] N. Diefenbach and T. Loga, "Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011." Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 25-Aug-2011.
- [116] D. Walberg, A. Holz, T. Gniechwitz, and T. Schulze, "Wohnungsbau in Deutschland - 2011: Modernisierung oder Bestandersatz (Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“),” Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel, Studie, März 2011.
- [117] VDI-Gesellschaft Energietechnik, Arbeitsgruppe Brennstoffzellen in der Haustechnik, Fachausschuss Brennstoffzellen, "VDI 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilien-häusern für den Einsatz von KWK-Anlagen." Beuth Verlag GmbH, May-2008.
- [118] B. Schломann, E. Gruber, W. Eichhammer, N. Kling, J. Diekmann, H.-J. Ziesing, H. Rieke, F. Wittke, T. Herzog, M. Barbosa, S. Lutz, U. Broeske, D. Merten, D. Falkenberg, M. Nill, M. Kaltschmitt, B. Geiger, B. Kleeberger, and R. Eckl, "Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)," Fraunhofer ISI, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, GfK Marketing Services GmbH & Co. KG, GfK Panel Services Consumer Research GmbH, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der Technischen Universität München, Karlsruhe, Berlin, Nürnberg, Leipzig, München, Abschlussbericht, Apr. 2004.
- [119] M. Webs, T. Deutschländer, and J. Christoffer, "Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY," Selbstverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2004.

- [120] "Projektbericht: Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse," Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH und Deutscher Wetterdienst im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Offenbach, Projektbericht, Jun. 2011.
- [121] BGW Bundesverband der deutschen and Gas- und Wasserwirtschaft, "Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nichtleistungsgemessener Kunden," wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Berlin, 2006.
- [122] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), and GEODE – Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Énergie, "BDEW/VKU/GEODE - Leitfaden: Abwicklung von Standardlastprofilen Gas." 2013.
- [123] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, "ZENSUS2011 - Zensusatlas." [Online]. Available: <https://atlas.zensus2011.de/>. [Accessed: 23-Jul-2015].
- [124] D. Walberg, "Typische Energieverbrauchskennwerte deutscher Wohngebäude." 31-May-2012.
- [125] "Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013." Mar-2014.
- [126] Statistisches Bundesamt, "Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)." Aug-2007.
- [127] H. Mensen, Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. Berlin: Springer, 2007.
- [128] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, "Gebiet und Bevölkerung - Fläche und Bevölkerung." [Online]. Available: [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de\\_jb01\\_jahrtab1.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrtab1.asp). [Accessed: 06-Jan-2015].
- [129] "Campingplätze in Nordrhein-Westfalen." [Online]. Available: <http://www.camping.info/deutschland/nordrhein-westfalen/campingplaetze>. [Accessed: 11-Dec-2014].
- [130] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, "Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen." .
- [131] Information und Technik Nordrhein Westfalen, "Krankenhäuser in NRW." [Online]. Available: <https://www.it.nrw.de/statistik/f/daten/eckdaten/r512krankh.html>. [Accessed: 08-Dec-2014].
- [132] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, "Das Schulwesen in Nordrhein-Westfalen aus quantitativer Sicht 2013/14." Nov-2014.
- [133] Information und Technik Nordrhein Westfalen, "Studierende und Studienanfänger/-innen in den Wintersemestern (WS) 2011/12 und 2012/13\*)." .
- [134] Mülheim an der Ruhr, "Aktuelle Informationen der Schwimmbäder." [Online]. Available: [http://www.muelheim-ruhr.de/cms/shared/baeder/index.php?db\\_startwert=258d44478dff6e5e9005cd4b6af077a7](http://www.muelheim-ruhr.de/cms/shared/baeder/index.php?db_startwert=258d44478dff6e5e9005cd4b6af077a7). [Accessed: 11-Dec-2014].
- [135] "Sport- und Bäderbetriebe der Stadt Essen." [Online]. Available: [http://www.essenerbaeder.de/hb\\_friedrichsbad.shtml](http://www.essenerbaeder.de/hb_friedrichsbad.shtml). [Accessed: 11-Dec-2014].
- [136] swimpool Schwimmverband NRW, "Schwimmbadsituation in NRW - Vorbereitung / Erarbeitung eines Bäderatlas." .
- [137] Michael Pecka, "Dauerläufer am Flughafen." 15-Sep-2012.
- [138] U. Gröger, "Energieverbrauch 2013 Flughafen Köln/Bonn."
- [139] Flughafen Dortmund GmbH, "Nachhaltigkeitsbericht 2013." .
- [140] FMO Flughafen Münster/Osnabrück GmbH, "Umweltbericht 2013." .
- [141] Flughafen Düsseldorf GmbH, "Geschäftsbericht 2013." 01-2014.
- [142] "Daten und Fakten zum Köln Bonn Airport." [Online]. Available: <http://www.koeln-bonn-airport.de/unternehmen/daten-fakten.html>. [Accessed: 11-Dec-2014].
- [143] "Zahlen/Daten/Fakten - Dortmund Airport." [Online]. Available: <http://www.dortmund-airport.de/?id=1859>. [Accessed: 11-Dec-2014].
- [144] "Flughafen Münster/Osnabrück International Airport - Entwicklung." [Online]. Available: <http://www.fmo.de/index.php?page=46>. [Accessed: 11-Dec-2014].
- [145] "Flughafen Weeze verbucht für 2013 deutlichen Passagierzuwachs - airliners.de." [Online]. Available: <http://www.airliners.de/flughafen-weeze-verbucht-fuer-2013-deutlichen-passagierzuwachs/31119>. [Accessed: 11-Dec-2014].

- [146] “Flughafen Paderborn Lippstadt - Airport - Flughafen - Über uns - Daten & Fakten.” [Online]. Available: [http://www.airport-pad.com/index.php?catalog=flughafen/ueber\\_uns/daten\\_\\_\\_fakten](http://www.airport-pad.com/index.php?catalog=flughafen/ueber_uns/daten___fakten). [Accessed: 11-Dec-2014].
- [147] “German Site - Sites and Real Estate.” .
- [148] “IT NRW Statistik; Statistische Bericht; Energiebilanz und CO2-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2007-2012.” [Online]. Available: [www.it.nrw.de](http://www.it.nrw.de). [Accessed: 22-Jun-2015].
- [149] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinien) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014,” Endbericht zum Projekt I C 4 - 42/13, Jan. 2014.
- [150] “BMWi Energiedaten gesamt 2014.” .
- [151] Wagner, “Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES,” Bochum, Abschlussbericht, 2002.
- [152] “Statistik der Energiewirtschaft, VIK, Ausgabe 2014.”
- [153] LANUV NRW, “Stand der regenerativen Stromproduktion in NRW,” Strommix NRW, 10-Jun-2015. [Online]. Available: [energieatlasnrw.de](http://energieatlasnrw.de). [Accessed: 10-Jun-2015].
- [155] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, “energiedaten\_nrw\_2013.pdf.” .
- [158] BDEW, “Energimix,” [bdew.de](http://bdew.de). [Online]. Available: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/energimix-de>. [Accessed: 10-Jun-2015].
- [159] BMWi, “Energiewende - Eine Fortschrittsbericht.” Dec-2014.
- [160] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), “Ein Strommarkt für die Energiewende.” 30-Oct-2014.
- [161] B. Höflich and D. Echternacht, “ENDBERICHT - Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt.” DENA, 15-Aug-2012.
- [162] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, “Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 1 - Windenergie.” LANUV-Fachbericht 40, 2013.
- [163] “Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 2 - Solarenergie,” Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, LANUV-Fachbericht 40, 2013.
- [164] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, “Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 3 - Bioenergie.” LANUV-Fachbericht 40, 2013.
- [165] BDEW, “Erneuerbare Energien und das EEG (2014) - Energie-Info.” [Online]. Available: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/\\$file/Energie-Info\\_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20\(2014\)\\_24.02.2014\\_final\\_Journalisten.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20(2014)_24.02.2014_final_Journalisten.pdf). [Accessed: 04-Dec-2014].
- [166] “www.agora-energiewende.de,” Rat der Agora, Berlin, Internetportal, Oct. 2014.
- [167] C. Prof. Dr. Weber, “Braucht die Energiewende ein neues Marktdesign ?” 03-Sep-2014.
- [168] Philipp Götz, Dr. Johannes Henkel, Thorsten Lenck, and . Konstantion Lenz, “Agora\_NegativeStrompreise.pdf.” Jun-2014.
- [169] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, “Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlamentes 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.” 21-Feb-2004.
- [170] Amprion GmbH, “Übersicht über KWK-Aufschläge seit 2002.” [Online]. Available: <http://www.amprion.net/kwk-archiv>.
- [172] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., “Positionspapier zur zeitnahen Umsetzung der Novelle des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG-G).” 01-Jul-2014.
- [173] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, “Leitfaden zur Anmeldung und steuerlichen Behandlung von Mikro-BHKWs bis zu 5 kW.” energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch.
- [174] Energiesteuergesetz. 2006.

- [175] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, “Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kWel (Mini-KWK-Richtlinie).” 15-Dec-2014.
- [176] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), “Mini-KWK-Anlagen Liste der förderfähigen KWK-Anlagen bis einschließlich 20 kWel.” 01-Jan-2015.
- [177] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), “Zuschuss für Mini- KWK -Anlagen.” [Online]. Available: [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/mini\\_kwk\\_anlagen/](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/). [Accessed: 09-Sep-2014].
- [178] KfW Bank, “Merkblatt Energieeffizienz im Unternehmen - KfW Energieeffizienzprogramm.” Jul-2014.
- [179] KfW Bank, “KfW-Energieeffizienzprogramm.” [Online]. Available: <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Auslandsvorhaben/Finanzierungsangebote/Energieeffizienzprogramm-%28242-243-244%29/#1>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [180] KfW Bank, “Konditionenübersicht für Endkreditnehmer.” 03-Sep-2014.
- [181] KfW Bank, “IKU – Energetische Stadtsanierung - Quartiersversorgung.” [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-kommunale-Unternehmen-\(202\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-kommunale-Unternehmen-(202)/). [Accessed: 10-Sep-2014].
- [182] KfW Bank, “Merkblatt Kommunale und soziale Infrastruktur - IKU - Energetische Stadtsanierung - Quartiersversorgung.” .
- [183] KfW Bank, “IKU - Kommunale Energieversorgung Energieeffiziente Stromversorgung günstig finanzieren.” [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Energieversorgung/Finanzierungsangebote/kommunale-Energieversorgung-kommunale-Unternehmen-\(204\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Energieversorgung/Finanzierungsangebote/kommunale-Energieversorgung-kommunale-Unternehmen-(204)/). [Accessed: 10-Sep-2014].
- [184] KfW Bank, “Merkblatt Kommunale und soziale Infrastruktur - IKU - Kommunale Energieversorgung.” .
- [185] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, “progres.nrw - Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen.” [Online]. Available: <http://www.progres.nrw.de/page.asp?RubrikID=6987>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [186] Bezirksregierung Arnsberg, “Förderprogramm regenerative Energien - progres.nrw - Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).” [Online]. Available: [http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/f/foerderpro\\_progres\\_nrw/kwk/index.php](http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/f/foerderpro_progres_nrw/kwk/index.php). [Accessed: 09-Sep-2014].
- [187] Kommission der europäischen Gemeinschaften, “Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung.” .
- [188] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, “Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem ‘Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen’ (progres.nrw) - Programmbe- reich Markteinführung.” 13-Jan-2014.
- [189] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, “Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem ‘Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen’ (progres.nrw) - Programmbe- reich KWK (Förderung von KWK - Anlagen und KWK bezogenen Maßnahmen).” 19-Oct-2012.
- [190] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), “Erläuterungen zu „De-minimis“-Beihilfen.” [Online]. Available: [http://www.bafa.de/bafa/de/hilfe/de\\_minimis/](http://www.bafa.de/bafa/de/hilfe/de_minimis/). [Accessed: 09-Sep-2014].
- [191] NRW.BANK, “NRW/EU.KWK-Investitionskredit.” [Online]. Available: <http://www.nrwbank.de/de/foerderlotse-produkte/NRWEUKWK-Investitionskredit/15656/nrwbankproduktdetail.html>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [192] NRW.BANK, “Konditionen für Endkreditnehmer.” 22-Aug-2014.
- [193] NRW.BANK, “NRW.BANK.Energieinfrastruktur.” [Online]. Available: <http://www.nrwbank.de/de/foerderlotse-produkte/NRWBANKEnergieinfrastruktur/15680/nrwbankproduktdetail.html>. [Accessed: 10-Sep-2014].
- [194] NRW.BANK, “NRW.BANK.Effizienzcredit.” [Online]. Available: <http://www.nrwbank.de/de/foerderlotse-produkte/NRWBANKEffizienzcredit/15588/nrwbankproduktdetail.html>. [Accessed: 10-Sep-2014].

- [195] NRW.BANK, “Merkblatt NRW.BANK Effizienzcredit.” .
- [196] Stadtwerke Essen AG, “Bonusprogramm 2014.” .
- [197] EnergieAgentur.NRW, “Förderprogramme der Energieversorgungsunternehmen (EVU’s) in NRW für BHKW im Jahr 2014.” Feb-2014.
- [198] Investitionsbank des Landes Brandenburg (ILB), “Einsatz erneuerbarer Energien und Erhöhung der Energieeffizienz (RENplus).” [Online]. Available: [http://www.ilb.de/de/infrastruktur/zuschuesse\\_3/renplus/index.html](http://www.ilb.de/de/infrastruktur/zuschuesse_3/renplus/index.html). [Accessed: 09-Sep-2014].
- [199] umwelt unternehmen bremen, “Rationelle Energienutzung (REN).” [Online]. Available: [http://www.umwelt-unternehmen.bremen.de/Rationelle\\_Energienutzung\\_REN\\_3.html](http://www.umwelt-unternehmen.bremen.de/Rationelle_Energienutzung_REN_3.html). [Accessed: 09-Sep-2014].
- [200] Sächsische Aufbaubank (SAB) - Förderbank, “R.3 - Anlagen der Kraftwärmekopplung.” Oct-2013.
- [201] hessenENERGIE Gesellschaft für rationelle Energienutzung mbH, “Förderung von Contracting zur Beschleunigung des Markteintritts von hocheffizienten Mikro-KWK-Anlagen.” [Online]. Available: <http://hessenenergie.de/Aktuelles/F-MikroKWK/f-mikrokwk.shtml>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [202] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, “Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (µKWK) mit Brennstoffzellen.” [Online]. Available: <http://energieland-hessen.de/dynasite.cfm?dsmid=502726>. [Accessed: 09-Sep-2014].
- [203] proKlima GbR, “Förderangebote Kraft-Wärme-KOPPLUNG.” .
- [204] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare Energien Gesetz). 2012.
- [205] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare Energien Gesetz). 2014.
- [206] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “EEG-Reform: Planbar. Bezahlbar. Effizient.” [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform.html>. [Accessed: 11-Sep-2014].
- [207] “EEG Umlage 2015.” [Online]. Available: <https://www.netztransparenz.de/de/EEG-Umlage.htm>. [Accessed: 03-Mar-2015].
- [208] Stromsteuergesetz. 1999.
- [209] Umsatzsteuergesetz. .
- [210] Viessmann Werke GmbH & Co KG, “Vitovalor 300 p Bedienungsanleitung.” 2014.
- [211] SMA, “Blindleistung: Grundlagen, Anwendungen und SMA Lösungen.” .
- [212] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, Transnet BW GmbH, and TenneT TSO GmbH, “regel-leistung.net,” Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung. [Online]. Available: <https://www.regelleistung.net/ip/action/index>. [Accessed: 22-Jun-2015].
- [214] U. Friedrich, “Nahwärmenetz verbindet Neubau- mit Bestandsquartier,” Bine Projektinfo 04/2015, Apr. 2015.
- [215] D. Pietruschka, “Simulationen und Technologien – Beispiel Ludwigsburg,” presented at the Statusseminar EnEff:Wärme 2014, 2014.
- [216] N. Krzikalla, S. Achner, S. Brühl, and Bundesverband Erneuerbare Energie, Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien: Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. Bochum: Ponte Press Verl., 2013.
- [217] J. Stein, “Energieeinsparung durch Blindleistungskompensation.” ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V., Apr-2008.
- [218] R. Paschotta, “Spannungshaltung,” RP-Energie-Lexikon. 23-May-2015.
- [219] Bastian, Bumiller, and Burgmaier, Fachkunde Elektrotechnik, 24th ed. Europa Lehrmittel, 2004.
- [220] Energietechnische Gesellschaft and Internationaler ETG-Kongress, “Internationaler ETG-Kongress 2011: Umsetzungskonzepte nachhaltiger Energiesysteme - Erzeugung, Netze, Verbrauch ; Vorträge des Internationalen ETG-Kongresses vom 8. - 9. November 2011 in Würzburg ; Fachtagungen 1 bis 5.” VDE-Verl., 2011.
- [221] Brunner, Buchholz, Gelfand, Kamphuis, and Naumann, “Communication Infrastructure and Data Management for operating smart distribution systems.” .
- [222] H. Schäfers, “„Smart Grids – Demand Side Management Intelligente Vernetzung von Stadtinfrastrukturen“,” Frankfurt, 21-May-2014.

- [223] Fraunhofer ISE, “Energieerzeugung in Deutschland | Energy Charts,” 15-Mar-2015. [Online]. Available: [https://www.energy-charts.de/energy\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/energy_de.htm). [Accessed: 22-Jun-2015].
- [224] B. Jauch and J. Langbecker, “Regelenergiemärkte in Deutschland und Europa,” Stuttgart, 07-Oct-2003.
- [225] “Strombörse,” Wikipedia. 06-Apr-2015.
- [226] Consenstec GmbH, “Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt,” Aachen, Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Feb. 2014.
- [227] W. Schulz and C. Brandstätt, Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt. Bochum: Ponte Press Verlags GmbH, 2013.
- [228] H.-J. Ziesing, “Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012,” Berlin, Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Projektnummer: 23/11, Nov. 2013.
- [229] S. Gores, L. Emele, H. Förster, J. Gröger, R. Harthan, W. Jörß, F. Matthes, and C. Zell, “Aktueller Stand der KWK-Erzeugung,” Öko-Institut e.V., Berlin, Jan. 2014.
- [230] Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung 411/14, “Wärmeversorgung 2013: Verfügbare Wärmemenge um 2,2 % gestiegen.” DESTATIS, 20-Nov-2014.
- [232] C. Schulz, “Systembetrachtung zur Integration von Mini-Blockheizkraftwerken in das elektrische Versorgungsnetz,” Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2007.
- [233] J. P. Lipp, “Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen,” Technische Universität München, München, 2015.
- [234] Tzscheutschler, Peter, “Optimierung von Mikro KWK Systemen,” presented at the Verbundtreffen „EnEff: Wärme – Thermische/elektrische KWK-Vernetzung“, Jülich, 24-Apr-2015.
- [235] TU Dresden, “Regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie – Intelligente Vernetzung von thermischen und elektrischen Verbrauchersystemen,” presented at the Verbundprojekttreffen –TUD / TU BAF / fFE/ TUMTeilprojekt, Jülich, 24-Apr-2015.
- [236] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, “Richtlinienreihe VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.” Beuth Verlag, 2012.
- [237] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., “Materialsammlung Erdgas.” BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Jul-2013.
- [238] Großklos, Marc, “Energieaufwand und Emissionsfaktoren.” Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), 17-Dec-2014.
- [239] “CO2-Emissionsfaktoren 2012 (Stand 15.04.2013).” Umweltbundesamt.
- [240] P. Icha, “Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutsche Strommixes in den Jahren 1990 bis 2013.” Umweltbundesamt, 2014.
- [241] J. Schubert and K. Tschetschorke, “Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards.” Umweltbundesamt, Jul-2013.
- [242] “Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie.” Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2011.
- [243] “Spezifische CO2-Emissionen der Stromerzeugung (2012).” Agentur für Erneuerbare Energien.
- [244] “DIN V 18599:2011-12, ‘Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.’” .
- [245] “Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013).” Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67.
- [246] U. Arndt, “Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation,” Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, München, 2008.
- [247] VDI-Gesellschaft Energietechnik, and Fachausschuss Energiesysteme, “Richtlinie VDI 4608: Energiesysteme: Kraft-Wärme-Kopplung.” Beuth Verlag, 2008.
- [248] D. U. Lehr, D. C. Lutz, P. Mellwig, D. M. Peht, C. Pelling, M. Steck, and F. Steinborn, “Ökologische und ökonomische Analyse von Brennstoffzellen-Heizgeräten.” Jul-2012.
- [249] “ISH15: Preisrutsch der Viessmann Brennstoffzelle Vitovalor 300-P und Markteinführung der Hexis Galileo 1000 N | BHKW-Infothek.” .
- [250] R. Baake, “Vorschlag für die Förderung der KWK - KWKG 2015.” März-2015.

- [251] M. Buller, Ganzheitliche Betrachtung des Mikro-KWK Potenzials im Wohngebäudebestand Korrelation zwischen Kraft-Wärme-Kopplung und Dämmmaßnahmen. Bonn: wvgw, Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, 2011.
- [252] Albus, Buller, and et al., "Anwendungspotenziale innovativer Gasanwendungstechnologien - Kraft-Wärme-Kopplung / Brennstoffzelle im System Gebäude / Anlagentechnik," Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e.V. (DVGW), Bonn, Essen, Freiburg, Karlsruhe, Abschlussbericht G 8/01/10 & G 8/02/10, May 2012.
- [253] Thomas and Widmann, "Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement," Hochschule Reutlingen, Reutlingen Research Institute RRI, Forschungsgruppe Energie- und Ressourceneffizienz, Reutlingen, Zwischenbericht BWE 13002, Feb. 2014.
- [254] o. V., "Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nicht-leistungsgemessener Kunden," vol. Praxisinformation P 2006/8 Gastransport/Betriebswirtschaft, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft, Aug-2006.
- [255] VDI 4656:2013-09, "Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen." Beuth Verlag GmbH, Berlin, Sep-2013.
- [256] Burger and Rogatty, "Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung," IKZ-Haustech., no. 18/2004, p. 44 ff., 2004.
- [257] DIN 4708-1:1994-04, "Zentrale Wassererwärmungsanlagen - Begriffe und Berechnungsgrundlagen." Beuth Verlag GmbH, Berlin, Apr-1994.
- [258] Schmidt and Görner, "Optimised dimensioning of thermal and electrical storages in synergetic use with micro-cogeneration systems in residential buildings," presented at the 26th World Gas Conference, Paris, Frankreich, 2015.
- [259] E-quad Power Systems GmbH, "C30 Mikrogasturbine zur Erzeugung von Strom und Wärme." .
- [260] Babcock, Borsing, Steinmüller GmbH, "QiP - Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage." .
- [261] "Ceramic Fuel Cells." [Online]. Available: <http://www.ceramicfuelcells.de/de/produkte/bluegen/bluegen-technologie/technische-daten/>. [Accessed: 16-Sep-2014].
- [262] Fuel Cell Energy Solutions, "Produktblatt DFC250." Oct-2012.
- [263] A. Ballhausen, "Blue Gen - Mikro-KWK mit Brennstoffzellen," 11-Feb-2014.
- [264] BHKW-Infothek, "ISH15: Preisrutsch der Viessmann Brennstoffzelle Vitovalor 300-P und Markteinführung der Hexis Galileo 1000 N," 23-Mar-2015. .
- [265] S. Jander, "CFC Anlage als Gemeinschaftsprojekt Wingas und Stadtwerke Bielefeld," presented at the Berliner Energietage 2015, Berlin, 29-Apr-2015.
- [266] ASUE, Gasturbinen-Kenndaten und Referenzen. .
- [267] Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausminderung durch Wärme-Kraft-Kopplung in der Industrie, Pruschek, Oeljeklaus, Lokurlu, Vogelsang, Studie Uni Essen 1995. .
- [268] Eigene Bewertungen und Abschätzungen anhand relevanter Literatur
- [269] BMWi, Gesamtausgabe der Energiedaten, 16.03.2015, Energiedaten Tab. 26. .
- [270] Eigene Bewertungen und Abschätzungen anhand relevanter Literatur
- [271] H. Wacketapp, M. Brune, R. Albus, and W. Weßing, "Der Gasmarkt braucht neue Technologien: Die Gaswärmepumpen Initiative (IGWP)," Gwf Gas Erdgas, no. 3/2009, Mar. 2009.
- [272] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., "Die Energieeinsparverordnung: EnEV 2009." Verlag rationeller Erdgaseinsatz, Berlin, 2009.
- [273] thermostrom Energietechnik GmbH and Strelbelwerk GmbH, "Preisliste 2014/2015." 13-May-2014.
- [274] S. Bukold, "Fossile Energieimporte und hohe Heizkosten: Herausforderungen für die deutsche Wärmepolitik," EnergyComment, Hamburg, Kurzstudie, Dec. 2013.
- [275] D. Rabenstein, "Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Hamburg durch energetische Gebäudesanierung," HafenCity Universität Hamburg Department Bauingenieurwesen, Hamburg, 1. Ergänzung zur Gutachterlichen Stellungnahme \* zum Basisgutachten für einen Masterplan Klimaschutz für Hamburg, Jun. 2011.



- [276] M. Hegger, J. Dettmar, A. Martin, T. Meinberg, B. Boczek, C. Drebes, M. Greiner, U. Hesse, T. Kern, D. Mahlke, A. Al Najjar, C. Schoch, J. Schulze, S. Sieber, V. Stute, O. Sylla, S. Wurzbacher, and A. Zelmer, "UrbanReNet - Schlussbericht (Anlage II)," Technische Universität Darmstadt, Abschlussbericht, Jun. 2013.
- [277] Guntamatic Heiztechnik GmbH, "Preisliste 2006." 18-Apr-2006.
- [278] M. Flayyih, F. Burmeister, S. Stinner, and W. Kraft, "Modelica-Simulation des Systems Nutzer/Gebäude/Anlagentechnik," Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Institute for Efficient Buildings and Indoor Climate an der RWTH Aachen, XRG Simulation GmbH, Bonn, Abschlussbericht DVGW Forschungsprojekt G 5-05-10, 2013.
- [279] Viessmann Deutschland GmbH, "Viessmann: Preisliste Öl-/Gas-Heizkessel, Stahlheizkessel Vitoplex." 2014.
- [280] C. Dötsch, J. Taschenberger, and I. Schönberg, "Leitfaden Nahwärme, UMSICHT-Schriftenreihe, Band 6." Fraunhofer IRB Verlag, 1998.
- [281] Vaillant Group Austria GmbH, "Preislistenblätter Wandgeräte Kamin und Heizkessel, Ausgabe Juli 2014." .
- [282] Viessmann Deutschland GmbH, "Viessmann: Preisliste 2012." 2012.
- [283] August Brötje GmbH, "Technische Preisliste 2012." 2012.
- [284] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, "VDI-Richtlinie: VDI 2067 Blatt 1 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung." VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (Hrsg.), 2012.
- [285] proKlima - Der enercity-Fonds, "Gas-Brennwertkesselliste." 30-Jul-2014.
- [286] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, "Produkte: Öl- und Gasbrennwertkessel." 2014.
- [287] AS Solar GmbH, "Flachkollektor AS-EFK 2.2." .
- [288] Vaillant GmbH, "Vaillant Solarsysteme - Energie frei Haus." .
- [289] bbsolar, "bbsolar «Energie der Zukunft» Flachkollektor." .
- [290] Schüco International KG, "Schüco Kollektor CTE 215 CH," 2009. .
- [291] TWL-Technologie GmbH, "Der neue EtaSunPro ® Kollektor ist da!" .
- [292] Kettner Umwelttechnik, "Vakuümrohrenkollektor," 2014. .
- [293] V. Dudek, M. Jurak, and A. Pankraz, "Energiebericht." Stadt Frankfurt a.M., Hochbauamt (Hrsg.), 30-Jun-2014.
- [294] H. Serup, H. Falster, C. Gamborg, P. Gundersen, L. Hansen, N. Heding, H. Jakobsen, P. Kofman, L. Nikolaisen, and I. M. Thomsen, Holz als Energieträger: Technik - Umwelt - Ökonomie, 2. Auflage. Vium (DK): EnergiOplysningen, 2000.
- [295] H. Böhnisch, M. Nast, and A. Stuible, "Entwicklung und Umsetzung eines Kommunikationskonzepts als Ansbuch zur Nahwärmeversorgung in Landgemeinden," Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart, Endbericht, 2001.
- [296] Dipl.-Ing. Michael Platt, M. Techn. Dipl.-Biol. Stephan Exner, and Prof. Dr. Rolf Bracke, "Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes," Mar-2010. .
- [297] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, "Viessmann Elektro-Wärmepumpen," Oct-2014. .
- [298] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, "Wärmepumpen für Ein-/Zweifamilienhäuser," Oct-2014. .
- [299] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, "Vaillant Wärmepumpen," Mar-2014. .
- [300] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, "Wärmepumpen für Merhfamilienhäuser und Industrie/Gewerbe," Oct-2014. .
- [301] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, "Vaillant Zeolith-Gas-Wärmepumpe zeoTHERM," Oct-2014. .
- [302] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, "Datenblatt Viessmann Vitosorp 200-F," Apr-2014. .
- [303] Heizsparer.de, "Wärmepumpen Kosten." .
- [304] Waermepumpen.info, "Wärmepumpen Preise." .
- [305] Löbbe GmbH, "Produktinfo zeoTHERM VAS 106/4." .
- [306] Löbbe GmbH, "Produktinfo Viessmann Vitosorp 200-F." .
- [307] R. Johannsen, "Chronik der Elektrotechnik: Elektrowärme." 09-Oct-2012.

- [308] K. Jahn, W. Schulz, G. Frey, S. Klinski, and H.-P. Schetter-Köhler, "Gutachten zur Außerbetriebnahme von elektrischen Nachtspeicherheizungen," Bremer Energie Institut, Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Fachhochschule für Wirtschaft, Berlin, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Endbericht BBSR-Online-Publikation, Nr. 20/2009, Aug. 2009.
- [309] G. Wohlauf, S. Thomas, W. Irrek, and O. Hohmeyer, "Ersatz von Elektro-Speicherheizung durch effiziente Brennwerttechnik: Beschreibung eines möglichen Förderprogramms eines Energieeffizienz-Fonds," Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Forschungsgruppe Energie-, Verkehrs- und Klimapolitik, Wuppertal, Oct. 2005.
- [310] W. Gäbler and S. Lechner, "Power to Heat: Projekt Wärmespeicher Forst - Lausitz," 13-Sep-2013. [Online]. Available: [http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user\\_upload/energietag\\_2013/Forum\\_1/3\\_Gaebler.pdf](http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user_upload/energietag_2013/Forum_1/3_Gaebler.pdf). [Accessed: 07-Feb-2014].
- [311] Vaillant Group Austria GmbH, "Preisliste: Küchen-Speicherheizgerät VSK." Jan-2014.
- [312] Vaillant Group Austria GmbH, "Preisliste: Elektro-Speicherheizgeräte Flachbaureihe, Bodenaufstellung und Wandmontage." Jan-2014.
- [313] Vaillant Group Austria GmbH, "Preisliste: Elektro-Speicherheizgeräte Universalbaureihe." Jan-2014.
- [314] AEG Haustechnik, "AEG Raumheizgeräte." 29-Apr-2008.
- [315] TECHNOTHERM International eine Marke der and Lucht LHZ Elektroheizung GmbH & Co. KG, "Preis- und Typenliste für den Fachhandel - 2014/2015." 2014.
- [316] Kioto Photovoltaics GmbH, "Photovoltaik aus Österreich: KIOTO SOLAR." 2014.
- [317] SYBALSOL UG, "Preisliste 2013." 2013.
- [318] GEMA GmbH, "Preisliste 2013: GEMA Pufferspeicher." 2013.
- [319] Nordholm OHG, "Brutto Verkaufs-Preisliste, Stand 01.06.2013." 2013.
- [320] Buderus, Bosch Thermotechnik GmbH, "Katalog 2011, Kapitel 4: Handtuch-Radiatoren." 2011.
- [321] Anton Schweizer, "Formelsammlung - Berechnungsprogramme für Anlagenbau und Stromaggregate," 20-Nov-2013. .
- [322] Dipl.-Ing. Lars Nierobis, "Vergleich der wichtigsten Dämmstoffe," Wärmedaemmstoffe, 2003. .
- [323] FEURON GmbH, "Wärme- und Kältespeicher." .
- [324] Dipl.-Ing. Lars Nierobis, "Wärmedämmstoffe," Wärmedaemmstoffe, 2002. .
- [325] Dirk Müller RWTH Aachen, "Forschungsaktivitäten PCM in der TGA," 2009. .
- [326] Andreas Hauer, "Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen," 11-Jul-2002. .
- [327] IKZ-Fachplaner, "Langfristige Wärmespeicherung," 2007. .

## V 2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Illustration zum Verbundprojekt roadmap   KWK.NRW .....	2
Abbildung 2: Teillastverhalten einer Mikro-Gasturbine mit 200 kW <sub>el</sub> – Werte von E-Quad Power Systems .....	6
Abbildung 3: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Verbrennungsmotor (Otto oder Diesel) [1], nachbearbeitet.....	8
Abbildung 4: Funktionsprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung zur Hausenergieversorgung [21] .....	10
Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Anzahl installierter Systeme und der staatl. Förderung im „ene-farm“, Programm JP [34], (Hinweis 1 EUR ≈ 147 YEN).....	14
Abbildung 6: Durchschnittliche Kostenstruktur für BZHG (Mikro-KWK) [37] .....	15
Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit offener Gasturbine und Zusatzfeuerung (optional) [39]	16
Abbildung 8: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit offener Gasturbine und Dampfeinspritzung (Cheng- Prozess) [39].....	16
Abbildung 9: Prinzipschaltbild einer GuD KWK-Anlage mit Zusatzfeuerung (optional) [39].....	17
Abbildung 10: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Entnahmekondensations-Turbine und Anzapfkondensations-Turbine [39], [42] .....	18
Abbildung 11: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage mit Gegendruckturbine [39], [42] .....	18
Abbildung 12: Schematische Darstellung des ORC-Prozesses [44] .....	20
Abbildung 13: TCR-Prinzip [46] .....	21
Abbildung 14: Spez. Netto-Richtpreis für wasserbasierte Wärmespeicher (Datenbasis: [95]–[102]) .....	38
Abbildung 15: Funktionsschema einer Lithium-Ionen-Batterie [111] .....	42
Abbildung 16: Schema einer Natrium-Schwefel-Batterie [111] .....	43
Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Redox-Flow-Batterie (eigene Zeichnung nach [112]) .....	44
Abbildung 18: Relativer Warmwasseranteil in Abhängigkeit des Energiekennwertes .....	51
Abbildung 19: Einflüsse auf den Stromverbrauch [118].....	52
Abbildung 20: Verteilung der Bevölkerung pro km <sup>2</sup> in Nordrhein-Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123]	55
Abbildung 21: Verteilung der durchschnittlichen Haushaltsgröße in Nordrhein-Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123] .....	56
Abbildung 22: Verteilung der durchschnittlichen Wohnfläche je Bewohner in Wohngebäuden in Nordrhein- Westfalen zum Stichtag 09. Mai 2011 [123] .....	57
Abbildung 23: Ausschnitt aus einem Fragebogen zur Verbrauchsermittlung [125] .....	60
Abbildung 24: Spezifische Brenn-, Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauchswerte, Quelle: [3].....	62
Abbildung 25: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Handel in NRW, Quelle: [147]	66
Abbildung 26: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Finanzdienstleistungen in NRW, Quelle: [147] .....	67
Abbildung 27: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Öffentliche Einrichtungen in NRW, Quelle: [147] .....	68
Abbildung 28: Verteilung der Erwerbstätigen pro 1.000 Einwohner im Bereich Finanzdienstleistungen, Handel und öffentliche Einrichtungen in NRW .....	69
Abbildung 29: Wärmebedarf nach Industriebranchen und Temperaturniveau für NRW in TWh/a Quelle: eigene Berechnungen.....	72
Abbildung 30: Wärmebedarf nach Industriebranchen für NRW bis 300 und 500 °C in TWh/a ohne Fernwärme Quelle: eigene Berechnungen.....	73
Abbildung 31: Verhältnisse des Endenergieverbrauchs zwischen NRW und BRD nach Industriebranchen für das Jahr 2011 Quelle: [153], [149] .....	74
Abbildung 32: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Industrie in NRW von 2007 bis 2012 in [%] Quelle: [149], eigene Berechnungen .....	75

Abbildung 33: Entwicklung der industriellen KWK-Wärmeerzeugung in NRW von 2007 bis 2012 Quelle: [149], eigene Berechnungen .....	76
Abbildung 34: Wärmedichte für den Wärmebedarf der Industrie in NRW 2013, Quelle: eigene Berechnungen .....	79
Abbildung 35: Anzahl der Anlagen in Abhängigkeit von der produzierten Wärmemenge (Anlagen mit einer Feuerungsleistung >20MW) Quelle: eigene Berechnungen.....	80
Abbildung 36: Relative Summenhäufigkeit der Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der relativen Anzahl der Anlagen mit einer Feuerungsleistung >20MW Quelle: eigene Berechnungen .....	80
Abbildung 37: Netto-Stromerzeugung aus KWK in Deutschland und NRW [155] .....	82
Abbildung 38: Jahreszubau Photovoltaik: NRW und BRD [155].....	83
Abbildung 39: Jahreszubau Windenergie: NRW und BRD [155] .....	83
Abbildung 40: Verteilung der erneuerbaren Energien auf die Spannungsebenen, [159] .....	84
Abbildung 41: Entwicklung der Stromversorgung in Deutschland nach dem BMU-Leitszenario 2009, Quelle: [161].....	85
Abbildung 42: Verteilung der potenziell installierbaren Leistung von Windkraftanlagen in den Kreisen und kreisfreien Städten nach dem NRW-Leitszenario (3 MW-Anlagen, schalloptimierte Betriebsweise), nach [162].....	86
Abbildung 43: Durchschnittliche jährliche Einstrahlung auf eine horizontale Fläche [163] .....	87
Abbildung 44: Gesamtpotenzial der Biomasse nach dem Leitszenario zur Stromerzeugung auf Kreisebene, nach [164].....	87
Abbildung 45: Realer 2-Tagesverlauf der Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland nach [166].....	88
Abbildung 46: Realer Stromerzeugungsverlauf für Solarkraft und Windenergie in Deutschland 2013-14, [166] .....	89
Abbildung 47: Verlauf der Residuallast 2020 bis 2050, [167].....	90
Abbildung 48: Häufigkeit von Null- oder negativen Preis in der EEX-/EPEX-Day-ahead-Auktion nach [168] .....	90
Abbildung 49: Entwicklung der KWK-Aufschläge [170] .....	96
Abbildung 50: Förderbetrag für Mikro KWK-Anlagen nach dem progres-Programm.....	109
Abbildung 51: Übersicht der verschiedenen Netzebenen [211].....	118
Abbildung 52: Geordnete Jahresdauerlinie der Residuallast [177].....	119
Abbildung 53: Beispiele für Situationen mit hoher und niedriger Residuallast [160] .....	121
Abbildung 54: Blindleistungskompensation durch kapazitive Last [217] .....	122
Abbildung 55: Jährlicher Stromimport (positive Werte) und -Export (negative Werte) von Deutschland in 2014 [223].....	124
Abbildung 56: Zeitliche Abfolge der Regelenergiearten [230][229] .....	125
Abbildung 57: Darstellung einer repräsentativen Tageslast [225].....	126
Abbildung 58: Zeitlich qualitative Darstellung der Teilmärkte in Deutschland [160].....	127
Abbildung 59: Entwicklung des durchschnittlichen mittleren Leistungspreises der bezuschlagten Gebote für PRL, SRL und MRL [226].....	128
Abbildung 60: Wohnungen im Bestand und Neubau 2012 [237] .....	136
Abbildung 61: Wärme- und Stromlastprofil für das Hotel.....	145
Abbildung 62: Jahresdauerlinien für den Anwendungsfall Hotel .....	146
Abbildung 63: Volllaststunden für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel .....	147
Abbildung 64: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren und der Stromdeckungsgrad für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel .....	147
Abbildung 65: Kapitalwert nach 10 Jahren und dynamische Amortisationszeit für BHKW unterschiedlicher Leistungsgrößen für das Hotel .....	148
Abbildung 66: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren, eigenverbraucher KWK-Strom und Volllaststunden pro Jahr aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im vollsanierten Einfamilienhaus.....	150

Abbildung 67: CO <sub>2</sub> - und Primärenergieeinsparung der verschiedenen BHKW im vollsanierten Einfamilienhaus pro Jahr .....	150
Abbildung 68: Kumulierter Deckungsbeitrag nach 10 Jahren, eigenverbraucher KWK-Strom und Volllaststunden pro Jahr aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im teilsanierten Einfamilienhaus .....	151
Abbildung 69: Ergebnisse aller simulierten Mikro-KWK-Anlagen im teilsanierten Mehrfamilienhaus .....	152
Abbildung 70: CO <sub>2</sub> - & PE-Einsparungen für das Objekt teilsaniertes MFH .....	153
Abbildung 71: Kapitalwert nach 10 Jahren für das Hotel bei Parametervariation .....	154
Abbildung 72: Stromgestehungskosten bei Variation verschiedener Eingangsparameter für den Anwendungsfall Hotel.....	155
Abbildung 73: Auswirkung verschiedener Förderszenarien auf die Stromgestehungskosten für das Objekt Hotel .....	155
Abbildung 74: Sensitivitätsanalyse BZHG (0,75 kW <sub>el</sub> ) im vollsanierten EFH .....	157
Abbildung 75: Sensitivitätsanalyse motorische Mikro-KWK-Anlage (1 kW <sub>el</sub> ) im teilsanierten EFH.....	157
Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse Verbrennungsmotor (2,6 kW <sub>el</sub> ) im Mehrfamilienhaus .....	158
Abbildung 77: Übersichtsdarstellung der energie-bilanziellen Verknüpfungen der simulationstechnisch abgebildeten Teilsysteme .....	160
Abbildung 78: Exemplarische normierte wärmegeführte Betriebsweise für ein Wärmespeichervolumen von 500 l, einer thermischen Nennleistung des KWK Systems von 2,5 kW, einer maximalen Leistung des Zusatzheizgerätes von 13,9 kW sowie 3 Bewohnern. [258] .....	164
Abbildung 79: Geglätteter Verlauf der Tagesmitteltemperatur über das Referenzjahr, graphische Unterlegung der Sommertage sowie Auftragung der typtagzuordnenden Grenztemperaturen .....	165
Abbildung 80: Verlauf des tagesmittleren Ladezustands des Wärmespeichers über das Referenzjahr.....	166
Abbildung 81: Verlauf des tagesmittleren Ladezustands des Stromspeichers über das Referenzjahr .....	167
Abbildung 82: Einfluss der objektabhängigen Stromkennzahl auf den Stromeigennutzungsanteil .....	169
Abbildung 83: Einfluss der objektabhängigen Stromkennzahl auf den Stromdeckungsgrad.....	170
Abbildung 84: spez. Richtpreis von Konstanttemperaturkesseln für den Festbrennstoff Holz (Datenbasis: [273][277]) .....	215
Abbildung 85 spez. Netto-Richtpreis für Erdgas- und Ölniedertemperaturkessel (Datenbasis: [272][279][281], [282]).....	216
Abbildung 86: spez. Netto-Richtpreis für Gas- und Ölbrennwertkessel (Datenbasis: [58], [281], [283], [286])	217
Abbildung 87: spez. Netto-Richtpreis für Holzpellet-Zentralheizungen [66] .....	219
Abbildung 88: spezifische Netto-Richtpreise für Hackschnitzelkessel [69] .....	220
Abbildung 89: spez. Netto-Richtpreis für Scheitholz-Zentralheizungen [75] .....	221
Abbildung 90: spez. Netto-Richtpreis für Nachtspeicherheizungen (Datenbasis: [311]–[315]) .....	223
Abbildung 91: spez. Netto-Richtpreis für Heizpatronen (Datenbasis: [316]–[320]).....	224
Abbildung 92: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Ernährung und Tabak“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	230
Abbildung 93: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Fahrzeugbau“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	230
Abbildung 94: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Glas und Keramik“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	231
Abbildung 95: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Grundstoffchemie“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	231
Abbildung 96: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Gummi- und Kunststoffwaren“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	232
Abbildung 97: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Maschinenbau“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	232

Abbildung 98: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Metallbearbeitung“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen .....	233
Abbildung 99: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Metallerzeugung“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen .....	233
Abbildung 100: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „NE-Metalle-gießereien“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen .....	234
Abbildung 101: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Papiergewerbe“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen .....	234
Abbildung 102: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Sonstige chemische Industrie“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	235
Abbildung 103: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Verarbeitung v. Steinen u. Erden“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen.....	235
Abbildung 104: Lastgänge „Hotel“ .....	236
Abbildung 105: Jahresdauerlinien „Hotel“ .....	236
Abbildung 106: Lastgänge „kleines Krankenhaus“ .....	237
Abbildung 107: Jahresdauerlinien „kleines Krankenhaus“ .....	237
Abbildung 108: Lastgänge „großes Krankenhaus“ .....	238
Abbildung 109: Jahresdauerlinien „großes Krankenhaus“ .....	238
Abbildung 110: Excel-Tool für Objektanalyse: technische und wirtschaftliche Eingangsparameter .....	239
Abbildung 111: Excel-Tool für Objektanalyse: Eingabe Betriebsstrategie sowie Strom- und Wärmebedarfsprofile.....	240
Abbildung 112: Objektanalyse: Betriebsstrategie wärmegeführt.....	241
Abbildung 113: Objektanalyse: Betriebsstrategie stromgeführt .....	241
Abbildung 114: Objektanalyse: Betriebsstrategie stromorientiert .....	242
Abbildung 115: Objektanalysen: Glossar Betriebsstrategien.....	242
Abbildung 116: Regelungsschema für das KWK-Aggregat (links) und das Zusatzheizgerät (rechts). Die Zustandsanforderung „1“ entspricht der Vollastanforderung des Teilsystems. Das Teilsystem ist ausgeschaltet, sofern die Zustandsanforderung „0“ ist .....	243

## V 3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl von Brennstoffzellenheizgeräten für Mikro-KWK [24].....	12
Tabelle 2: Auswahl von Brennstoffzellen für BHKW-Anwendungen [8], [11–13].....	14
Tabelle 3: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Blei-Säure Batterie [111] .....	41
Tabelle 4: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Lithium-Ionen-Batterie [111].....	42
Tabelle 5: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Natrium-Schwefel-Batterie [111].....	43
Tabelle 6: Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Hindernisse der Redox-Flow-Batterie [111] .....	45
Tabelle 7: Relative Reduktion des Endenergieverbrauchs durch baulichen Wärmeschutz nach [47] .....	49
Tabelle 8: Relative Reduktion des Endenergiebedarfs durch Modernisierungsmaßnahmen nach [116] .....	50
Tabelle 9: Jährlicher Strombedarf nach [117] .....	52
Tabelle 10: Absolute Verbräuche der einzelnen Bereiche des GHD-Sektors .....	65
Tabelle 11: Endenergieverbrauch nach Industriezweigen in NRW für 2012 (Angabe in TWh/a), Quelle: [149], eigene Berechnungen .....	70
Tabelle 12: Anteil des jeweiligen Energieträgers (in %) für die Erzeugung von Raumwärme, Prozesswärme sowie Kälte und Prozesskälte für Industrie in der BRD .....	71
Tabelle 13: Aufteilung des Wärmebedarfs nach Industriebranchen und Temperaturniveau. Angabe in % Quelle: [152], [150], eigene Berechnungen .....	71
Tabelle 14: Wärmebedarf bis 300 °C nach Industriebranchen in TWh/a abgeleitet von statistischen Daten für NRW und BRD Quelle: [150], eigene Berechnungen .....	74
Tabelle 15: Entwicklung des Wärmebedarfes (ohne Fernwärme) in NRW bis 2020 bzw. 2030 in TWh/a Quelle: [149], eigene Berechnungen .....	77
Tabelle 16: Kohlendioxid- Emissionsfaktoren nach Energieträgern Quelle: [249].....	78
Tabelle 17: Fördersätze für KWK-Anlagen nach § 7 Abs. 1 - 4 .....	96
Tabelle 18:Fördersätze für eingespeisten Strom nach dem Vorschlag für die Förderung der KWK – KWK-G2015 .....	99
Tabelle 19: Ausschnitt BAFA-Liste "Mini-KWK-Anlagen" .....	101
Tabelle 20: Notwendige el. Wirkungsgrade bei Nennleistung für Bonusförderung "Stromeffizienz" .....	103
Tabelle 21: Förderung nach Mini-KWK-Impulsprogramm .....	103
Tabelle 22: Förderung nach progres.nrw Programmbereich Markteinführung .....	107
Tabelle 23: Förderungen nach progres.nrw Programmbereich KWK .....	109
Tabelle 24: Zu zahlende Anteile der EEG-Umlage bei Eigenversorgung.....	114
Tabelle 25: DSI-Potenziale in Deutschland [222].....	123
Tabelle 26: Regelenergiearten und deren Eigenschaften .....	127
Tabelle 27: Praktische Relevanz der Fahrweisen in Abhängigkeit von Leistung und Zielausrichtung.....	133
Tabelle 28: Referenzsysteme zur Bewertung von KWK-Anlagen.....	136
Tabelle 29: spezifische CO2-Emissionen.....	138
Tabelle 30: spezifische Primärenergiefaktoren .....	139
Tabelle 31: Kenndaten der analysierten Objekte.....	145
Tabelle 32: Technische und wirtschaftliche Kenndaten der ausgelegten KWK-Anlagen für das EFH .....	149
Tabelle 33: Technische und wirtschaftliche Kenndaten der ausgelegten BHKW für das MFH .....	151





# 8 Anhang

A1	Tabellen: Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung .....	206
A2	Tabellen: Alternative Systeme zur Wärmebereitstellung .....	215
A3	Tabellen: Thermischer Speichersysteme .....	225
A4	Tabellen: Elektrische Speichersysteme .....	227
A5	Branchenabhängige Endenergieverbrauchsentwicklungen.....	230
A6	Lastgänge und Jahresdauerlinien der Objektanalyse .....	236
A7	Excel-Tool für Objektanalyse.....	239
A8	Betriebsstrategien der Objektanalyse.....	241
A9	Regelungsschema für erweiterte Speicheruntersuchung .....	243

## A1 Tabellen: Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung

### Stirling-Motor

Technische Daten nach heutigem Stand		
Leistungsklasse bis 1 kW <sub>el</sub> <sup>a</sup>		
	Mittelwerte	Min-Max
Gesamtwirkungsgrad / %	99,3	91 – 107 [2]
Elektrischer Wirkungsgrad / %	14,4	13,9 – 15 [2]
Stromkennzahlbereich	0,18	0,17 – 0,20 [2]
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	-	8 – 70 / 30 – 40 [2]
Schall / dB(A)	47	45 – 54 [2]
<sup>a</sup> Berücksichtigung von 5 verschiedenen Anlagen		
<b>Die angegebenen Werte (sowohl Min./Max. als auch Mittelwerte) dienen lediglich der Veranschaulichung! Sie sind für konkrete Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht geeignet!</b>		

Kosten nach heutigem Stand		
Leistungsklasse bis 1 kW <sub>el</sub> <sup>b</sup>		
	Mittelwerte	Min-Max
Spezifische Modulkosten / EUR/kW <sub>el</sub>	13.850	11.950 – 15.950
Spezifische Einbindungskosten / EUR/kW <sub>el</sub>	k.A.	k.A.
Investitionskosten /EUR	13.850 + X	11.950 + X – 15.950 + X
Instandhaltungskosten / EUR/a	150	50 - 250
<sup>b</sup> Berücksichtigung von 5 verschiedenen Anlagen		
<b>Die angegebenen Werte (sowohl Min./Max. als auch Mittelwerte) dienen lediglich der Veranschaulichung! Sie sind für konkrete Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht geeignet!</b>		

### Mikro-Gasturbine

Technische Daten nach heutigem Stand	
Leistungsbereich 30 – 60 kW <sub>el</sub>	
	Heute
Gesamtwirkungsgrad / %	ca. 83 [8]
Elektrischer Wirkungsgrad / %	24 – 27 [8]
Thermischer Wirkungsgrad / %	56 - 59
Stromkennzahlbereich	0,41 – 0,48
Lebensdauer / Bh	ca. 80.000 [259], [11]
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/m <sup>3</sup>	< 19 / < 50 [259], [11]
Leistungsbereich 60 – 200 kW <sub>el</sub>	
Gesamtwirkungsgrad / %	79 – 95 [8]
Elektrischer Wirkungsgrad / %	30 – 31 [8]
Thermischer Wirkungsgrad / %	48 – 65 [260]
Stromkennzahlbereich	0,49 – 0,66
Lebensdauer / Bh	ca. 80.000 [12]
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/m <sup>3</sup>	< 40 / < 90 [12]

<b>Kosten nach heutigem Stand</b>	
<b>Leistungsbereich 30 – 60 kW<sub>el</sub> [15]</b>	
Spezifische Investitionskosten / EUR/kW <sub>el</sub>	2.270 – 1.390
Teilwartungskosten / EUR/Bh	0,3 – 0,57
Vollwartungskosten / EUR/Bh	0,54 – 0,9
Vollwartungskosten / ct/kWh <sub>el</sub> *	1,8 – 1,5
<b>Leistungsbereich 60 – 200 kW<sub>el</sub> [15]</b>	
Spezifische Investitionskosten / EUR/kW <sub>el</sub>	1.390 – 1.380
Teilwartungskosten / EUR/Bh	0,57 – 1,08
Vollwartungskosten / EUR/Bh	0,9 – 2,31
Vollwartungskosten / ct/kWh <sub>el</sub> *	1,5 – 1,2
*Basierend auf 6.000 Bh/a	

## Verbrennungsmotor

<b>Technische Daten nach heutigem Stand</b>		
<b>Leistungsklasse 0,3 bis ≤ 10 kW<sub>el</sub></b>		
	Mittelwerte	Min – Max
Gesamtwirkungsgrad / %	92	82 - 109
Elektrischer Wirkungsgrad / %	26	19 - 30
Thermischer Wirkungsgrad / %	66	55 - 82
Stromkennzahl	0,39	0,21 – 0,50
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	< 50 – 350 / 11 – 550	
Schall / dB(A)	57	53 - 59
Berücksichtigung von 28 verschiedenen BHKW für Wirkungsgrade und Stromkennzahl [19] Berücksichtigung von 16 verschiedenen BHKW für Emission und Schall [18]		
<b>Leistungsklasse &gt; 10 – ≤ 50 kW<sub>el</sub></b>		
Gesamtwirkungsgrad / %	93	81 – 105
Elektrischer Wirkungsgrad / %	32	26 – 37
Thermischer Wirkungsgrad / %	61	49 – 74
Stromkennzahl	0,52	0,40 – 0,69
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	52 – < 500 / 3 – < 650	
Schall / dB(A)	61	49 – 89
Berücksichtigung von 91 verschiedenen BHKW für Wirkungsgrade und Stromkennzahl [19] Berücksichtigung von 41 verschiedenen BHKW für Emission und Schall [18]		
<b>Leistungsklasse &gt; 50 – ≤ 100 kW<sub>el</sub></b>		
Gesamtwirkungsgrad / %	89	85 – 95
Elektrischer Wirkungsgrad / %	35	34 – 40
Thermischer Wirkungsgrad / %	53	48 – 57
Stromkennzahl	0,66	0,6 – 0,77
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	< 125 – < 500 / < 150 – < 1.000	
Berücksichtigung von 37 verschiedenen BHKW Wirkungsgrade und Stromkennzahl [19] Berücksichtigung von 21 verschiedenen BHKW für Emission und Schall [18]		

<b>Leistungsklasse &gt; 100 – ≤ 1.000 kW<sub>el</sub></b>		
Gesamtwirkungsgrad / %	88	82 – 95
Elektrischer Wirkungsgrad / %	38	34 – 43
Thermischer Wirkungsgrad / %	49	42 – 59
Stromkennzahl	0,78	0,57 – 1,00
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	50 – 500 / < 150 - < 1.000	
Berücksichtigung von 229 verschiedenen BHKW Wirkungsgrade und Stromkennzahl [19] Berücksichtigung von 104 verschiedenen BHKW für Emission und Schall [18]		
<b>Leistungsklasse &gt; 1.000 – ≤ 2.000 kW<sub>el</sub></b>		
Gesamtwirkungsgrad / %	87	82 – 89
Elektrischer Wirkungsgrad / %	43	38 – 45
Thermischer Wirkungsgrad / %	44	41 – 50
Stromkennzahl	0,96	0,75 – 1,09
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	250 – 500 / < 300 - < 650	
Berücksichtigung von 57 verschiedenen BHKW für Wirkungsgrade und Stromkennzahl [19] Berücksichtigung von 31 verschiedenen BHKW für Emission und Schall [18]		
<b>Leistungsklasse 2 – 20 MW<sub>el</sub></b>		
Gesamtwirkungsgrad / %	87	81 – 91
Elektrischer Wirkungsgrad / %	45	42 – 49
Thermischer Wirkungsgrad / %	41	32 - 46
Stromkennzahl	1,1	0,91 – 1,55
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	500 / < 300 - < 850	
<b>Die angegebenen Werte (sowohl Min./Max. als auch Mittelwerte) dienen lediglich der Veranschaulichung! Sie sind für konkrete Berechnungen nicht geeignet!</b>		

<b>Grenzwerte TA-Luft [19]</b>		
NO <sub>x</sub> / mg/m <sup>3</sup> *		
Viertaktmotoren	Magergasmotoren	Selbstzünd.-/Zündstrahlmotoren
250	500	500
CO / mg/m <sup>3</sup> *		
Fremdzündungsmotoren		Selbstzündungs-/Zündstrahlmotoren
300		300
*Werte gelten für den Brennstoff Erdgas; für andere Brennstoffe sind andere Grenzwerte einzuhalten		

## Brennstoffzellen

Technische Daten nach heutigem Stand		
Leistungsklasse bis 10 kW <sub>el</sub> <sup>a</sup>		
	Mittelwerte	Min-Max
Gesamtwirkungsgrad / %	90,0	82 – 98 [24]
Elektrischer Wirkungsgrad / %	39,3	34– 60 <sup>b</sup> [24]
Stromkennzahlbereich	0,90	0,50 – 2,46 [24]
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	-	10 / 150 [261]
Schall / dB(A)	-	46 [261]
<sup>a</sup> Berücksichtigung von 9 verschiedenen BZHG		
<sup>b</sup> 60 % Wirkungsgrad derzeit mit SOFC-Technik realisiert [261]		
Leistungsklasse ab 100 kW <sub>el</sub> <sup>c</sup>		
Gesamtwirkungsgrad / %	87,9	90- 91 [28], [29], [32]
Elektrischer Wirkungsgrad / %	45,3	32 – 47 [28], [29], [32]
Stromkennzahl(bereich)	1,0	0,81 – 1,28 [29]
Emission NO <sub>x</sub> / CO / mg/Nm <sup>3</sup>	-	NO <sub>x</sub> 4,54 mg/kWh SOX 4,54 E-2 mg/kWh PM10 9 E-3 mg/kWh [262]
Schall / dB(A)	-	70 - 80
<sup>c</sup> Berücksichtigung von 14 verschiedenen Anlagen		
<b>Die angegebenen Werte (sowohl Min./Max. als auch Mittelwerte) dienen lediglich der Veranschaulichung! Sie sind für konkrete Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht geeignet!</b>		

Kosten nach heutigem Stand		
Leistungsklasse bis 10 kW <sub>el</sub>		
Spezifische Modulkosten / EUR/kW <sub>el</sub>	21.300 <sup>d</sup>	16.670 – 26.000 [274], [261]
Spezifische Einbindungskosten / EUR/kW <sub>el</sub>	7.500 <sup>d</sup>	5.000 – 9.000 <sup>e</sup> [265]
Wartungskosten / EUR/a	535 <sup>d</sup>	300 – 600 [274], [261]
Leistungsklasse ab 100 kW <sub>el</sub>		
Spezifische Modulkosten / EUR/kW <sub>el</sub>	Kosten sind nicht publiziert und werden jeweils individuell zwischen Kunde und Hersteller verhandelt	
Spezifische Einbindungskosten / EUR/kW <sub>el</sub>		
Investitionskosten /EUR		
Wartungskosten / EUR/a		
<sup>d</sup> Berücksichtigung der Mittelwerte von 2 Herstellerangaben		
<sup>e</sup> Schätzwert		
<b>Die angegebenen Werte (sowohl Min./Max. als auch Mittelwerte) dienen lediglich der Veranschaulichung! Sie sind für konkrete Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht geeignet!</b>		

**Gasturbine**

<b>Technische Daten nach heutigen Stand [41], [266], [267], [268]</b>	
<b>1. Offene Gasturbine, Leistungsbereich 2-10 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	22 - 35
Thermischer Wirkungsgrad [%]	45 - 60
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	80 - 82
Stromkennzahl	0,4 - 0,8
Lebensdauer [a]	35-40
Emission NO <sub>x</sub> /CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	k.A.
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte	
<b>2. Offene Gasturbine, Leistungsbereich 10-50 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	30 - 40
Thermischer Wirkungsgrad [%]	40 - 50
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	84 - 85
Stromkennzahl	0,6 - 0,9
Lebensdauer [a]	40
Emission NO <sub>x</sub> /CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	50/100
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV - Tagesmittelwerte	
<b>3. Offene Gasturbine mit Dampfeinspritzung (Cheng Prozess), Leistungsbereich 2-10 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	28 - 38
Thermischer Wirkungsgrad [%]	15 - 38
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	53 - 66
Stromkennzahl	0,7 – 2,5
Lebensdauer [a]	35-40
Emission NO <sub>x</sub> /CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	k.A.
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte	
<b>4. Gas-und Dampfturbinen (GuD) Anlage mit Entnahmekondensationstur- bine, Leistungsbereich 50-200 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	48 - 52
Thermischer Wirkungsgrad [%]	25 – 42
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	77 - 90
Stromkennzahl	1,1 – 2, 1
Lebensdauer [a]	50
Emission NO <sub>x</sub> /CO [mg/m <sup>3</sup> ] GT*)	50/100
Emission NO <sub>x</sub> /CO [mg/m <sup>3</sup> ] DT **)	100-200/50-100
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte	
**) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) – Tagesmittelwerte	

<b>5. Gas-und Dampfturbinen (GuD) Anlage mit Entnahmekondensationsturbinen, Leistungsbereich 200-500 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	52 - 58
Thermischer Wirkungsgrad [%]	18 - 36
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	76 - 88
Stromkennzahl	1,4 - 3,2
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] GT*)	50/100
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] DT **)	100-300/50-100
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte **) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) – Tagesmittelwerte	
<b>6. Gas-und Dampfturbinen (GuD) Anlage mit Gegendruckturbinen, Leistungsbereich 50-200 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	43 - 47
Thermischer Wirkungsgrad [%]	27 - 44
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	74 - 87
Stromkennzahl	0,9 - 1,7
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] GT*)	50/100
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] DT **)	100-200/50-100
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte **) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) – Tagesmittelwerte	
<b>7. Gas-und Dampfturbinen (GuD) Anlage mit Gegendruckturbinen, Leistungsbereich 200-500 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	47 - 53
Thermischer Wirkungsgrad [%]	20 - 38
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	73 - 85
Stromkennzahl	1,2 - 2,7
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] GT*)	50/100
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] DT **)	100-300/50-100
*) Emissionswerte nach 13. BImSchV – Tagesmittelwerte **) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) – Tagesmittelwerte	

<b>Kosten nach heutigem Stand [41], [267], [268], [269]</b>		
KWK Anlage	Mittlere spezifische Investitionskosten [EUR/kWel]	Variable Kosten Richtwerte für Erdgas *) [EUR/MWh el]
GT 2-10 MW	900 - 1200	107-171
GT 10- 50 MW	800 - 900	94-126
GT Cheng Prozess 2- 5 MW	1100 - 1200	110-135
GT Cheng Prozess 5- 10 MW	1000 - 1100	99-118
GuD 50-200 MW	900 - 1200	72-87
GuD 200-500 MW	750 - 900	65-80
*) Erdgaspreis 3,4 Ct/kWh (2013), [268]		

## Dampfturbine

<b>Technische Daten nach heutigem Stand [41], [267], [270]</b>	
<b>1. Gegendruckturbine Leistungsbereich 1-10 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	15 - 25
Thermischer Wirkungsgrad [%]	45 - 70
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	70 - 85
Stromkennzahl	0,2 - 0,6
Lebensdauer [a]	30 - 35
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	180-300/ 80 <sup>3)</sup> 100-200/ 50-100 <sup>4)</sup>
*) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte 3) Flüssige Brennstoffe, 4) Gasförmige Brennstoffe	
<b>2. Gegendruckturbine Leistungsbereich 10-50 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	20 - 28
Thermischer Wirkungsgrad [%]	45 - 70
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	73 - 90
Stromkennzahl	0,3 - 0,6
Lebensdauer [a]	40
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	180-300/ 80 <sup>3)</sup> 100-200/ 50-100 <sup>4)</sup>
*) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte 1) feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, 2) Biobrennstoffe, 3) Flüssige Brennstoffe 4) Gasförmige Brennstoffe	



<b>3. Gegendruckturbine Leistungsbereich 50-200 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	23 - 30
Thermischer Wirkungsgrad [%]	42 - 65
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	72 - 88
Stromkennzahl	0,4 - 0,7
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	150-200/200 <sup>1)</sup> 150-200/200-250 <sup>2)</sup> 100-150/ 80 <sup>3)</sup> 100-300/ 50-100 <sup>4)</sup>
*) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte 1) feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, 2) Biobrennstoffe, 3) Flüssige Brennstoffe 4) Gasförmige Brennstoffe	
<b>4. Entnahmekondensationsturbine Leistungsbereich 1-10 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	25 - 30
Thermischer Wirkungsgrad [%]	30 - 40
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	60 - 65
Stromkennzahl	0,6 – 1,0
Lebensdauer [a]	30 - 35
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	k.A./k.A. <sup>3)</sup> k.A./ 50-100 <sup>4)</sup>
*) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte Für NOx keine Angaben in dieser Leistungsklasse, CO nur für gasförmige Brennstoffe 1) feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, 2) Biobrennstoffe, 3) Flüssige Brennstoffe 4) Gasförmige Brennstoffe	
<b>5. Entnahmekondensationsturbine Leistungsbereich 10-50 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	30 - 33
Thermischer Wirkungsgrad [%]	29 - 37
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	62 - 67
Stromkennzahl	0,8 - 1,1
Lebensdauer [a]	40
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	150-300 /80 <sup>3)</sup> 100-200/ 50-100 <sup>4)</sup>
*) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte 1) feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, 2) Biobrennstoffe, 3) Flüssige Brennstoffe 4) Gasförmige Brennstoffe	
<b>6. Entnahmekondensationsturbine Leistungsbereich 50-200 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	35 - 38
Thermischer Wirkungsgrad [%]	25 - 35
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	63 - 70
Stromkennzahl	1,0 - 1,5
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] *)	150-200/200 <sup>1)</sup> 150-200/200-250 <sup>2)</sup> 100-150/ 80 <sup>3)</sup> 100-300/ 50-100 <sup>4)</sup>
Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte 1) feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, 2) Biobrennstoffe, 3) Flüss. Brennstoffe 4) Gasf. Brennstoffe	

<b>7. Entnahmekondensationsturbine Leistungsbereich &gt;200 MWel</b>	
	Heute
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	36 - 39
Thermischer Wirkungsgrad [%]	10 – 30 *)
Brennstoffausnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) [%]	49 – 66 *)
Stromkennzahl [%]	1,2 – 3,9
Lebensdauer [a]	50
Emission NOx/CO [mg/m <sup>3</sup> ] **)	150-200/200 <sup>1)</sup> 150/200-250 <sup>2)</sup> 100/ 80 <sup>3)</sup> 300/ 50-100 <sup>4)</sup>
<p>*) Es wird nur so wenig Wärme ausgekoppelt, wie für den Bedarf von Fernwärmenetzen erforderlich ist. Diese Betriebsart entspricht nicht der eines BHKW. Im Vordergrund steht die Stromproduktion.            **) Emissionswerte abhängig von der Feuerleistung (13. BImSchV) - Tagesmittelwerte  <sup>1)</sup> feste Brennstoffe ohne Biobrennstoffe, <sup>2)</sup> Biobrennstoffe, <sup>3)</sup> Flüss. Brennstoffe <sup>4)</sup> Gasf. Brennstoffe</p>	

<b>Kosten nach heutigem Stand [41], [267], [270] , [269]</b>		
KWK Anlage	Mittlere spezifische Investitionskosten [EUR/kW el]	Variable Kosten Richtwerte für Erdgas/Steinkohle **) [EUR/MWh el]
Gegendruckturbine 1-10 MWel	950 - 1150	150-250 <sup>1)</sup>
Gegendruckturbine 10-50 MWel	850 - 950	125-187 <sup>1)</sup>
Gegendruckturbine 50-200 MWel	750 - 850	114-163 <sup>1)</sup>
Entnahmekondensationsturbine 1-10 MWel	1100 - 1300	125-150 <sup>1)</sup>
Entnahmekondensationsturbine 10-50 MWel	900 - 1100	114-125 <sup>1)</sup>
Entnahmekondensationsturbine 50-200 MWel	800 - 900	99-107 <sup>1)</sup>
Entnahmekondensationsturbine >200 MWel <sup>2)</sup>	1400 - 1800	28-30 <sup>2)</sup>
<p>**) Erdgaspreis 3,4 Ct/kWh (2013), [7]            **) Steinkohle 79,09 EUR/t (2013), [7]  <sup>1)</sup> berechnet für Erdgas  <sup>2)</sup> berechnet für Steinkohle</p>		

## A2 Tabellen: Alternative Systeme zur Wärmebereitstellung

### Heizwertkessel

Technische Daten nach heutigem Stand		
	Heute	Prognose
Stadium	seit 45 Jahren etabliert [271][272]	veraltet
Energieträger	Erdgas, Heizöl Festbrennstoffe	nur Festbrennstoffe [51] Holz, Kohle, Koks [273]
Nutzungsgrade	60 – 70 % [49][50]	
Lebensdauer	um 30 Jahre [274][275]	
Leistungsbereich	20 – 8.000 kW [276]	10 – 56 kW [273][277]
Einsatzbereiche	EFH, MFH, GHD	EFH, MFH

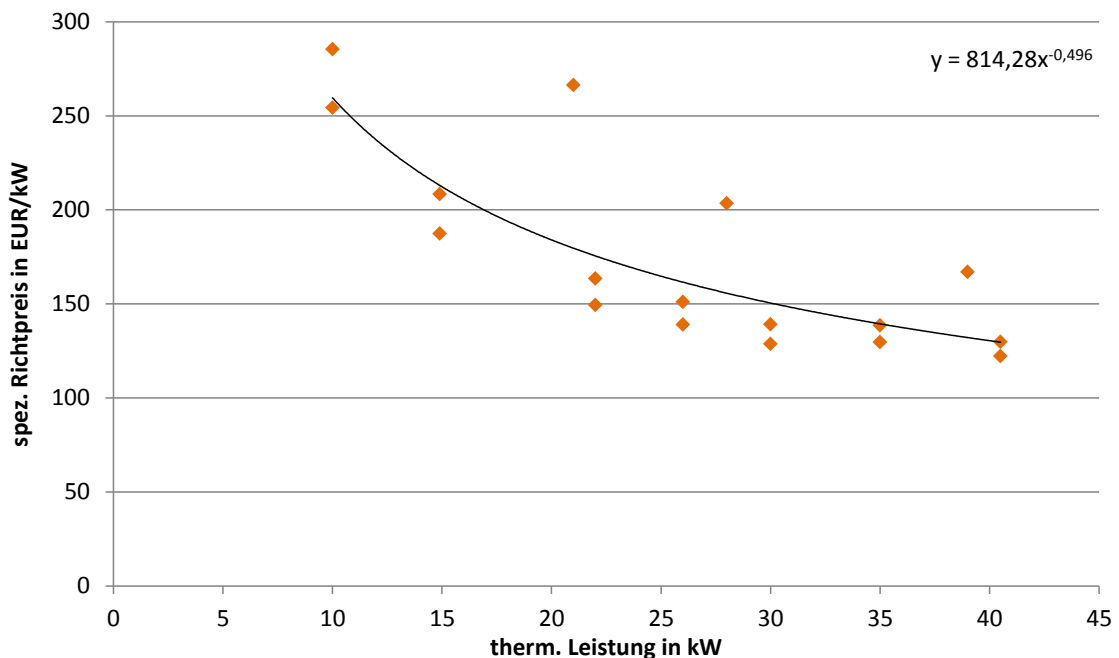


Abbildung 84: spez. Richtpreis von Konstanttemperaturkesseln für den Festbrennstoff Holz (Datenbasis: [273][277])

## Niedertemperaturkessel

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Stadium	seit 40 Jahren etabliert [278]
Energieträger	Erdgas, Heizöl [272] Flüssiggas [3][4]
Normnutzungsgrade	88 – 96 % [3][4][280]
Lebensdauer	20 – 25 Jahre [56]
Leistungsbereich	5 – 2.000 kW [80][280]
Einsatzbereiche *	EFH 28 kW ± 10,7 kW MFH 284 kW ± 220 kW GHD 774 kW ± 521 kW

\* Mittelwert ± mittlere Abweichung (Datenbasis: [279][58][281][282][283])

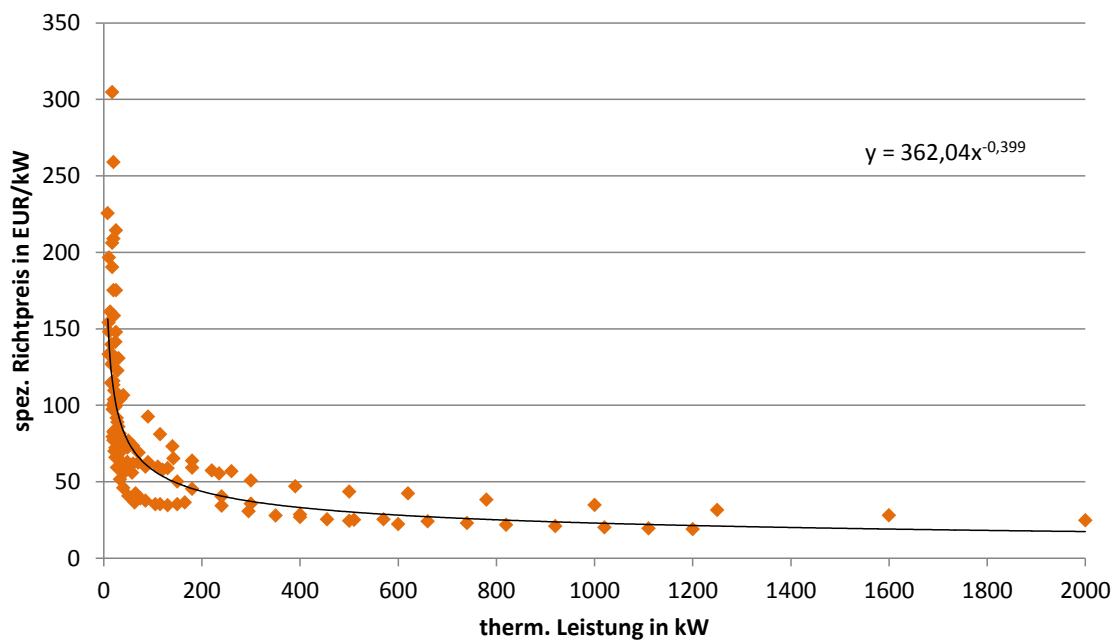


Abbildung 85 spez. Netto-Richtpreis für Erdgas- und Ölniedertemperaturkessel (Datenbasis: [272][279][281], [282])

## Brennwertkessel

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Stadium	seit 20 Jahren etabliert [60]
Energieträger	Erdgas, Heizöl Biogas, Flüssiggas, Pellets
Normnutzungsgrad (bzgl. Heizwert)	
Gas	101 – 111 % [59][61]
Heizöl	97 – 106 % [60][61]
Lebensdauer	15 - 20 Jahre [56][284]
Leistungsbereich	0,9 - 10.000 kW [285] [57]
Einsatzbereiche *	EFH 35 kW ± 16 kW MFH 230 kW ± 165 kW GHD 437 kW ± 356 kW

\* Mittelwert ± mittlere Abweichung (Datenbasis: [58], [281], [283], [286])

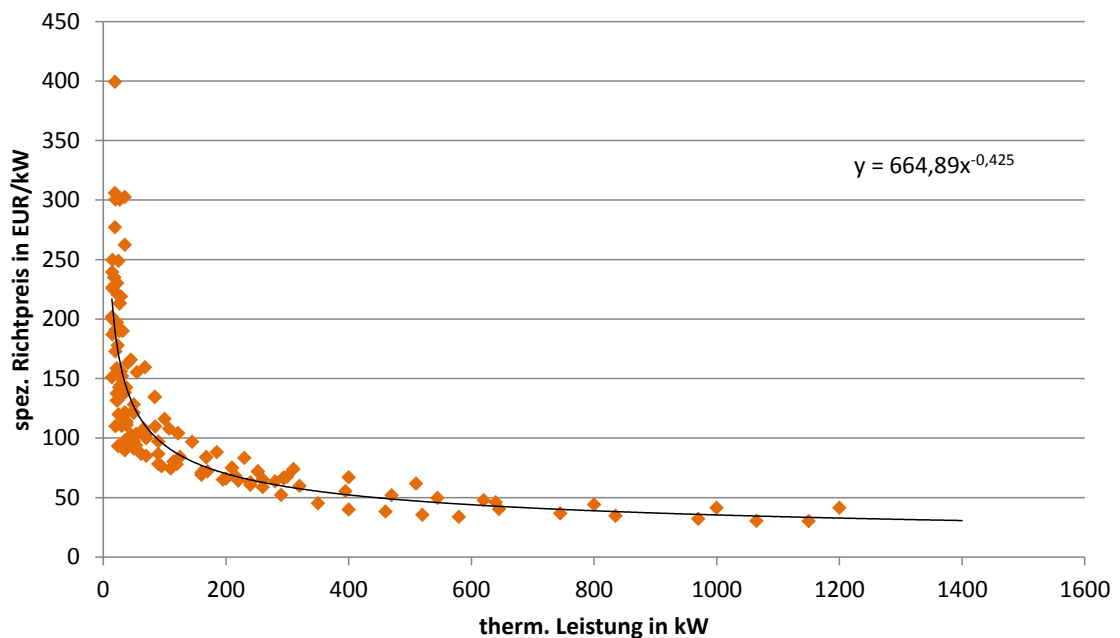


Abbildung 86: spez. Netto-Richtpreis für Gas- und Ölbrennwertkessel (Datenbasis: [58], [281], [283], [286])

## Solarkollektoren

<b>Technische Daten nach heutigem Stand</b>	
	Heute
<b>Flachkollektoren</b>	
Stadium	seit 20 – 30 Jahren, etabliert
Energieträger	Sonne
Wirkungsgrad (nach EN 12975)	76,5 – 84 % [287][288]
Lebensdauer	20 – 30 Jahre [289]
Nennwärmeleistung (abhängig von Fläche)	um 1,5 kW [287][290]
Einsatzbereiche	Modular erweitern bis 12 Module in Reihe [288]
<b>Röhrenkollektoren</b>	
Stadium	seit 20 Jahren, etabliert
Energieträger	Sonne
Wirkungsgrad	64 – 82 % [291]
Lebensdauer	25 – 30 Jahre [289]
Nennwärmeleistung (abhängig von Fläche)	0,5 – 3,0 kW [292]
Einsatzbereiche	Modular erweiterbar

## Holzpelletkessel

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Stadium	seit 40 Jahren bekannt [67] seit 20 Jahren etabliert [67]
Energieträger	Holz, Pellets aus Sägemehl
Wirkungsgrad	85 – 95 % [65][57] ≤ 106 % [66]
Lebensdauer	10 – 20 Jahre [67][293]
Leistungsbereich	Pelletöfen 5 – 30 kW [65][75][1][66] Pelletzentralheizung 3,9 – 300 kW [66] Pelletfeuerung 300 – 5.000 kW [67][66]
Einsatzbereiche	EFH, MFH 3,9 – 30 kW [65] GHD, Fernwärme ≤ 5.000 kW [64]

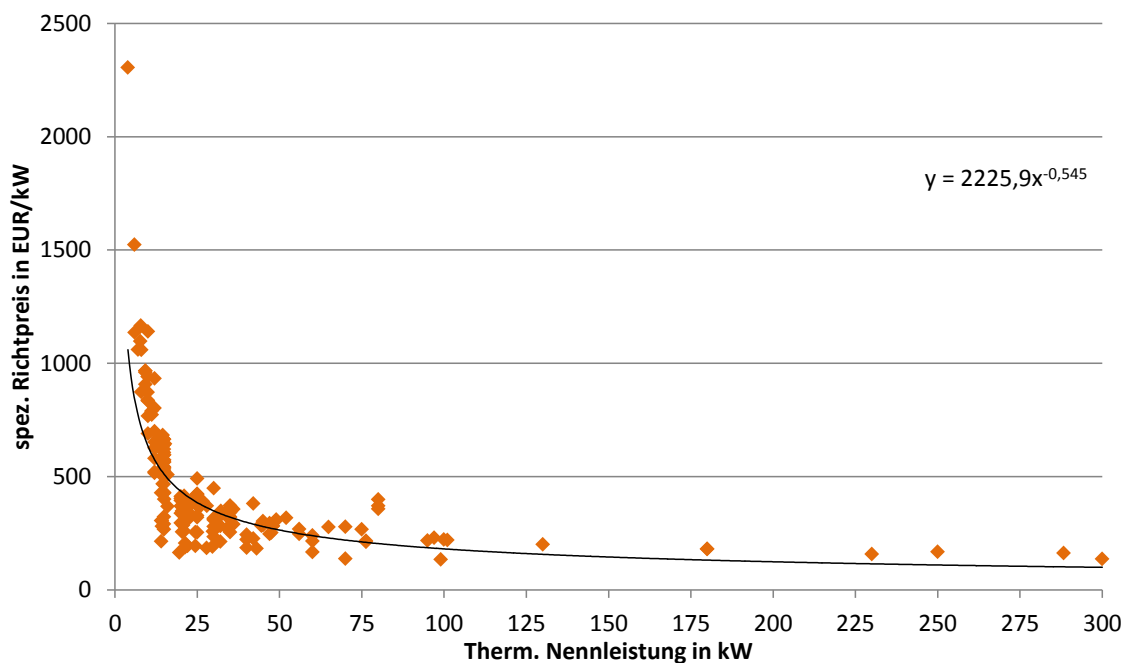


Abbildung 87: spez. Netto-Richtpreis für Holzpellet-Zentralheizungen [66]

## Holz hackschnitzelkessel

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Stadium	seit 25 Jahren etabliert [294][295]
Energieträger	Hackschnitzel, Holzartige Biomasse Pellets, Späne, Industrierestholz [67]
Wirkungsgrad	
- Ohne Brennwertnutzung	78 – 95 % [65][64]
- Mit Brennwertnutzung	≤ 104 % [72]
Lebensdauer	10 – 20 Jahre [67]
Leistungsbereich	10 – 2.000 kW [67][57][69][71]
Einsatzbereich	EFH, MFH 10 – 30 kW [67][57][69] GHD 25 – 400 kW [67][57][69] Industrie, Fernwärme ≤ 2.000 kW [67][57][69]

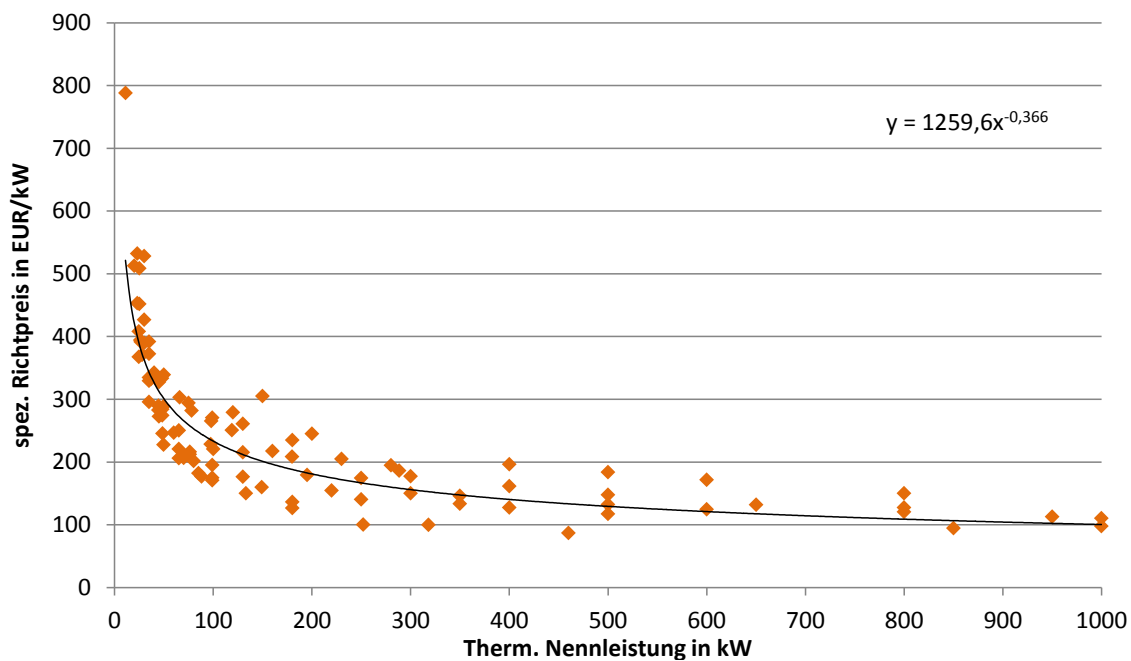


Abbildung 88: spezifische Netto-Richtpreise für Hackschnitzelkessel [69]



## Scheitholzessel

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Stadium	seit 35 Jahren etabliert [72]
Energieträger	Holz, Scheitholz, Grobhackgut [72]
Wirkungsgrad	75 – 90 % [57][65]
Lebensdauer	10 – 20 Jahre [67]
Leistungsbereich	5 – 200 kW [65][75]
Einsatzbereich	EFH, MFH 5 – 30 kW GHD ≤ 200 kW

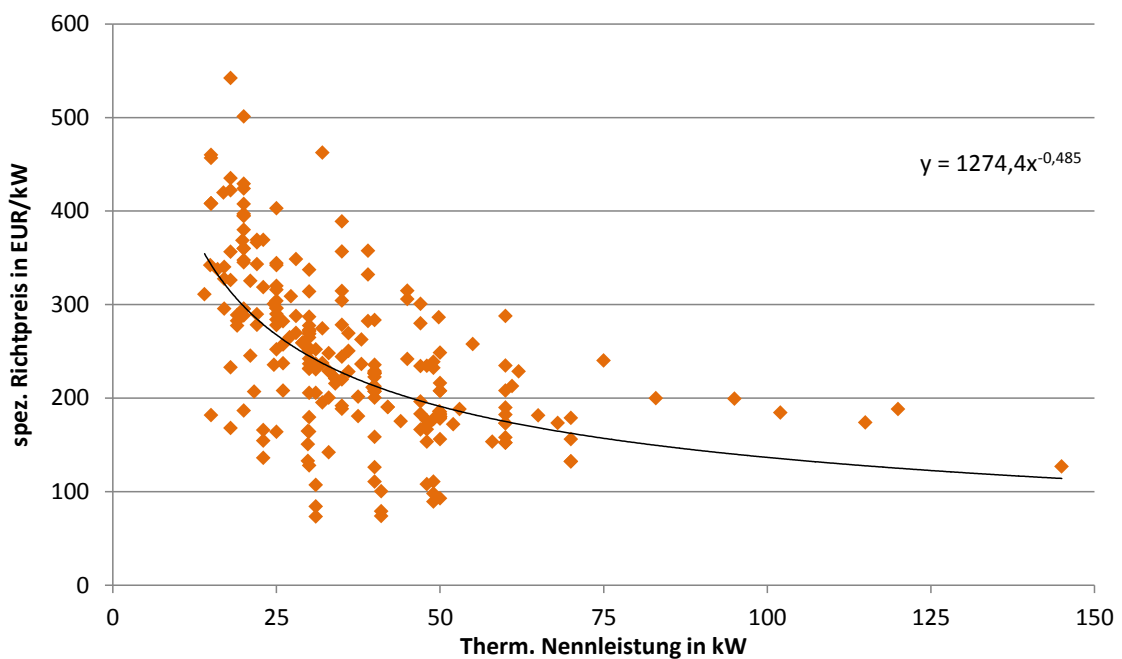


Abbildung 89: spez. Netto-Richtpreis für Scheitholzessel-Zentralheizungen [75]

## Wärmepumpen

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
<b>Elektrowärmepumpe</b>	
Stadium	seit 30 Jahren, etabliert [296]
Energieträger	Strom und Umgebungswärme
Lebensdauer	20 - 25 Jahre [296]
Leistungsbereich	1,6 - 2000 kW [297]
Einsatzbereiche	EFH 1,6 – 63,6 kW [298][299] MFH Bis 117,8 kW [300] GHD Bis 117,8 kW [300]
<b>Gaswärmepumpe</b>	
Stadium	seit < 10 Jahren [296]
Energieträger	Gas und Umgebungswärme
Gesamtnutzungsgrad	115% – 141% [301][302]
Lebensdauer	20 Jahre [296]
Leistungsbereich	1,5 – 15,1 kW [301][108]
Einsatzbereiche	EFH: bis 15,1 kW [301] [302]

Kosten nach heutigem Stand	
<b>Elektrowärmepumpen*</b>	
Sole/Wasser (Sonde)	15.000EUR – 20.000EUR [303], [304]
Sole/Wasser (Kollektor)	11.500EUR – 15.000EUR [303], [304]
Wasser/Wasser	17.000EUR – 19.000EUR [303], [304]
Luft/Wasser	13.000EUR – 16.000EUR [303], [304]
Luft/Luft	7.000EUR – 11.000EUR [303], [304]
<b>Gaswärmepumpe</b>	11.500EUR – 15.500EUR [305], [306]

\* Kosten für komplette Anlage inklusive Bohrung/Installation und Technik.

## Stromheizungen

Technische Daten nach heutigem Stand		
	Heute	Prognose
<b>Nachtspeicherheizung</b>		
Stadium	Prinzip seit über 150 bekannt seit 120 Jahren verfügbar [307]	zurückgehender Markt, keine Perspektive [80]
Energieträger	Strom	
Jahresarbeitszahl	0,97 [61]	
Lebensdauer	20 - 35 Jahre [308][309]	
Leistungsbereich	1,2 - 7,0 kW	
Einsatzbereiche	EFH, MFH: Einzelraumheizung	
<b>Heizpatrone</b>		
Stadium	Prinzip seit über 150 bekannt seit 90 Jahren verfügbar [307]	Potenzial als „power-to-heat“-Technologie
Energieträger	Strom	
Wirkungsgrad	100 %	
Lebensdauer	≥ 25 Jahre	
Leistungsbereich	0,2 - 50.000 kW [310]	
Einsatzbereiche	EFH, MFH: 0,2 - 20 kW GHD, Industrie: ≤ 50.000 kW	

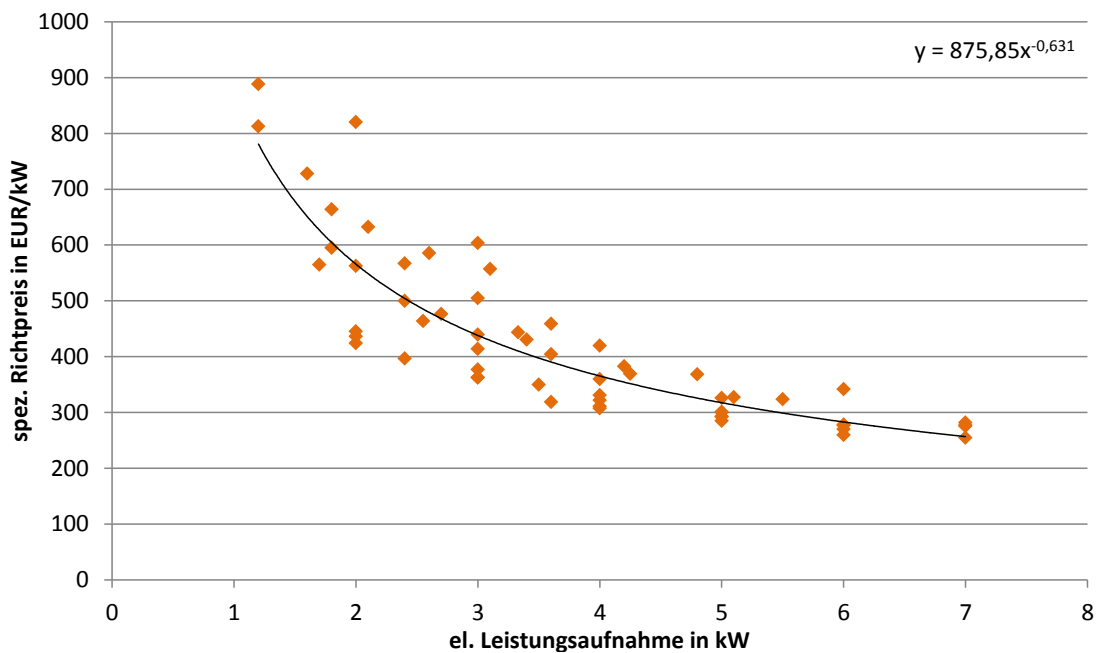


Abbildung 90: spez. Netto-Richtpreis für Nachtspeicherheizungen (Datenbasis: [311]–[315])

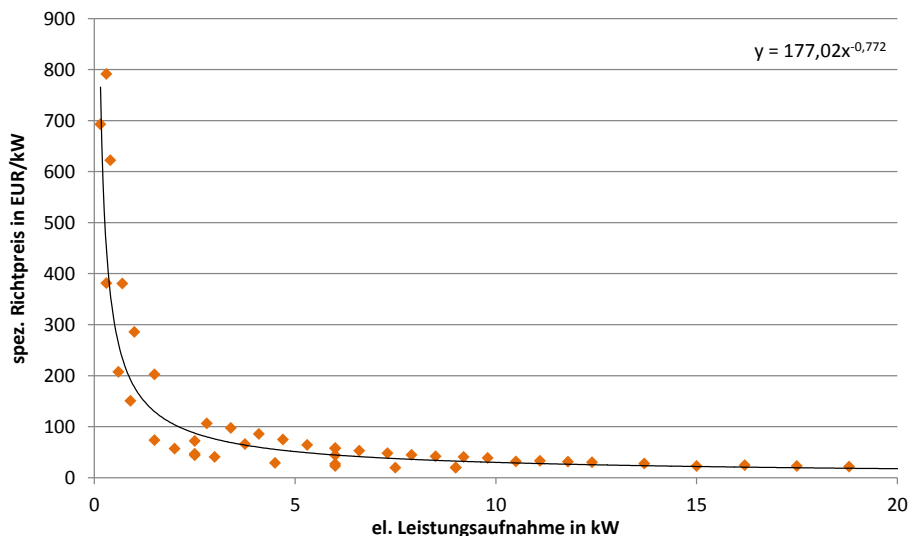


Abbildung 91: spez. Netto-Richtpreis für Heizpatronen (Datenbasis: [316]–[320])

## A3 Tabellen: Thermischer Speichersysteme

### Sensible Speicher

Technische Daten nach heutigem Stand	
	Heute
Größen	variabel
Wärmekapazität (Wasser)	4,182 kJ/kg*K [94]
Energiedichte	60 kWh/m <sup>3</sup> [106]
Bandbreite Arbeitstemperatur	5 ... 95°C
Wärmeverlustrate (DIN EN 12977-3)	1,7 W/K – 5,1 W/K [89]
Bereitschaftsenergieverbrauch (DIN 4753-8)	1,19 - 6,25 kWh/24h [90], [91]
Lade-/Aufheizzeit	variabel
Wärmeleitfähigkeit Wasser	0,644 W/(m*K) bei 60°C [321]
Wärmeleitfähigkeit Dämmmaterialien:	
Polyurethan Hartschaum	0,024 - 0,035 W/(m*K) [88]
Polyurethan Weichschaum	0,039 - 0,040 W/(m*K) [323]
Melaminharzschaumstoff	0,035 W/(m*K) [324]
Expandiertes Polystyrol (EPS)	0,032 - 0,040 W/(m*K) [88]
Polyesterfaservlies	0,034 - 0,041 W/(m*K) [88]
th. Leistungsaufnahme- /-abgabevermögen	variabel
Wirkungsgrad	variabel
Nutzungsgrad	variabel

### Latentwärmespeicher

Technische Daten nach heutigem Stand		
	Heute	Prognose
Größen	variabel	
Latente Wärmekapazität:		
Paraffine	100 -130 kJ/kg [325]	
Salzhydrate	160 – 200 kJ/kg [325]	
Energiedichte	50 – 150 kWh/m <sup>3</sup> [104][106]	
Bandbreite Arbeitstemperatur:		
Salz-Wasser-Lösungen	< 0°C [103]	130 – 330°C
Paraffine	5 - 130°C [103]	[103]
Salzhydrate	> 130°C [103]	
Wärmeverlustrate	variabel	
Bereitschaftsenergieverbrauch	variabel	
Lade-/Aufheizzeit	variabel	
Wärmeleitfähigkeit:		
Paraffin	ca. 0,2 W/(m*K) [325]	
Salzhydrate	0,6 – 0,8 W/(m*K) [325]	
Wärmeleitfähigkeit Dämmung:		
Polyurethan Hartschaum	0,024 - 0,035 W/(m*K) [88]	
Polyurethan Weichschaum	0,039 - 0,040 W/(m*K) [88]	
Melaminharzschaumstoff	0,035 W/(m*K) [324]	
Expandiertes Polystyrol (EPS)	0,032 - 0,040 W/(m*K) [88]	
Polyesterfaservlies	0,034 - 0,041 W/(m*K) [88]	
th. Leistungsaufnahme- /-abgabevermögen	variabel	
Wirkungsgrad	variabel	
Nutzungsgrad	variabel	

**Thermochemische Speicher**

<b>Technische Daten nach heutigem Stand</b>	
	Heute
Größe	variabel
Spezifische Wärmekapazität:	
Zeolithe	0,80 – 0,90 kJ/kg*K [326]
Silicagele	0,92 – 1,00 kJ/kg*K [326]
Energiedichte	100 – 500 kWh/m <sup>3</sup> [106][104]
Schüttdichte:	
Zeolithe	700 – 750 kg/m <sup>3</sup> [326]
Silicagele	450 – 750 kg/m <sup>3</sup> [326]
Arbeitstemperaturen:	
Metallhydride	280 – 500°C [106][327]
Zeolithe	100 – 300°C [106][327]
Silicagele	40 – 100°C [106][327]
Wärmeverlustrate	variabel
Bereitschaftsenergieverbrauch	variabel
Lade-/Aufheizzeit	variabel
Wärmeleitfähigkeit:	
Zeolithe	0,58 W/(m*K) [326]
Silicagele	0,14 – 0,20 W/(m*K) [326]
Wärmeleitfähigkeit Dämmung:	für < 100°C
Polyurethan Hartschaum	0,024 - 0,035 W/(m*K) [88]
Polyurethan Weichschaum	0,039 - 0,040 W/(m*K) [88]
Melaminharzschaumstoff	0,035 W/(m*K) [322]
Expandiertes Polystyrol (EPS)	0,032 - 0,040 W/(m*K) [88]
Polyesterfaservlies	0,034 - 0,041 W/(m*K) [88]
th. Leistungsaufnahme- /-abgabevermögen	variabel
Wirkungsgrad	variabel
Nutzungsgrad	variabel

## A4 Tabellen: Elektrische Speichersysteme

### Blei-Säure Batterien

<b>Technische Daten aus [1], wenn nicht anders gekennzeichnet</b>		
	Heute	Prognose
Gesamtwirkungsgrad inkl. Umrichter	70 bis 75 %	73 bis 78 %
Leistung	als Akkusystem bis zu 17 MW [2]	
Stromspeicherkapazität	1 kWh bis 40 MWh [2]	
Energiedichte (Zelle)	50 Wh/l bis 100 Wh/l	50 Wh/l bis 130 Wh/l
Leistungsdichte (Zelle)	10 W/l bis 500 W/l	10 W/l bis 1000 W/l
Zykluslebensdauer	500 bis 2000	1500 bis 5000
Kalendarische Lebensdauer	5 bis 15 Jahre (abhängig von Temp. und Ladezustand, SOC)	10 bis 20 Jahre (abhängig von Temp. und Ladezu- stand, SOC)
Entladezeit	1 Stunde bis mehrere Tage [2]	
Entladetiefe	70 %	80 %
Selbstentladung	0,1 bis 0,4 %/Tag	0,05 bis 0,2 %/Tag
Leistungsinstandkosten (Um- richter)	150 EUR/kW bis 200 EUR/kW	35 EUR/kW bis 65 EUR/kW
Energieinstandkosten	100 EUR/kWh bis 250 EUR/kWh	50 EUR/kWh bis 80 EUR/kWh
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	
Lokale Voraussetzungen	Ventilation aufgrund von Gasbildung	
Hauptanwendungen	Starterbatterie, Frequenzregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Inselnetze, PV-Speichersysteme, unterbre- chungsfreie Stromversorgung (USV)	

## Lithium-Ionen Batterien

<b>Technische Daten aus [1], wenn nicht anders gekennzeichnet</b>		
	Heute	Prognose
Gesamtwirkungsgrad inkl. Umrichter	80 -85 %	85 – 90 %
Leistung	ab 1 kW bis mehrere MW [2]	ab 1 kW bis mehrere MW [2]
Stromspeicherkapazität	bis 50 kWh (Elektromobilität) [2]	
Energiedichte (Zelle)	200 Wh/l bis 350 Wh/l	250 Wh/l bis 550 Wh/l
Leistungsdichte (Zelle)	100 W/l bis 3500 W/l	100 W/l bis 5000 W/l
Zyklenlebensdauer (Vollzyklen)	1000 bis 5000	3000 bis 10000
Kalendarische Lebensdauer	5 bis 20 Jahre (abhängig von Temp. und Ladezustand, SOC)	10 bis 30 Jahre (abhängig von Temp. und Ladezustand, SOC)
Entladezeit	1 Stunde bis mehrere Tage [2]	1 Stunde bis mehrere Tage [2]
Entladetiefe	bis zu 100 %	bis zu 100 %
Selbstentladung	5 % pro Monat	1% pro Monat
Leistungsinstallationskosten (Umrichter)	150 EUR/kW bis 200 EUR/kW	35 EUR/kW bis 65 EUR/kW
Energieinstallationskosten	300 EUR/kWh bis 800 EUR/kWh	150 EUR/kWh bis 300 EUR/kWh
Reaktionszeit	3ms bis 5 ms	
Lokale Voraussetzungen	keine	
Hauptanwendungen	Frequenzregelung, Spannungsregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Elektromobilität, PV-Speichersysteme	



## Hochtemperatur-Batterien

Technische Daten aus [1]		
	Heute	Prognose
Gesamtwirkungsgrad inkl. Umrichter	68 bis 75 %	78 bis 83 %
Leistung		
Stromspeicherkapazität		
Energiedichte (Zelle)	150 Wh/l bis 250 Wh/l	nicht verfügbar
Leistungsdichte (Zelle)	nicht verfügbar	nicht verfügbar
Zykluslebensdauer	5000 bis 10000	5000 bis 10000
Kalendarische Lebensdauer	15 bis 20 Jahre	20 bis 30 Jahre
Entladezeit		
Entladetiefe	100 %	
Selbstentladung	10 % pro Tag (bei kleinen, nur in Bereitschaft stehenden Systemen)	nicht verfügbar
Leistungsinstallationskosten (Umrichter)	150 EUR/kW bis 200 EUR/kW	35 EUR/kW
Energieinstallationskosten	500 EUR/kWh bis 700 EUR/kWh	80 EUR/kWh bis 150 EUR/kWh
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	
Lokale Voraussetzungen	keine	
Hauptanwendungen	Frequenzregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Inselnetze, Elektromobilität (Zebra, Zero Emission Battery Research Activities [2]), Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)	

## Redox-Flow-Batterien

Technische Daten aus [1], wenn nicht anders gekennzeichnet		
	Heute	Prognose
Gesamtwirkungsgrad inkl. Umrichter	70-80%	75-85 %
Leistung	30kW bis 10 MW [2]	
Stromspeicherkapazität	bis 5 MWh [2]	bis 120 MWh [2]
Energiedichte (Zelle)	20Wh/l bis 70 Wh/l	>100 Wh/l
Leistungsdichte (Zelle)		
Zykluslebensdauer	>10 000	>10 000
Kalendarische Lebensdauer	10 bis 15 Jahre	15 bis 25 Jahre
Entladezeit	1,5s bis 10 Stunden [4]	
Entladetiefe	100 %	100 %
Selbstentladung		
Leistungsinstallationskosten (Umrichter)	1000EUR/kW bis 1500EUR/kW	600 EUR/kW bis 1000EUR/kW
Energieinstallationskosten	300 EUR/kWh bis 500 EUR/kWh	70 bis 150 EUR/ kWh
Reaktionszeit	Sekunden	
Lokale Voraussetzungen		
Hauptanwendungen	sekundäre und tertiäre Frequenzregelung, Langzeitspeicher, Inselnetze	

## A5 Branchenabhängige Endenergieverbrauchsentwicklungen

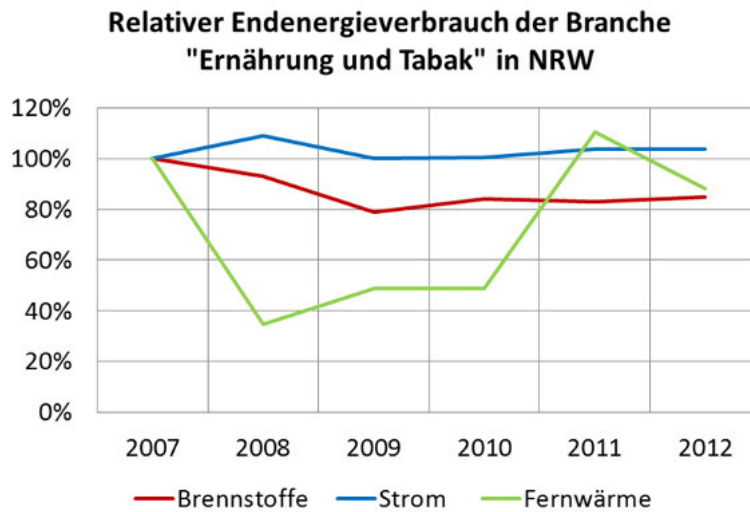


Abbildung 92: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Ernährung und Tabak“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

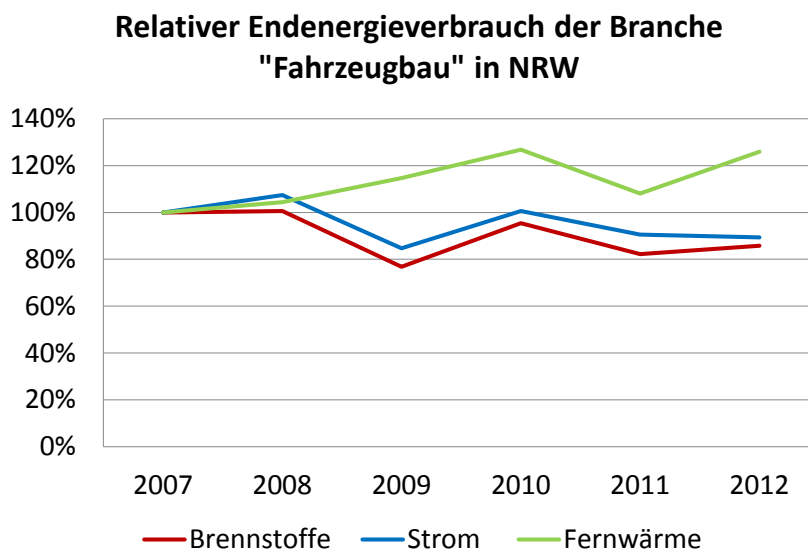


Abbildung 93: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Fahrzeugbau“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Glas u. Keramik" in NRW

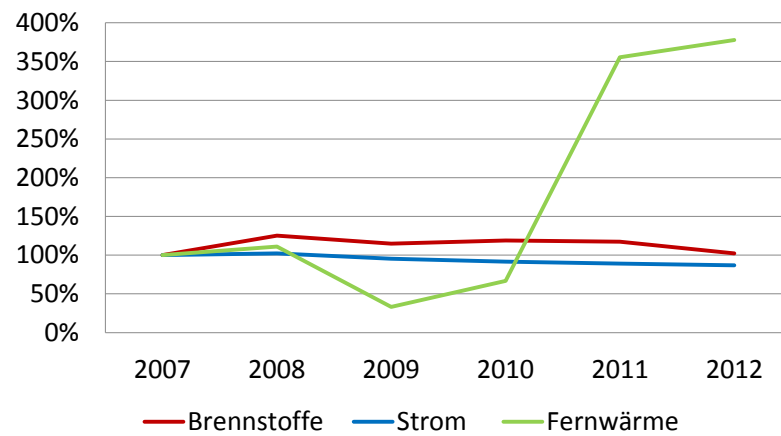


Abbildung 94: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Glas und Keramik“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Grundstoffchemie" in NRW

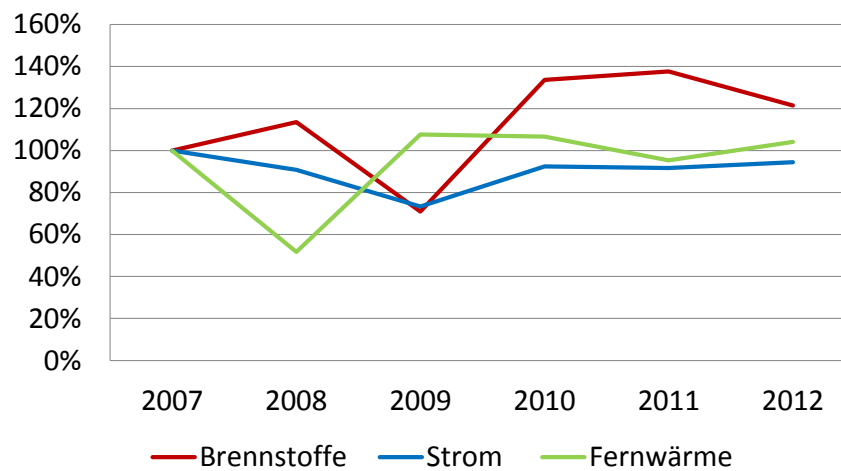


Abbildung 95: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Grundstoffchemie“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

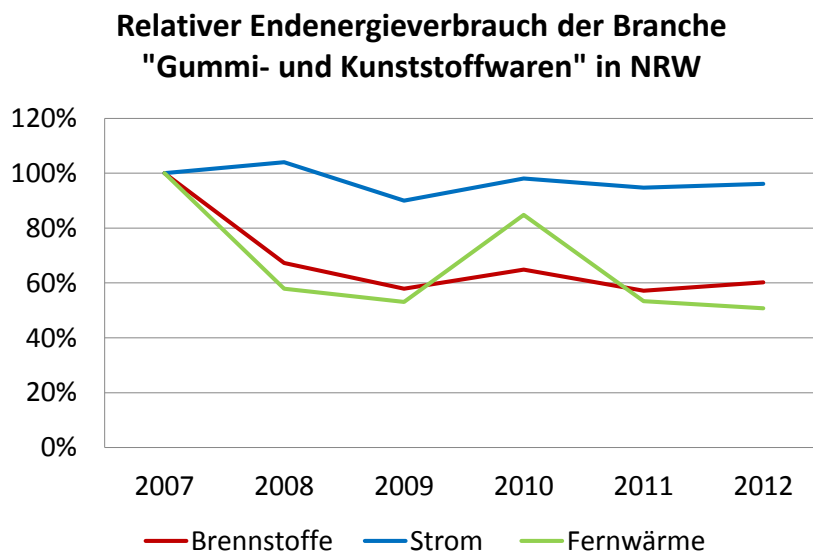


Abbildung 96: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Gummi- und Kunststoffwaren“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

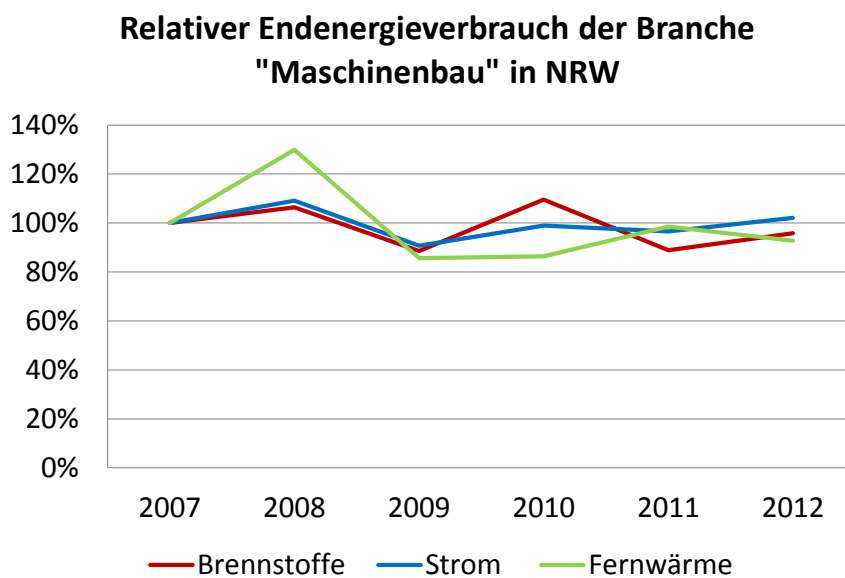


Abbildung 97: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Maschinenbau“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Metallbearbeitung" in NRW

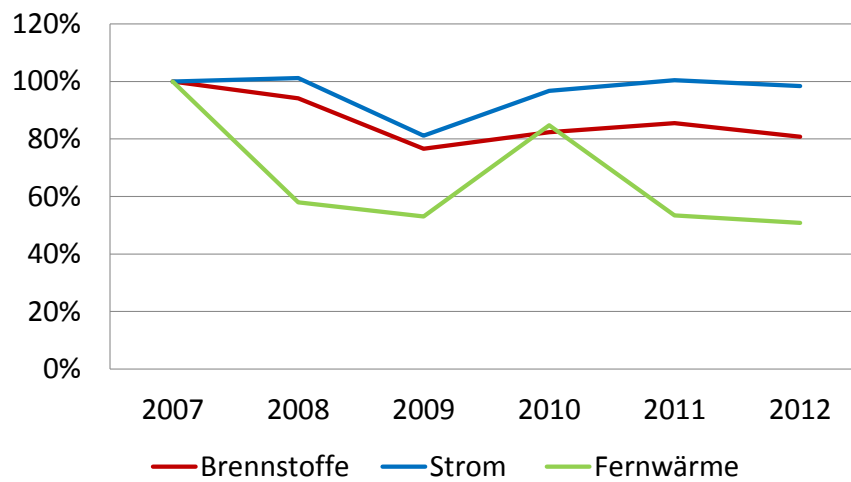


Abbildung 98: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Metallbearbeitung“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Metallerzeugung" in NRW

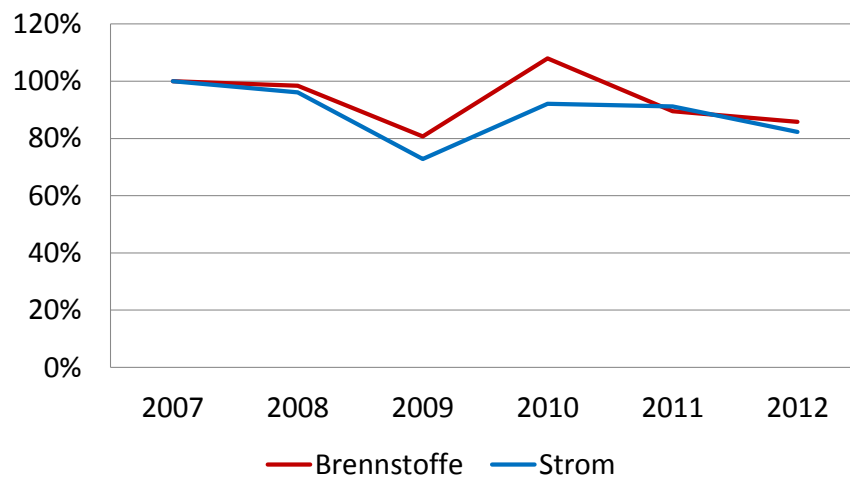


Abbildung 99: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Metallerzeugung“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

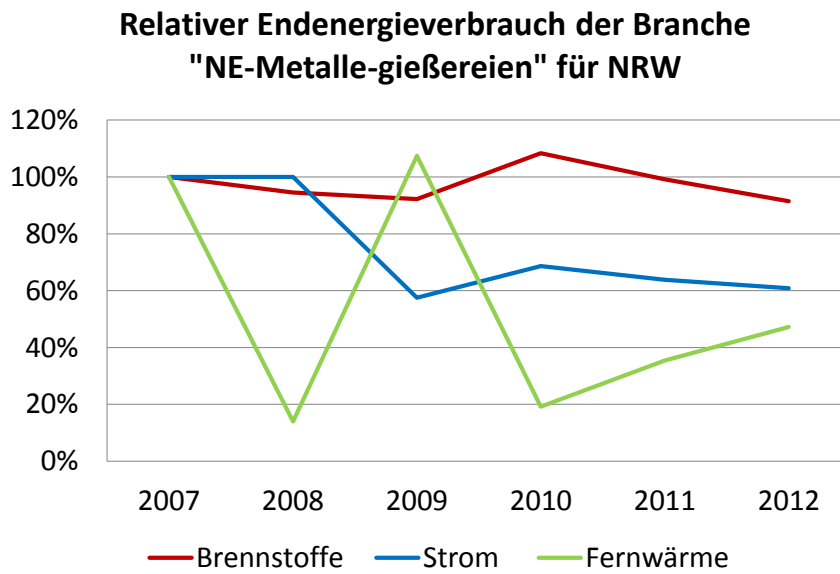


Abbildung 100: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „NE-Metalle-gießereien“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

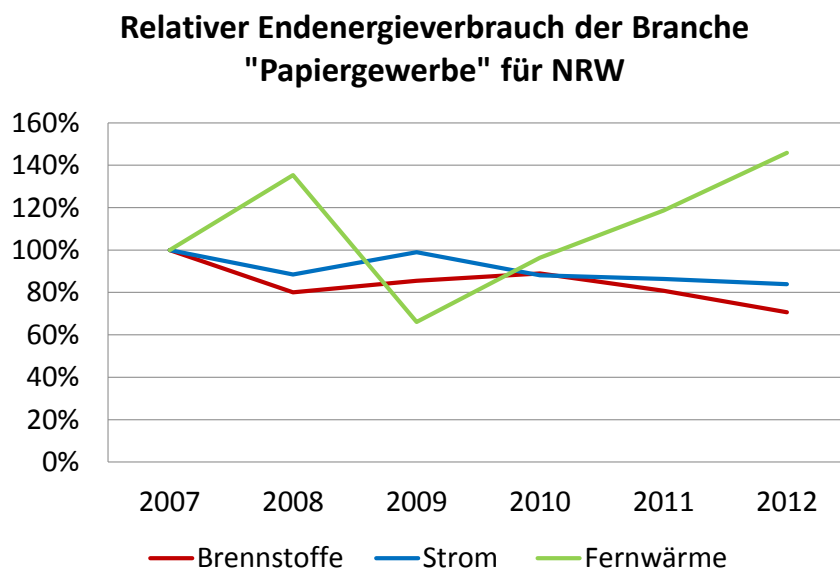


Abbildung 101: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Papiergewerbe“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Sonstige chemische Industrie" für NRW

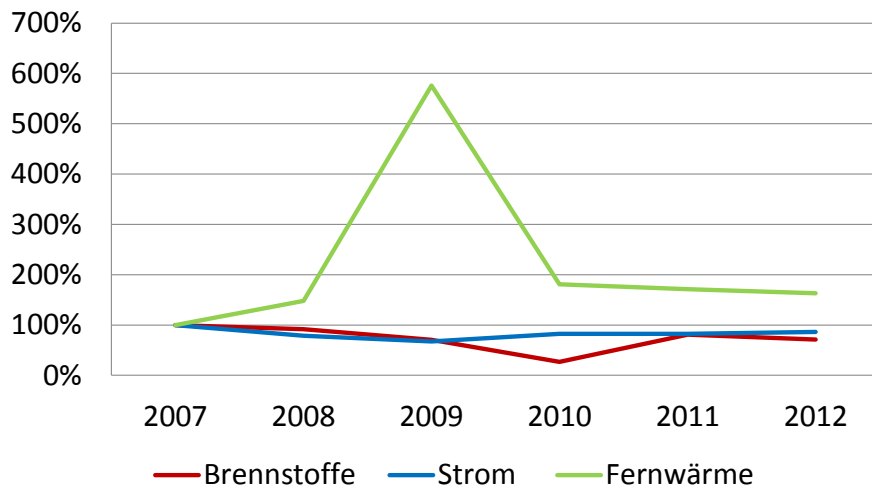


Abbildung 102: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Sonstige chemische Industrie“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

### Relativer Endenergieverbrauch der Branche "Verarbeitung v. Steinen u. Erden" für NRW

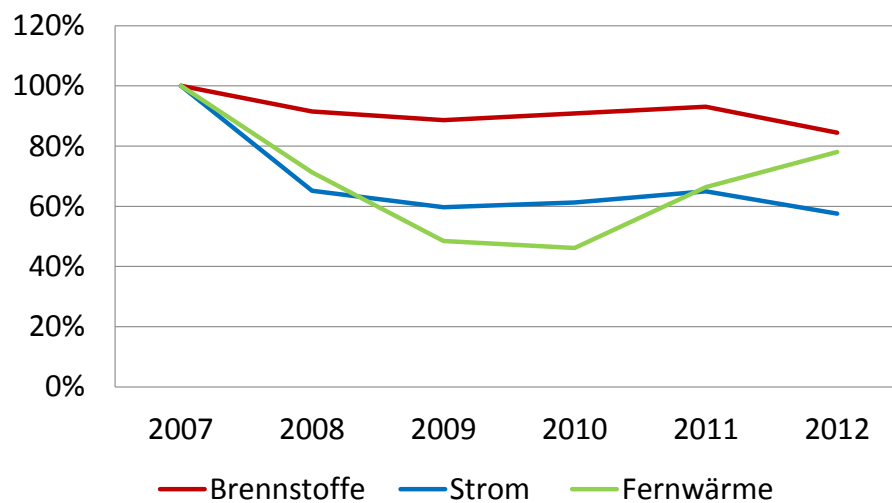


Abbildung 103: Verlauf des Endenergieverbrauchs der Branche „Verarbeitung v. Steinen u. Erden“ in NRW von 2007 – 2012 in [%], Quelle: IT NRW Statistik 2007-2012; eigene Rechnungen

## A6 Lastgänge und Jahresdauerlinien der Objektanalyse

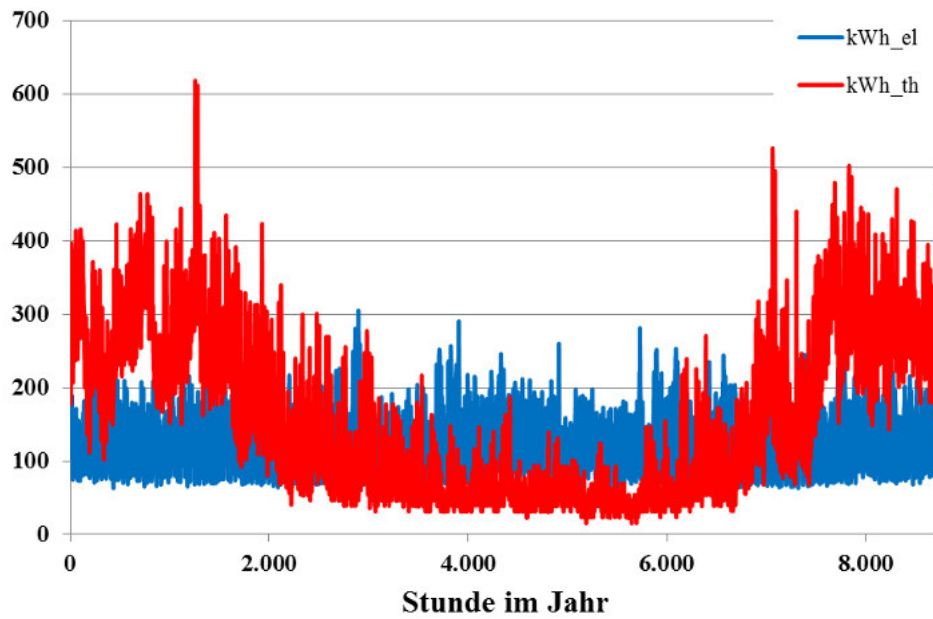


Abbildung 104: Lastgänge „Hotel“

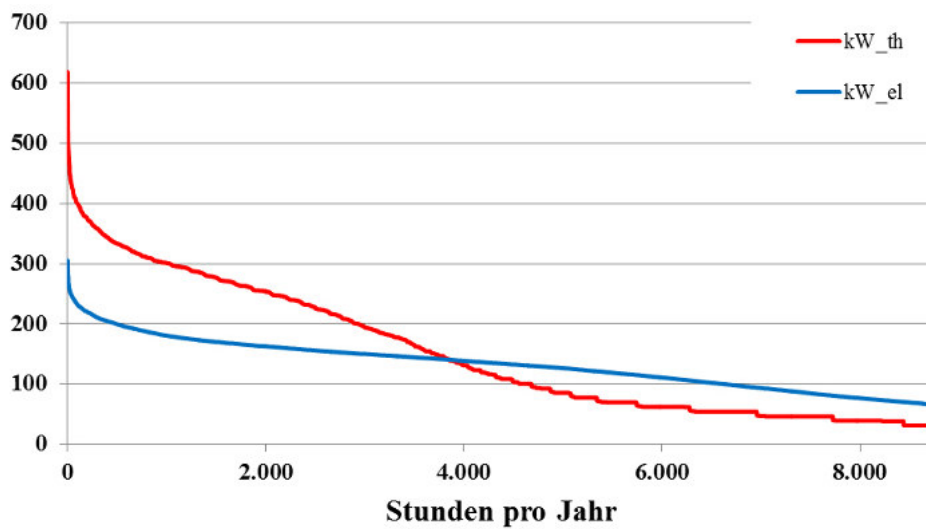


Abbildung 105: Jahresdauerlinien „Hotel“



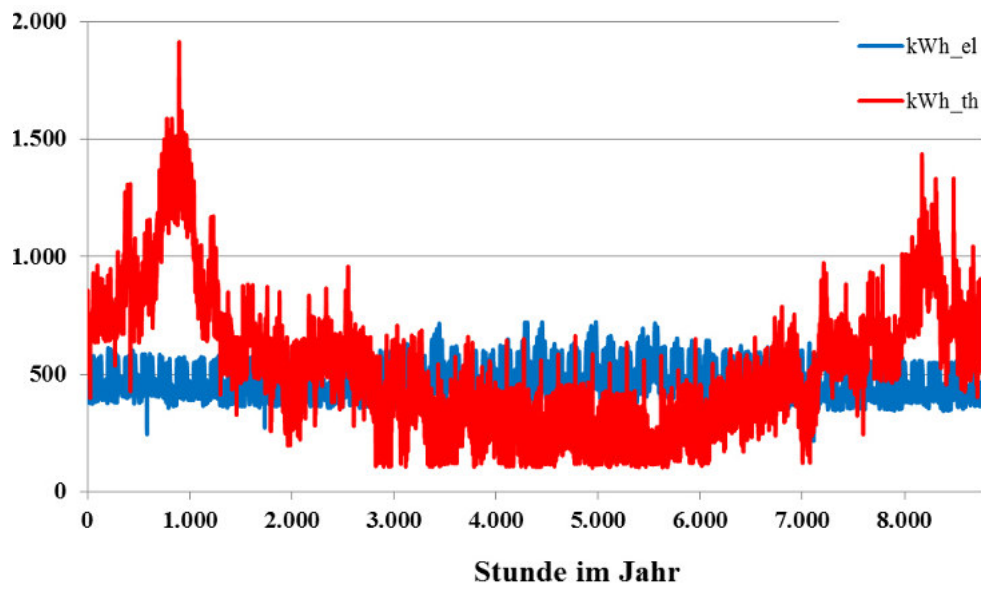


Abbildung 106: Lastgänge „kleines Krankenhaus“

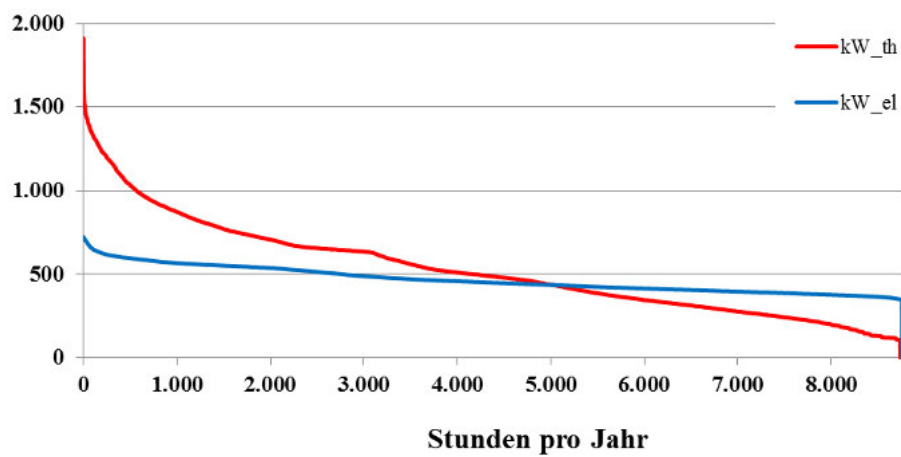


Abbildung 107: Jahresdauerlinien „kleines Krankenhaus“

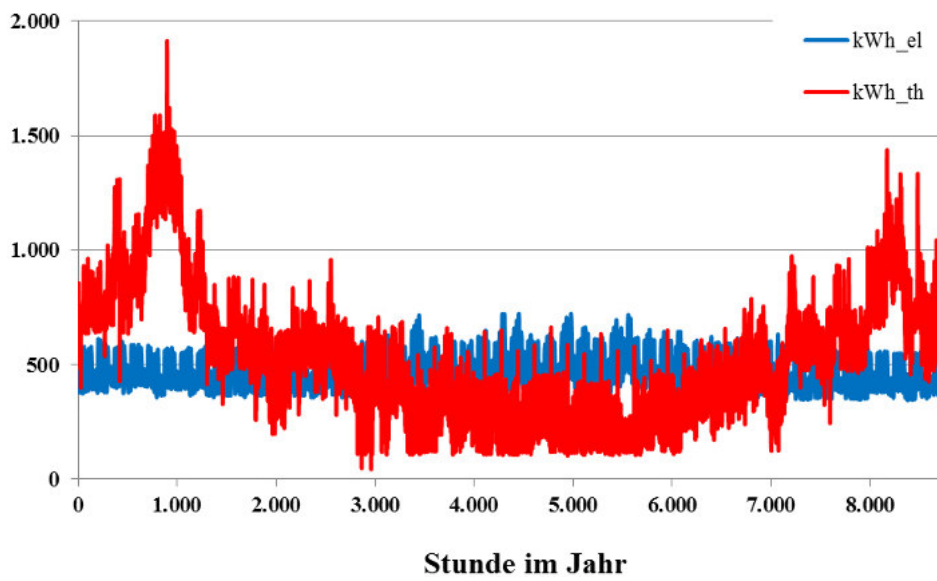


Abbildung 108: Lastgänge „großes Krankenhaus“

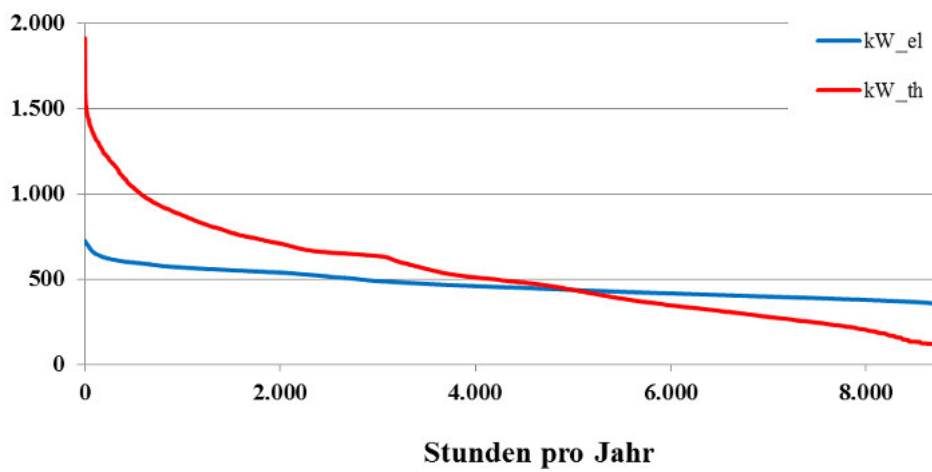
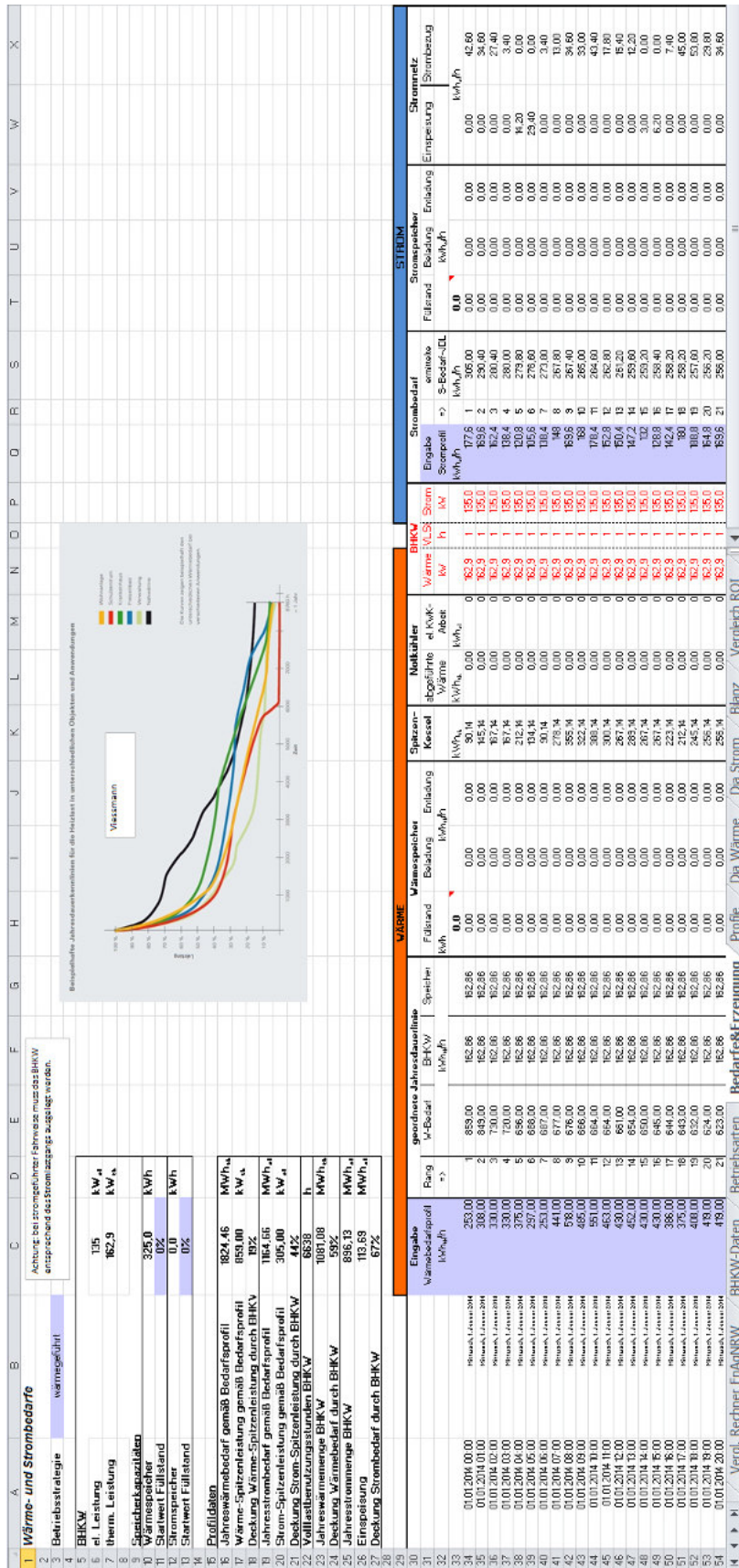


Abbildung 109: Jahresdauerlinien „großes Krankenhaus“

# A7 Excel-Tool für Objektanalyse

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		BHKW f.unk.e. SENERGIE GmbH NG 135									
2		W-Speicher									
3		S-Speicher									
4		Betriebsweise wärmegeführt									
5		Tag der Inbetriebnahme: 01.01.2015									
6		Kennzahlen									
7		Kapitalwert									
8		1.110.787,56									
9		Interne Verzinsung									
10		593,36%									
11		Kalkulationszinssatz (din. Anmor.)									
12		10%									
13		Umsatzrendite									
14		36,52%									
15		Stromgestehungskosten									
16		8,27 ct/kWh									
17		Eingabe technische Daten BHKW und Speicher									
18		Berechnete Betriebsdaten									
19		Berechnete Betriebsdaten									
20		Wärme BHKW									
21		1.081.081 kWh									
22		Gasinsatz BHKW									
23		2.201.794 kWh									
24		Gasinsatz Referenzkessel									
25		1.271.860 kWh									
26		Gasinsatz Spitzenkessel									
27		874.559 kWh									
28		Eingabe Kalkulationsdaten									
29		Kalkulationszinssatz									
30		3,35%									
31		Abschreibungsdauer (Jahre)									
32		10									
33		Strompreis (Grundpreis)									
34		464,20 EUR/a									
35		Strompreis (Arbeitspreis)									
36		23,300 ct/kWh									
37		Gaspreis (Grundpreis)									
38		1049,35 EUR/a									
39		Gaspreis (Arbeitspreis)									
40		5,400 ct/kWh									
41		EnergieSt									
42		0,550 ct/kWh									
43		EEG-Umlage									
44		6,170 ct/kWh									
45		Vermeidene Netzentgelte									
46		0,510 ct/kWh									
47		Üblicher Strompreis									
48		3,270 ct/kWh									
49		Administrative Kosten									
50		0									
51		Versicherungskosten									
52		0									

Abbildung 110: Excel-Tool für Objektanalyse: technische und wirtschaftliche Eingangsparameter



Hinterlegung der Lastgänge für die Berechnung der Volllaststunden

Abbildung 111: Excel-Tool für Objektanalyse: Eingabe Betriebsstrategie sowie Strom- und Wärmebedarfsprofile

## A8 Betriebsstrategien der Objektanalyse

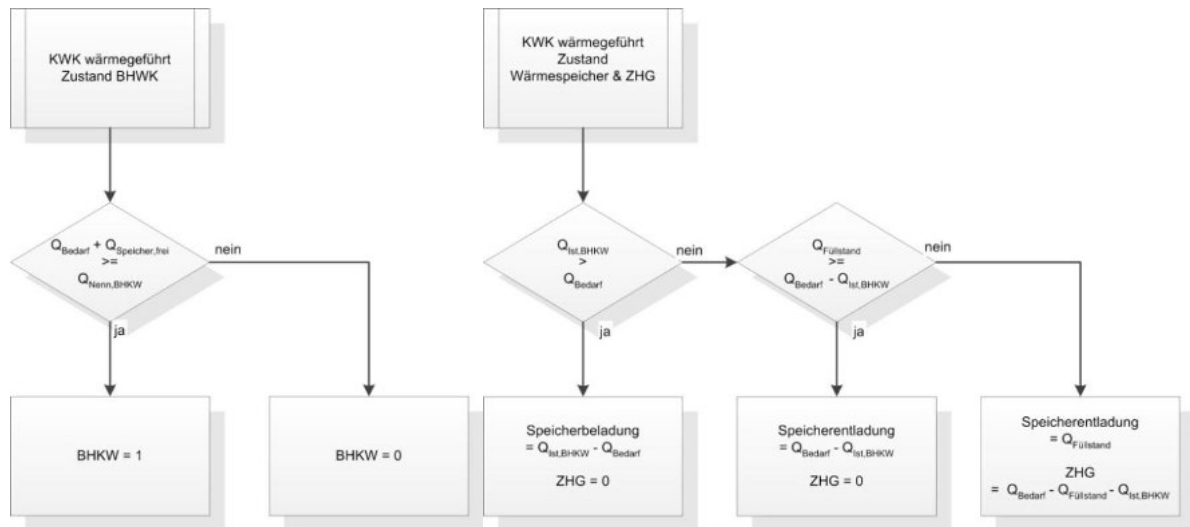


Abbildung 112: Objektanalyse: Betriebsstrategie wärmegeführt

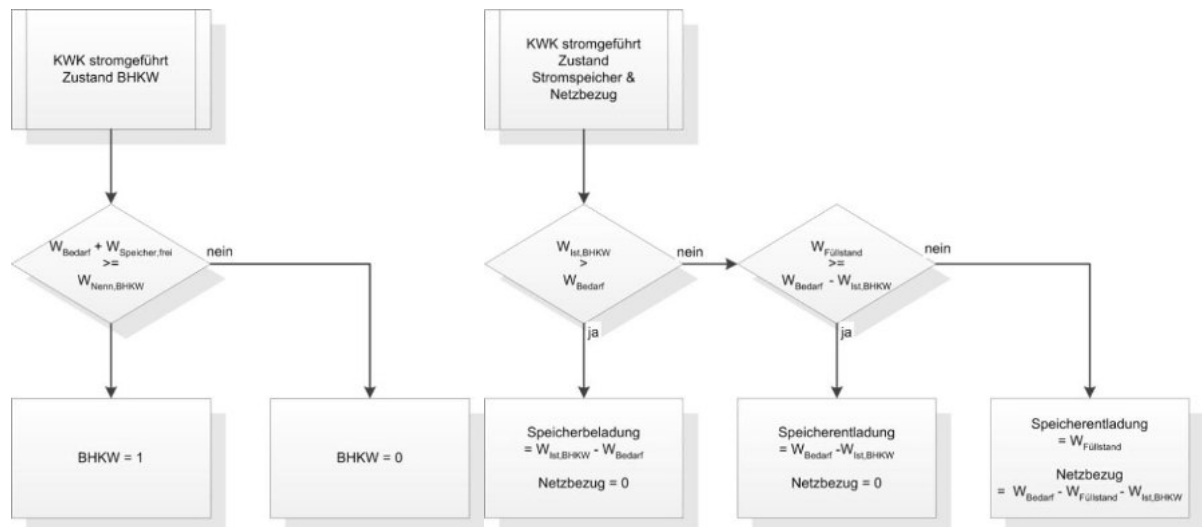


Abbildung 113: Objektanalyse: Betriebsstrategie stromgeführt

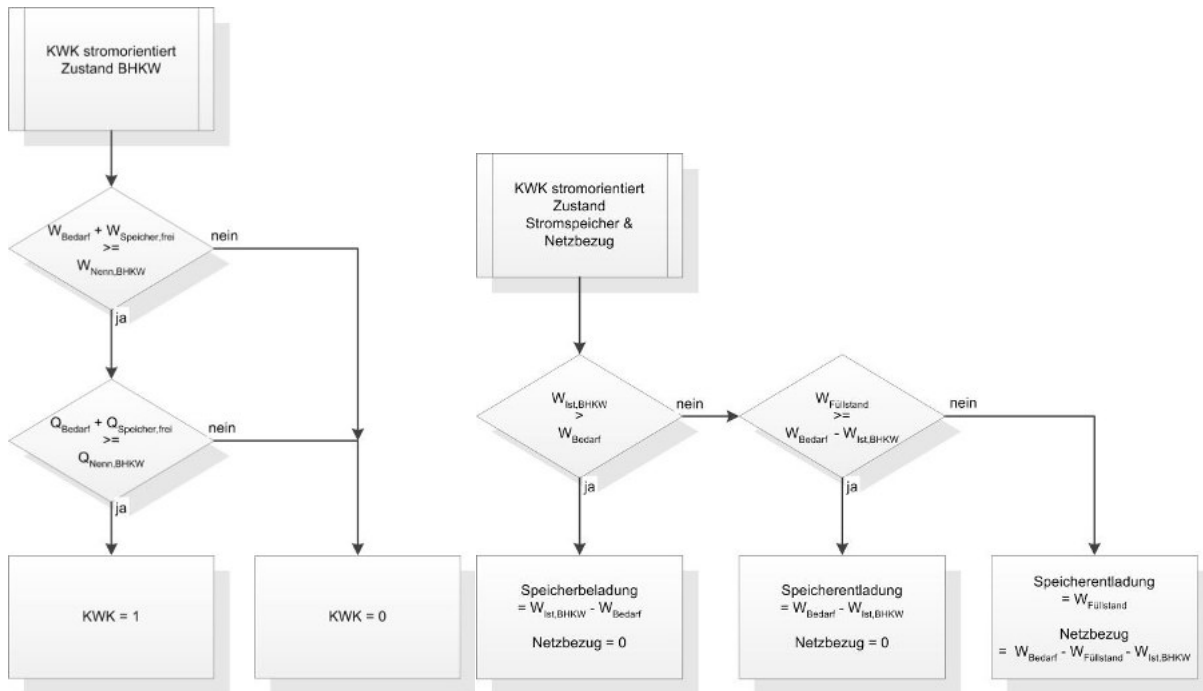


Abbildung 114: Objektanalyse: Betriebsstrategie stromorientiert

$Q_{\text{Bedarf}}$	Wärmebedarf des Objektes für Zeitraum x
$Q_{\text{Füllstand}}$	aktueller Füllstand des Wärmespeichers
$Q_{\text{Speicher,frei}}$	aktuelle freie thermische Speicherkapazität des Wärmespeichers
$Q_{\text{Nenn,BHKW}}$	Nennwärmestrom des BHKW über Zeitraum x
$Q_{\text{Ist,BHKW}}$	Ist-Wärmestrom des BHKW über Zeitraum x ( $Q_{\text{Nenn,BHKW}} \cdot \text{BHKW}$ )
$W_{\text{Bedarf}}$	Strombedarf des Objektes für Zeitraum x
$W_{\text{Füllstand}}$	aktueller Füllstand des Stromspeichers
$W_{\text{Speicher,frei}}$	aktuelle freie elektrische Speicherkapazität des Stromspeichers
$W_{\text{Nenn,BHKW}}$	elektrischer Nennstrom des BHKW über Zeitraum x
$W_{\text{Ist,BHKW}}$	elektrischer Ist-Strom des BHKW über Zeitraum x ( $W_{\text{Nenn,BHKW}} \cdot \text{BHKW}$ )
BHKW	Betriebszustand des BHKW: 1 = an, 0 = aus
ZHG	Betriebszustand des Zusatzheizgerätes: 1 = an, 0 = aus
Netzbezug	Strombezug aus dem elektrischen Stromnetz: 1 = ja, 0 = nein

Abbildung 115: Objektanalysen: Glossar Betriebsstrategien

## A9 Regelungsschema für erweiterte Speicheruntersuchung

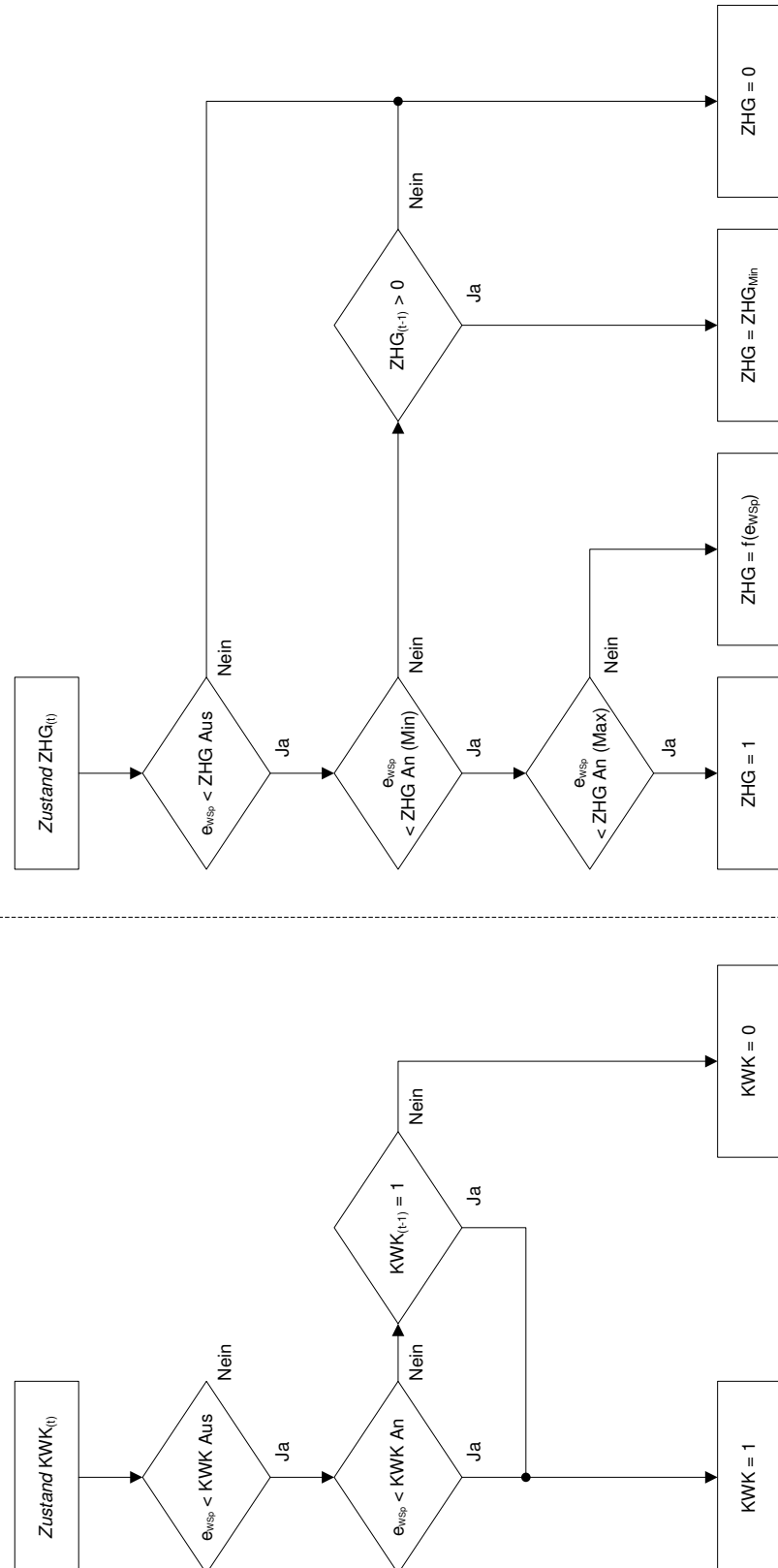


Abbildung 116: Regelungsschema für das KWK-Aggregat (links) und das Zusatzheizgerät (rechts). Die Zustandsanforderung „1“ entspricht der Vollastanforderung des Teilsystems. Das Teilsystem ist ausgeschaltet, sofern die Zustandsanforderung „0“ ist.