

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl (UFOPLAN) *(FKZ 3710 97 114)*

**Klimapolitischer Beitrag kohlenstoffarmer Energieträger
in der dezentralen Stromerzeugung sowie ihre Integration als Beitrag
zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungssysteme
ENDBERICHT**

von

Frank Merten

Christine Krüger

Arjuna Nebel

Dietmar Schüwer

Dr. Stefan Lechtenböhmer

In Kooperation mit: Markus Gailfuß (BHKW-Consult)

Mit Unterstützung durch: Daniel Hilker, Roman Uhlig (Wuppertal Institut)

Wuppertal Institut, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

BHKW-Consult, Raentaler Str. 22/1, 76437 Rastatt

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

Mai 2013

Berichtskennblatt

1. Berichtsnummer	2.	3.
Titel des Berichts Klimapolitischer Beitrag kohlenstoffarmer Energieträger in der dezentralen Stromerzeugung sowie ihre Integration als Beitrag zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungssysteme		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Merten, Frank; Krüger, Christine; Nebel, Arjuna; Schüwer, Dietmar; Lechtenböhmer, Stefan; Gailfuß, Markus; Hilker, Daniel	8. Abschlussdatum 24.05.2013	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH Döppersberg 19 42103 Wuppertal	9. Veröffentlichungsdatum	
	10. UFOPLAN-Nr. FKZ 3710 97 114	
	11. Seitenzahl 191	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 D-06844 Dessau	12. Literaturangaben 77	
	13. Tabellen und Diagramme 39	
	14. Abbildungen 88	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Im Rahmen dieser Untersuchung wird das technische Potenzial bestimmt, das dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zur Bereitstellung von Regelleistung bieten. Dazu wird der Regelleistungsmarkt auf die Teilnahmemöglichkeiten der BHKW in technischer und organisatorischer Hinsicht untersucht und das am besten passende Marktsegment für die weiteren vertiefenden Untersuchungen bestimmt. Das technische Potenzial zur Teilnahme an diesem Regelleistungsmarkt wird mit Hilfe eines eigenen Modells für vier verschiedene Versorgungsbereiche (Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Wärmenetze und Industrie) ermittelt. Dabei wird das reale Marktverhalten des Jahres 2010 für alle betrachteten Jahre 2010, 2020 und 2030 zu Grunde gelegt. Zusätzlich werden verschiedene Flexibilisierungsoptionen (Anlagen- und/oder Speichervergrößerung sowie Notkühler) zur Vergrößerung des Potenzials analysiert und bewertet. Im Anschluss an die Modellierung werden die Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen auf die CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum ungekoppelten Referenzfall und für die verschiedenen Betriebsweisen untersucht. Die Identifikation und Diskussion von einschlägigen Hemmnisse sowie erste Lösungsvorschläge bezogen auf besonders wichtige Hemmnisse schließen die Untersuchung ab.		

17. Schlagwörter KWK, BHKW, dezentral, Regelleistungsmärkte, Minutenreserve, technisches Potenzial, wärmegeführt, netzgeführt, Flexibilisierung, Wärmespeicher, Notkühler, Modellanalyse, CO2-Emissionen, Hemmnisse, Wohngebäude, Nichtwohngebäude,		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No.	2.	3.
Report Title The Climate-Policy Contribution of Low-Carbon Energy Sources in the Distributed Power Generation and its Integration as a Contribution to the Stabilisation of Electrical Supply Systems		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Merten, Frank; Krüger, Christine; Nebel, Arjuna; Schüwer, Dietmar; Lechtenböhmer, Stefan; Gailfuß, Markus; Hilker, Daniel	8. Report Date 24.05.2013	
	9. Publication Date	
	10. UFOPLAN-Ref. No. FKZ 3710 97 114	
	11. No. of Pages 191	
	12. No. of References 77	
6. Performing Organisation (Name, Address) Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy Doeppersberg 19 42103 Wuppertal	13. No. of Tables, Diagrams 39	
	14. No. of Figures 88	
	7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 D-06844 Dessau	
15. Supplementary Note		
16. Abstract This study aims at quantifying the technical potential of decentralised Combined Heat and Power units to provide control power. The first step is an analysis of the control power market in regard to technical and regulatory issues concerning the participation of block-type CHP in this market. Based on that the best suited market segment is chosen for further investigations. A model is used to determine the technical potential of residential, non-residential, heat networks and industrial objects to contribute to this control power market. It is based on real market data from 2010 which are used to describe all target years (2010, 2020, 2030). Additionally, different options to enhance the control power potential such as increased plant size or the heat storage or using an emergency cooler, are investigated and evaluated. The results were analysed in regard to the carbon emissions of the different operation modes in comparison to uncoupled heat production. The study is concluded with the identification and discussion of relevant restraints and first proposals for solution of main obstacles.		

17. Keywords CHP, block-type CHP, decentralised, control power markets, minute reserve, technical potential, heat-controlled, grid-controlled, flexibility, heat storage, emergency cooler, model analysis, CO2-Emissions, obstacles, residential buildings, non-residential buildings		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	21
2	Short summary	27
3	Einführung.....	33
4	Analyse der Regelleistungsmärkte für den Einsatz von BHKW	35
4.1	Regelleistungsmärkte.....	35
4.2	Rahmenbedingungen für einen BHKW-Einsatz	39
4.3	Minutenreservemarkt.....	44
4.4	Beispiele für BHKW-Pools am Minutenreservemarkt.....	48
4.5	Zusammenfassung: Analyse Regelleistungsmärkte.....	51
5	Annahmen und Parameter.....	52
5.1	Szenario-Entwicklung von BHKW in Deutschland bis zum Jahr 2030.....	52
5.2	Wärmebedarfsprofile und BHKW-Auslegung.....	57
5.2.1	Wärmebedarfsprofile.....	57
5.2.2	Meteorologische Datenbasis.....	58
5.3.2	Wärmebedarfsprofile für Wohngebäude.....	60
5.2.4	Wärmebedarfsprofile für Nichtwohngebäude	65
5.3	Auslegung der BHKW	67
5.3.1	Wohngebäude	67
5.3.2	Nichtwohngebäude (ohne Industrie).....	77
5.3.3	Wärmenetze.....	81
5.3.4	Industrie	83
5.4	Zusammenfassung: Annahmen und Parameter.....	86
6	Modell zur Bestimmung der Minutenreserve-Potenziale von BHKW	87
6.1	Gesamtmodell	87
6.2	Modul 1 – Regelleistungsangebot und Fahrplanerstellung	93
6.3	Modul 2 – Angebotsentscheidung – positive oder negative Regelleistung	96
6.4	Modul 3 – Fahrplanänderungen durch Regelleistungsabruf.....	97
6.5	Validierung und Grenzen des Modells	98
6.6	Zusammenfassung: Modell.....	101
7	Technische Potenziale der BHKW am Minutenreservemarkt.....	102
7.1	Vergleich der unterschiedlichen Betriebsweisen	102
1.2	Minutenreserve-Regelleistungspotenziale für Wohngebäude-KWK	105

7.3	Minutenreserve-Potenziale der Nichtwohngebäude-BHKW.....	110
7.4	Beispiel 1 – Minutenreserve-Potenziale für Wärmenetze-KWK.....	113
7.5	Beispiel 2 – Minutenreservepotenziale für Industrie-BHKW.....	115
7.6	Vergleich der Regelleistungspotenziale der BHKW in unterschiedlichen Objekttypen	117
7.7	Potenziale bei Flexibilisierung der netzgeführten BHKW	117
7.7.1	Vergrößerung der Anlagen (Flex-1)	118
7.7.2	Vergrößerung der Wärmespeicher (Flex-2).....	120
7.7.3	Einsatz von Notkühlern (Flex-3).....	122
7.7.4	Vergleich der Flexibilisierungsstrategien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Bereitstellung von Regelleistung	124
7.7.5	Kosten-Nutzen-Vergleich der Flexibilisierungsstrategien.....	125
7.8	Ermittlung der Minutenreservepotenziale des BHKW-Bestands für die Jahre 2020 und 2030	129
7.9	Zusammenfassung: Technische Potenziale der BHKW.....	132
8	CO ₂ -Emissionen von BHKW mit und ohne Teilnahme am Minutenreservemarkt.....	133
8.1	CO ₂ -Bilanzierungs- und Allokations-Methode und Referenz-System	133
8.1.1	Finnische Allokationsmethode zur Bilanzierung der wärme- und strombedingten CO ₂ -Emissionen	133
8.1.2	Ungekoppeltes Referenzsystem	135
8.2	CO ₂ -Emissionen für unterschiedliche BHKW-Betriebsweisen und -Auslegungen.....	137
8.2.1	Wohngebäude	138
8.2.2	Nichtwohngebäude	146
8.2.3	Wärmenetze.....	153
8.2.4	Industrie	157
8.2.5	Ausblick Flexibilisierungsvarianten	160
8.3	Zusammenfassung: CO ₂ -Emissionen.....	162
9	Hemmnisse	164
9.1	Wirtschaftliche Hemmnisse	164
9.1.1	Zusätzliche Investitionen, Betriebs- und Transaktionskosten	164
9.1.2	Fernwirktechnik – Verfügbarkeit, Kosten und Standards	165
9.1.3	Verminderte Einnahmen durch reduzierte Auslastung (Volllaststunden).....	167
9.1.4	Konkurrenz mit Eigenstromnutzung (inkl. Verkauf an Dritte).....	168
9.1.5	Konkurrenz mit Teilnahme am Strommarkt	170
9.1.6	Unattraktive Preise am Minutenreservemarkt.....	172

9.2	Technische Hemmnisse.....	175
9.2.1	Bisherige Auslegung und wärmegeführter Betrieb	175
9.2.2	Teilweise fehlende Einbaumöglichkeiten für Flexibilisierungsmaßnahmen.....	176
9.2.3	Niedriger Deckungsgrad im Sommer ("Sommerloch").....	176
9.2.4	Mögliche Restriktionen im Rahmen der Netzanschlussregelungen	177
9.3	Ökologische Hemmnisse.....	177
9.3.1	Höhere CO ₂ -Emissionen beim Übergang vom wärmegeführten zum netzgeführten Betrieb.....	177
9.3.2	Teils höhere CO ₂ -Emissionen beim Übergang vom netzgeführten zum flexibilisierten Betrieb.....	178
9.3.3	Verlust des „Umweltfreundlichkeits-Bonus“ durch sinkenden thermischen Deckungsbeitrag und Notkühlereinsatz.....	179
9.4	Politische und rechtliche Hemmnisse	179
9.4.1	Fehlende Regelungen im KWKG zu netzgeführtem Betrieb und virtuell miteinander verbundenen BHKW als Regelkraftwerke	180
9.4.2	Unklare Anforderungen an stromgeführten Betrieb bei der neuen Förderung von Mini-KWK-Anlagen.....	180
9.4.3	Falsche Anreize bei Zuschlägen für (größere) Wärmespeicher (Flex-2) im KWKG 2012.....	181
9.4.4	Zu wenig Anreize durch die Wahlmöglichkeit für die Dauer der KWK-Zuschläge.....	181
9.4.5	Wegfall der Stromsteuer-Erstattung für virtuell gekoppelte BHKW mit einer Gesamtleistung über 2 MW _{el}	182
9.5	Soziale Hemmnisse	183
9.5.1	„Bisherige Denke und Erfahrungen“	183
9.5.2	Mangelnde Akzeptanz gegenüber externen Zugriffen auf die eigene BHKW	183
9.5.3	Mangelnde Motivation und Verständnis des Regelleistungsmarktes.....	183
9.5.4	Mangelnde Akzeptanz gegenüber höherem Platzbedarf bei Flexibilisierung	184
9.6	Zusammenfassung Hemmnisse	185
10	Empfehlungen.....	187
10.1.1	Energiewirtschaftliche Gründe <i>für</i> einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt	188
10.1.2	Energiewirtschaftliche Gründe <i>gegen</i> einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt	189
10.1.3	Systemtechnische Gründe <i>für</i> einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt	191

10.1.4 Systemtechnische Gründe <i>gegen</i> einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt	191
10.2 Empfehlungen – Fernwirktechnik (inkl. IKT)	192
10.3 Empfehlungen – Mangelnde Wettbewerbsfähigkeit und regulatorische Nachteile	194
10.4 Weitere Empfehlungen	195
10.5 Zusammenfassung Empfehlungen	196
11 Zusammenfassung	198
12 Quellen- und Literaturangaben	203
13 Anhang – Dokumentation des Experten-Workshops „Regelleistungspotenziale von BHKW“	209
13.1 Diskussionen und Ergebnisse des Workshops	209
13.1 Annahmen	210
13.3 Modell und Ergebnisse	212
13.4 CO ₂ -Emissionen	214
13.5 Hemmnisse	215
13.6 Ausblick und Empfehlungen	217
13.7 Agenda	219

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve durch BHKW	22
Abb. 1-2: Vergleich der CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für alle NWG-Typen, aggregiert für das Jahr 2020	25
Abb. 2-1: Potentials for minute reserve by CHP at considered residential and non residential buildings.....	28
Abb. 2-2: Comparison of the CO ₂ -Emissionen for non-coupled, "reserve power" led and flexible operating mode for all non-residential types, aggregated for the year 2020	30
Abb. 4-1: Struktur und zeitliche Reihenfolge der Regelleistungsbereitstellung	36
Abb. 4-2: Minutenreserveeinsatz in Deutschland für eine Beispielwoche im Mai 2010.....	44
Abb. 4-3: Der mittlere Einsatz von Minutenreserve in jeder 4-Stunden Zeitscheibe des Jahres 2010	45
Abb. 4-4: Entwicklung der abgerufenen monatlichen Minutenreserve.....	45
Abb. 4-5: Entwicklung der durchschnittlichen Abrufe der Minutenreserve von 2007 bis 2010.....	46
Abb. 4-6: Entwicklung der durchschnittlich vorgehaltenen Minutenreserveleistung von 2007 bis 2010	47
Abb. 4-7: Entwicklung der monatlich durchschnittlichen Arbeitspreise	47
Abb. 4-8: Entwicklung der monatlich durchschnittlichen Leistungspreise	48
Abb. 5-1: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung und der Stromerzeugung aus zentraler KWK und BHKW (inkl. Anteil an der gesamten Bruttostromerzeugung) von 2010 bis 2030 gemäß der EE-Langfristszenarien 2011.....	54
Abb. 5-2: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung von BHKW zwischen 2010 und 2030 nach verschiedenen Anwendungsbereichen und Energieträgern gemäß vorläufiger Daten aus den EE-Langfristszenarien 2011.....	56
Abb. 5-3: Entwicklung der Stromerzeugung aus BHKW zwischen 2010 und 2030 nach verschiedenen Anwendungsbereichen und Energieträgern gemäß vorläufiger Daten der EE-Langfristszenarien 2011.....	57
Abb. 5-4: Klimazonen der TRY (links) und Zusammenfassung zu 5 Klimazonen (rechts)	59
Abb. 5-5: Vergleich der potenziellen Regelleistungsbereitstellung aus einem Pool von Altbau Einfamilienhäusern in den fünf Klimazonen.....	60
Abb. 5-6: Sigmoid-Funktion, Beispiel: Neues Mehrfamilienhaus	62
Abb. 5-7: Sigmoid-Funktionen für Einfamilienhäuser	63
Abb. 5-8: Sigmoid-Funktionen für Mehrfamilienhäuser.....	63

Abb. 5-9: Verlauf des Tagesprofils für neue MFH für verschiedene Tagesmitteltemperaturen.....	64
Abb. 5-10: Temperaturverschiebung der Tagesprofile.....	65
Abb. 5-11: Jahresganglinie des Wärmebedarfs für Mehrfamilienhäuser.....	65
Abb. 5-12: Ausschnitt aus der Deutschen Gebäudetypologie nach Baualtersklassen.....	68
Abb. 5-13: Entwicklung der Struktur der installierten KWK-Leistung nach den Wohngebäudetypen für den betrachteten Zeitraum (2010, 2020, 2030).....	77
Abb. 5-14: Installierte KWK-Leistung nach NWG-Typen für den betrachteten Zeitraum (2010, 2020, 2030).....	81
Abb. 5-15: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes im betrachteten Wärmenetz	83
Abb. 5-16: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs für das betrachtete Industrie-Fallbeispiel (Käserei)	84
Abb. 6-1: Iteratives Zusammenspiel der drei Module innerhalb eines Teilmodells	89
Abb. 6-2: Exemplarische Darstellung der Leistung der KWK, die am Beispieltag für die Bereitstellung von Regelleistung maximal freigehalten werden kann.....	90
Abb. 6-3: Exemplarische Darstellung eines Entscheidungsergebnis für jede Zeitscheibe des Beispieltags, ob positive oder negative Regelleistung angeboten wird	90
Abb. 6-4: Exemplarische Darstellung des Fahrplans für die KWK als Resultat aus vorzuhaltender Leistung (Modul 1) und Art der bereitzustellenden Regelleistung (Modul 2).....	91
Abb. 6-5: Exemplarische Darstellung von angebotener, abgerufener und gelieferter Regelleistung am Beispieltag.....	92
Abb. 6-6: Exemplarische Darstellung von Fahrplan und tatsächlicher Fahrweise bei Regelleistungsabruf am Beispieltag	92
Abb. 6-7: Technische Komponenten innerhalb des Modul 1	93
Abb. 6-8: Exemplarische Darstellung eines Optimierungsergebnisses für einen Tag	96
Abb. 6-9: Unterschiede in den Anteilen der KWK an der Wärmebedarfsdeckung.....	99
Abb. 7-1: Wärmebedarf eines EFH-Altbaus in der Woche vom 25.01. bis 31.01.2010 und Bedarfsdeckung im wärme- und netzgeführten Betrieb	103
Abb. 7-2: Jahresdauerlinien des KWK- und des Spitzenkesselinsatzes im wärmegeführten Betrieb (links) im Vergleich zum netzgeführten Betrieb (rechts) am Beispiel eines EFH-Altbaus	104
Abb. 7-3: Jahresverlauf der potenziell bereitstellbaren Regelleistung in KWK-Anlagen aus Wohngebäuden im Jahr 2010 und der Lufttemperatur.....	105
Abb. 7-4: Jahresverlauf der in der Modellierung bereitgestellten positiven und negativen Regelleistung in KWK-Anlagen aus Wohngebäuden im Jahr 2010 und der Lufttemperatur.....	106
Abb. 7-5: Jahresdauerlinie der potenziell bereitstellbaren und theoretisch möglichen Minutenreserve aus KWK-Anlagen in Wohngebäuden für das Jahr 2010.....	107

Abb. 7-6:	Regelleistungsabruf und durch KWK-Anlagen in Wohngebäuden vorgehaltene und gelieferte Regelleistung am 01.01.2010 (dabei wurden an diesem Tag Abrufe bis zu einer Höhe von 2.400 MW erreicht).....	107
Abb. 7-7:	Jahresdauerlinie der potenziell bereitstellbaren und theoretisch möglichen Minutenreserve aus BHKW in Nichtwohngebäuden für das Jahr 2010	110
Abb. 7-8:	Jahresdauerlinie der potenziell bereitgestellten Minutenreserve aus BHKW in den jeweiligen Nichtwohngebäuden für das Jahr 2010	111
Abb. 7-9:	Jahresverlauf der potenziell bereitstellbaren positiven und negativen Regelleistung in KWK-Anlagen aus Nichtwohngebäuden im Jahr 2010	112
Abb. 7-10:	Jahresdauerlinie der verschiedenen KWK Betriebsweisen im betrachteten Wärmenetz.....	114
Abb. 7-11:	Wärmebedarf und Wärmedeckung der Käserei während einer Winterwoche in der netzgeführten Betriebsweise.....	115
Abb. 7-12:	Jahresdauerlinie der BHKW-Betriebsweisen bei der betrachteten Käserei	116
Abb. 7-13:	Jahresdauerlinie der Bereitstellung von Minutenreserve für das NWG 1 (Krankenhaus) bei größerer Anlagenleistung.....	118
Abb. 7-14:	Jahresdauerlinie der Bereitstellung von Minutenreserve für das NWG 1 (Krankenhaus) bei einer Vervierfachung des Wärmespeichers	120
Abb. 7-15:	Abschätzung der Investitionskosten für KWK-Anlagen.....	126
Abb. 7-16:	Investitionen für Speicher in Abhängigkeit vom Volumen	126
Abb. 7-17:	Investitionen für Notkühler in Abhängigkeit von der thermischen Leistung	127
Abb. 7-18:	Kosten-Nutzen-Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz.....	128
Abb. 7-19:	Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve	130
Abb. 7-20:	Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve bei unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen.....	131
Abb. 8-1:	Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der sieben ausgewählten KWK-Module für die zehn Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10 (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 47,1 \% / \eta_{th, Ref} = 90,0 \%$).....	139
Abb. 8-2:	Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 3 auf Objektebene.....	140
Abb. 8-3:	Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG1 bis WG10 auf Objektebene	140
Abb. 8-4:	Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3:	

Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2010	141
Abb. 8-5: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2020	142
Abb. 8-6: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2030	143
Abb. 8-7: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für Wohngebäudetypen WG 1 bis 10, aggregiert für das Jahr 2020.....	144
Abb. 8-8: Spezifische CO ₂ -Mehremissionen (kg _{CO2} pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für Wohngebäude	145
Abb. 8-9: Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der fünf ausgewählten KWK-Module für die fünf Gebäudetypen NWG 1 bis NWG 6 (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 47,1 - 49,6 \%$ / $\eta_{th, Ref} = 90,0 \%$).....	147
Abb. 8-10: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude auf Objektebene (mit Ausschnittvergrößerung für NWG 2 bis NWG 6)	148
Abb. 8-11: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1 bis 6, aggregiert für das Jahr 2010.....	149
Abb. 8-12: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1 bis 6, aggregiert für das Jahr 2020.....	150
Abb. 8-13: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1, 2, 3, 5 und 6, aggregiert für das Jahr 2030	150
Abb. 8-14: Vergleich der CO ₂ -Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für alle NWG-Typen, aggregiert für das Jahr 2020	151
Abb. 8-15: Spezifische CO ₂ -Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für Nichtwohngebäude.....	152

Abb. 8-16: Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung des modellierten Wärmenetzes mit drei einspeisenden KWK-Modulen (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 50,3 \% / \eta_{th, Ref} = 90,0 \%$).....	153
Abb. 8-17: Vergleich der CO ₂ -Emissionen für das modellierte Wärmenetz: Wärmegeführter, netzgeführter und flexibilisierter Betrieb (Variante 3: Notkühler) versus ungekoppelte Fahrweise	154
Abb. 8-18: Vergleich der CO ₂ -Emissionen für das modellierte Wärmenetz: Flexibilisierter Betrieb versus netzgeführte Fahrweise	155
Abb. 8-19: Spezifische CO ₂ -Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für das modellierte Wärmenetz	156
Abb. 8-20: Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der modellierten industriellen KWK-Anlage in einer Käserei (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 47,1 \% / \eta_{th, Ref} = 90,0 \%$).....	157
Abb. 8-21: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für die modellierte industrielle KWK-Anlage (Käserei): Wärmegeführter, netzgeführter und flexibilisierter Betrieb (Variante 3: Notkühler) versus ungekoppelte Fahrweise.....	158
Abb. 8-22: Vergleich der direkten CO ₂ -Emissionen für die modellierte industrielle KWK-Anlage (Käserei): flexibilisierter Betrieb versus netzgeführte Fahrweise	159
Abb. 8-23: Spezifische CO ₂ -Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für das modellierte Industrie-BHKW (Käserei).....	160
Abb. 9-1: Vergleich von täglichen base-Preisen mit dem KWK-Index im Zeitraum in €/MWh (2010-2011).....	171
Abb. 9-1: Vergleich von täglichen base-Preisen mit dem KWK-Index im Zeitraum in €/MWh (2010-2011).....	171
Abb. 9-3: Monatliche Leistungspreise für negative Minutenreserve (2009-11/2011)	173
Abb. 9-4: Durchschnittliche Leistungspreise für negative Minutenreserve nach Zeitscheiben (2008-2010).....	174
Abb. 9-5: Beispielhafte tägliche Entwicklung des Spotmarktpreises (market-clearing-price) an einem dritten Mittwoch im November 2010.....	174
Abb. 9-6: Beispielhafte tägliche Entwicklung des Spotmarktpreises (market-clearing-price) an einem dritten Mittwoch im Juni 2010.....	175
Abb. 10-1: Fixe jährliche Kapital- und Betriebskosten verschiedener Gaskraftwerkstechniken für eine Bereitstellung von 2.000 MW _{el}	190
Abb. 13-1: Agenda des Experten-Workshops.....	219

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Kosten-Nutzen- Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz für BHKW im Altbaubereich	23
Tab. 2-1:	Cost-benefit-relation of doubled plant size, four-fold storage volume and use of emergency cooler for block-type CHP in old existing buildings.....	29
Tab. 4-1:	Entwicklung der Teilnehmeranzahl an den verschiedenen Regelleistungsmärkten (2007-2012)	37
Tab. 4-2:	Anbieter (inkl. Konzern-/Unternehmenszugehörigkeiten) nach Regelenergiearten (Stand 12.04.2012).....	38
Tab. 4-3:	Organisatorische Rahmenbedingung für die Erbringung von Regelleistung (Stand Mai 2012).....	40
Tab. 4-4:	Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Primärregelleistung und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen.....	41
Tab. 4-5:	Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Sekundärregelleistung und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen.....	41
Tab. 4-6:	Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Minutenreserve und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen.....	41
Tab. 4-7:	Technische Parameter einzelner KWK-Anlagentypen	43
Tab. 4-8:	Übersicht über geplante und bestehende Geschäftsmodelle für die Vermarktung von KWK u.a. am Minutenreservemarkt	50
Tab. 5-1:	Vorläufiges Mengengerüst BHKW der EE-Langfristszenarien 2011 als Datenbasis für die Potenzialanalysen	55
Tab. 5-2:	Sigmoid-Faktoren der betrachteten Gebäudetypen	62
Tab. 5-3:	Jahresenergieverbräuche und Zuordnung der Gebäudetypen für die Ermittlung der Wärmebedarfsprofile	63
Tab. 5-4:	Zuordnung von BDEW-Standardlastprofilen für den Gasbezug zu ausgewählten Nichtwohngebäudetypen.....	66
Tab. 5-5:	Auswahl und Energiebilanz für Raumwärme und Warmwasser der zu simulierenden Gebäude nach Typ und Energiestandard.....	70
Tab. 5-6:	Auslegungsdaten der BHKW-Module, Spitzenlastkessel und Speicher für die zehn betrachteten Wohngebäude-Versorgungsfälle	73
Tab. 5-7:	Entwicklung der Wohnflächen und Gebäudeanzahl nach Wohngebäudetypen im Zeitraum 2010 bis 2030	75
Tab. 5-8:	Entwicklung von Marktanteilen und Anlagenzahlen von Wohngebäude-KWK nach Leistungsklassen (2010, 2020, 2030).....	76

Tab. 5-9:	Auswahl von Nichtwohngebäuden als besonders geeignete, untersuchungsrelevante Anwendungsfälle für BHKW	77
Tab. 5-10:	Verbrauchsrelevante Kennwerte und resultierender Jahresheizenergiebedarf für die ausgewählten Nichtwohngebäude	78
Tab. 5-11:	Auslegungsdaten der BHKW, Spitzenlastkessel und Speicher für die fünf betrachteten Nichtwohngebäudetypen.....	79
Tab. 5-12:	Entwicklung der Anzahl von Nichtwohngebäuden und geschätzter Marktanteile der zugehörigen BHKW für den betrachteten Zeitraum 2010-2030.....	80
Tab. 5-13:	Kennzahlen des betrachteten Wärmenetzes der Stadtwerke Schwäbisch Hall GmbH.....	82
Tab. 7-1:	Kennzahlen des wärmegeführten (W) und netzgeführten (N) Betriebes aller BHKW-Anlagen in den Wohngebäudetypen für ein Jahr	109
Tab. 7-2:	Kennzahlen des wärmegeführten (W) und netzgeführten (N) Betriebes aller BHKW-Anlagen der NWG-Typen für ein Jahr	113
Tab. 7-3:	Kennzahlen für den wärmegeführten und netzgeführten Betrieb des BHKW im betrachteten Wärmenetz für ein Jahr.....	114
Tab. 7-4:	Kennzahlen des wärme- und netzgeführten Betriebes der BHKW-Anlage in der betrachteten Käserei für ein Jahr	116
Tab. 7-5:	Vergleich des netzgeführten Betriebes der KWK-Anlage mit Auslegungsanlagengröße und flexibilisierter Anlagengröße für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie.....	119
Tab. 7-6:	Vergleich des netzgeführten Betriebes der KWK-Anlage mit Auslegungsanlagengröße und vierfachem Wärmespeicher für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie.....	121
Tab. 7-7:	Vergleich des netzgeführten BHKW-Betriebes mit und ohne Notkühlernutzung (Flexibilisierung-3) für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie	123
Tab. 7-8:	Vergleich der Wärmeverluste im netzgeführten BHKW-Betrieb mit und ohne Notkühlernutzung für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie	124
Tab. 7-9:	Kosten-Nutzen- Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz.....	128
Tab. 8-1:	Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme	136
Tab. 8-2:	Annahmen zu Netzanschluss und elektrischen Eigenverbrauchsanteilen der BHKW sowie resultierende Referenzwerte für Wirkungsgrade und Emissionsfaktoren der ungekoppelten Erzeugung	137

Tab. 8-3:	Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen in g _{CO2} /kWh _{el} der Stromerzeugung in BHKW-Anlagen für Wohngebäude (WG) bei Einsatz des Notkühlers (Flexibilisierung 3-Variante mit $\eta_{th} = 0 \%$).....	139
Tab. 8-4:	Stromkennzahl und Anteil der Wärmeverluste über Notkühler bezogen auf die gesamte Wärme aus KWK-Modul und Spitzenlastkessel (Flex 3-Variante).....	146
Tab. 8-5:	Spezifische direkte CO ₂ -Emissionen in g _{CO2} /kWh _{el} der Stromerzeugung in BHKW-Anlagen für Nichtwohngebäude (NWG) bei Einsatz des Notkühlers (Flexibilisierung 3-Variante mit $\eta_{th} = 0 \%$).....	147
Tab. 9-1:	Mögliche Einbußen eines netzgeführten Betriebs im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb am Beispiel der EFH-BHKW-Anlage (Wohngebäude 1).....	169
Tab. 13-1:	Überblick über einschlägige Hemmnisse gegenüber einer Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt und ihre Bewertung (Punktevergabe) durch die Teilnehmer	216

Formelverzeichnis

Formel 1: Wärmebedarf eines Tages.....	61
Formel 2: Kundenwert.....	61
Formel 3: Auswertung der Sigmoid-Funktion	61
Formel 4: Einsatzreihenfolge der Komponenten	94
Formel 5: Gewinnmaximierung	95
Formel 6: Primärenergieeinsparung nach der finnischen Methode	134
Formel 7: Brennstoffbedarf für den Strom.....	134
Formel 8: Brennstoffbedarf für die Wärme	134
Formel 9: absolute CO ₂ -Emissionen.....	135
Formel 10: spezifische CO ₂ -Emissionen	135
Formel 11: Strom-Referenzwirkungsgrad	135
Formel 12: Korrekturfaktor für vermiedene Netzverluste	136

Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbaren Energien Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
HH	Hochhaus
HEV	Heizenergieverbrauch
HKW	Heizkraftwerk
kW·h	Vorgehaltene Regelleistung über Zeit
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
MR	Minutenreserve
MRL	Minutenregelleistung
NWG	Nichtwohngebäude
PEE	Primärenergieeinsparung
PH	Passivhaus
PR	Primärreserve
RH	Reihenhaus
RHS	Reihenhaussiedlung
RL	Regelleistung
SKZ	Stromkennzahl
SR	Sekundärreserve
WG	Wohngebäude
WN	Wärmenetz
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
VKW	Virtuelles Kraftwerk
vNNE	Vermiedene Netznutzungsentgelte

1 Kurzfassung

Im Rahmen des weiteren Ausbaus der erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung ist aufgrund der fluktuierenden Eigenschaft von Photovoltaik- und Windkraftstrom mit einem Anstieg des Bedarfs an Regelleistung, insbesondere an Minutenreserve, zum Ausgleich von Prognoseabweichungen zu rechnen. Zugleich soll der Anteil der KWK an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2020 auf einen Anteil von mindestens 25 % gesteigert werden. Hierfür bestehen besonders im Wohngebäudebereich mit derzeit mehr als 17 Millionen Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern noch sehr große bislang unerschlossene Potenziale für den Bau von BHKW. Diese sind flexibel bzw. steuer- und regelbar einsetzbar und können grundsätzlich – virtuell miteinander zu ausreichender Größe gekoppelt – Beiträge zur Deckung des Regelleistungsbedarfs und damit zur Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien leisten.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel dieser Untersuchung, das technische Regelleistungspotenzial von BHKW in Deutschland für die Jahre 2010, 2020 und 2030 zu bestimmen. Der Fokus lag auf den kleineren Leistungsbereich für die objektscharfe Versorgung von Wohngebäuden sowie von gewerblichen Objekten (Nichtwohngebäuden). Ergänzend wurde exemplarisch eine größere BHKW-Anlage mit Wärmenetz und ein industrieller Anwendungsfall untersucht. Ferner wurde betrachtet,

in welchem Umfang verschiedene Flexibilisierungsmaßnahmen die Potenziale erhöhen, wie hoch die CO₂-Emissionen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb bzw. zu einem ungekoppelten Referenzsystem ausfallen sowie

welche Hemmnisse die Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt erschweren und wie diese überwunden werden können.

Da der Regelleistungsmarkt in drei Teilmärkte (Primär-, Sekundär- und Minutenreserve) mit sehr unterschiedlichen Anforderungen gegliedert ist, wurde zunächst untersucht, welcher Teilmarkt am besten mit dem Einsatz von BHKW korrespondiert. Die Analyse der Vereinbarkeit von BHKW-Eigenschaften mit den jeweils geltenden Anforderungen für die Präqualifikation und dem Handelsablauf zeigte, dass derzeit der Primärreservemarkt nicht und der Sekundärreservemarkt nur bedingt und nicht in der Breite als Vermarktungsoption in Frage kommen. Zudem zielen viele der neuen einschlägigen Geschäftsmodelle auf die Bereitstellung von Minutenreserve ab. Daher wurde der Minutenreservemarkt als der aus technischer und regulatorischer Sicht am besten geeignete Regelleistungsmarkt für BHKW ausgewählt und vertieft untersucht.

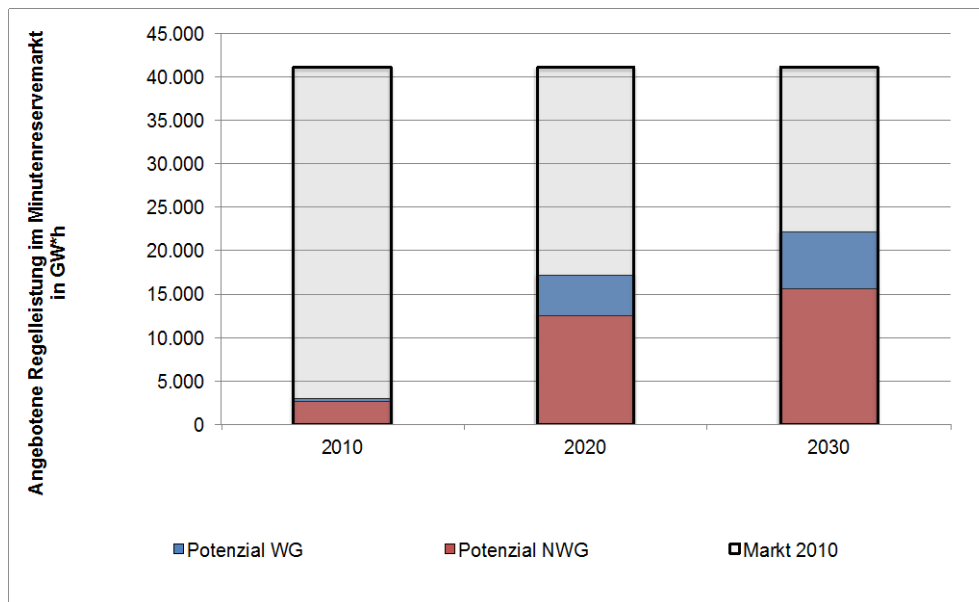
Im Rahmen dieser Studie wurden vier BHKW-Anwendungsbereiche unterschieden: 1) Wohngebäude 2) Nichtwohngebäude 3) Wärmenetze und 4) Industrie. Für jeden Bereich wurden konkrete Objekte bzw. Gebäudetypen ausgewählt und dafür einschlägige Wärmebedarfsganglinien bestimmt. Auf dieser Basis wurden passende BHKW (inkl. Spitzenkessel und Speicher) zugeordnet und wie bisher üblich auf die thermische Grundlast (ca. 30 % der Spitzenlast) ausgelegt. Im Wohngebäudebereich wurden zehn Gebäudetypen verschiedener Größe sowie unterschiedlicher Effizienzstandards und im Nichtwohngebäudebereich fünf verschiedene Objekte mit hohem KWK-Potenzial ausgewählt. Die Bereiche Wärmenetze und Industrie wurden dagegen anhand von jeweils einem Fallbeispiel exemplarisch untersucht. Die betrachteten Anlagengrößen liegen zwischen 1 und

50 kWel (Wohngebäude), 20 und 1.200 kWel (Nichtwohngebäude), bei 2.800 kWel (Wärmenetz) und 50 kWel (Industrie). Für Hochrechnungen der objektscharfen Ergebnisse für Wohn- und Nichtwohngebäuden auf den Bestand wurde der Entwicklungspfad des Szenarios A der „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“¹ (BMU 2012) für BHKW in Deutschland herangezogen.

Die Bestimmung des technischen Minutenreservepotenzials der betrachteten BHKW erfolgte mit Hilfe eines eigenen Modells und Simulationsrechnungen für wärme- und netzgeführte Betriebsweisen in jeweils viertelstündlicher Auflösung über ein Jahr.

Die Ergebnisse für den netzgeführten Betrieb zeigen, dass im Jahresmittel etwa bis zu 68 % (Wohngebäude), 71 % (Nichtwohngebäude), 82 % (Wärmenetz) bzw. 71 % (Industrie) der installierten und verfügbaren BHKW-Leistung zur Bereitstellung von Minutenreserve genutzt werden können. Während etwa einem Drittel des Jahres kann bei kalten Außentemperaturen die volle verfügbare Anlagenleistung genutzt werden, während im Sommer das Regelleistungspotenzial stark einbricht. Gemäß Hochrechnung für die Wohn- und Nichtwohngebäude hätten die dort installierten BHKW etwa bis zu 7 % der im Jahr 2010 insgesamt real angebotenen Minutenreserve bereitstellen können. Unter der Annahme eines unveränderten Regelleistungsmarktes und eines BHKW Ausbaus gemäß der Leitstudie 2011 wäre im Jahr 2020 (2030) sogar ein Abdeckungsgrad von bis zu 42 % (54 %) bezogen auf den Minutenreservemarkt möglich (vgl. Abb. 7-19).

Abb. 1-1: Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve durch BHKW



Quelle: Eigene Berechnungen

Zusätzlich wurde der Einfluss von drei verschiedenen Flexibilisierungsoptionen auf das MR-Potenzial untersucht: Eine Verdoppelung der Anlagengröße (Flex-1), eine Vervielfachung des

¹ Auch als Leitstudie 2011 bekannt.

Speichervolumens (Flex-2) und der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3). Die grundsätzlichen Wirkungen lassen sich am besten anhand der geordneten Jahresdauerlinie (JDL) für MR-Angebote verdeutlichen:

Eine Vergrößerung der Anlage verschiebt das Angebotsplateau der JDL nach oben zu einer höheren Leistung, der zeitliche Umfang wird dagegen kaum vergrößert.

Eine Vergrößerung des Speichers macht die Übergangszeiten besser nutzbar, verschiebt daher das Plateau der JDL weiter nach rechts und erhöht den zeitlichen Umfang für MR-Angebote

Der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3) entkoppelt die MR-Angebote vom Wärmebedarf, so dass zu jedem Zeitpunkt die volle Leistung angeboten werden kann (konstantes Angebotsplateau).

Die tatsächliche Wirkung hängt jedoch stark von der Auslegung ab: Bei einem relativ geringem Lastdeckungsgrad (z.B. WG 4) kann die Option Flex-1 das MR-Potenzial stark erhöhen, bei einem bereits hohen Lastanteil (z.B. WG 1 oder WG 5) ist kein großer Effekt mehr zu erreichen. Für die Option Flex-2 verhält es sich in diesen Fällen genau umgekehrt. Ein zusätzlicher Kosten-Nutzen-Vergleich zeigt, dass in den exemplarisch untersuchten Objekten die Vergrößerung des Speichers (Flex-2) in der Regel die geringsten Kosten pro zusätzlich generierte Regelleistung aufweist (vgl. Tab. 1-1). Je nach Anlagenkonfiguration können jedoch auch mit den Optionen Flex-1 und Flex-3 ähnlich geringe Kosten wie bei Flex-2 erreicht werden.

Tab. 1-1: Kosten-Nutzen-Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz für BHKW im Altbaubereich

Gebäudetyp	Flex-1 Doppelte Anlagengröße in Ct/kWel·h	Flex-2 Vierfache Speichergröße in Ct/kWel·h	Flex-3 Notkühler in Ct/kWel·h
WG 2 kleines MFH	17,0	3,0	4,9
WG 3 großes MFH	5,6	3,6	9,3
WG 4 Hochhaus	2,0	0,6	2,6

MFH: Mehrfamilienhaus

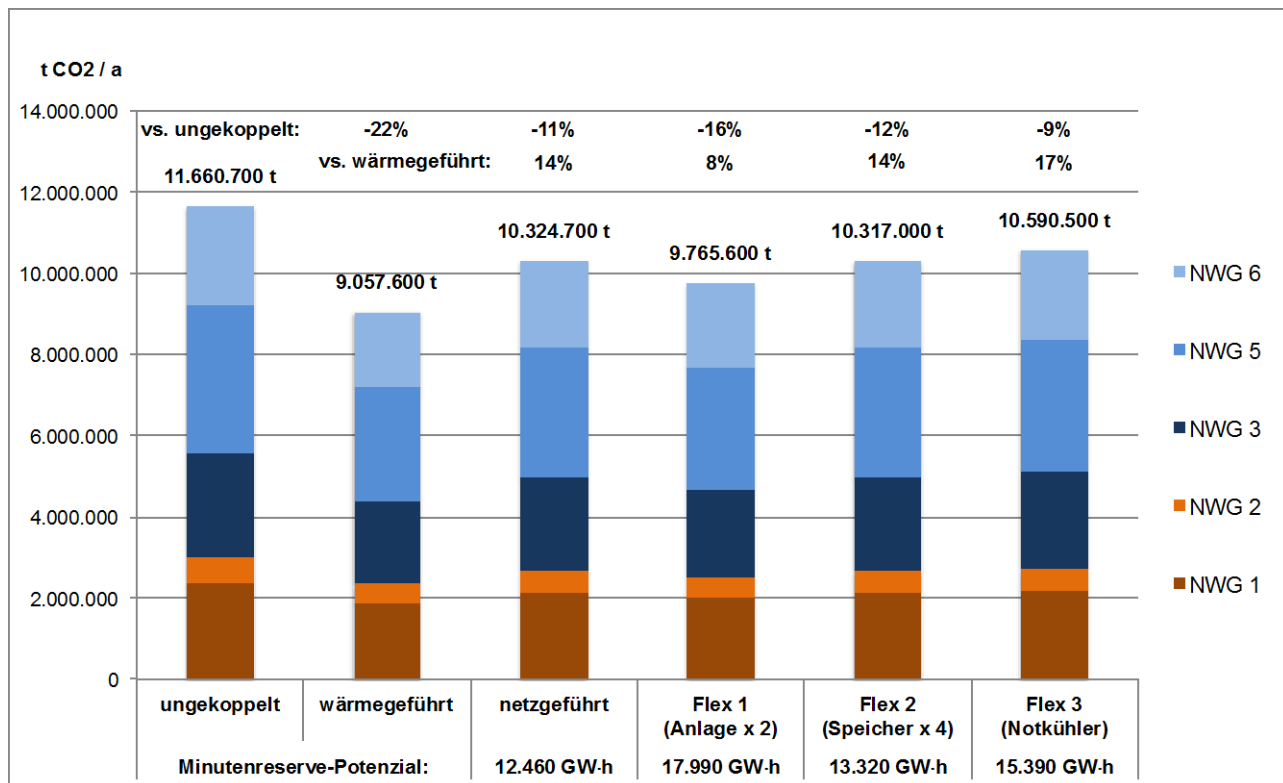
Quelle: Eigene Berechnungen

Die Veränderungen der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von den verschiedenen BHKW-Betriebsweisen wurden mit Hilfe der Finnischen Allokationsmethode untersucht. Dabei wurde die ungekoppelte Erzeugung von Strom mittels GuD-Kraftwerk und von Wärme mittels Erdgaskessel als Referenzsystem berücksichtigt. Ein Wechsel von der heute üblichen wärmegeführten Betriebsweise hin zu einer netzgeführten Fahrweise trägt auf Objektebene zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen um 8 bis 16 Prozent bei. Die Einsparungen gegenüber dem ungekoppelten Referenzsystem vermindern sich dadurch etwa um die Hälfte, von ursprünglich 15 bis 25 % (wärmegeführt) auf dann 8 bis 13 % (netzgeführt). Der netzgeführte Betrieb schneidet damit emissionsseitig und primärenergetisch immer noch signifikant besser ab als die getrennte Erzeugung.

Die Flexibilisierungsoptionen wirken sich im Vergleich zum netzgeführten Betrieb unterschiedlich auf die CO₂-Emissionen aus. Eine Verdopplung der Anlagengröße (Flex-1) führt in fast allen Fällen (mit Ausnahme von Wohngebäudetyp 1 und 5) zu niedrigeren Emissionswerten. Ein vierfach größerer Speicher (Flex-2) bewirkt bei Nichtwohngebäuden emissionsseitig kaum Veränderungen (< 0,2 %), bei Wohngebäuden, Wärmenetz- und Industrie-Beispiel kommt es jedoch überwiegend zu einer leichten Zunahme (< 4 %). Der Notkühlereinsatz (Flex-3) führt bei den Wohngebäudetypen 1, 5 und 2 aufgrund des dort eingesetzten Stirlingmotors mit geringer SKZ zu einem besonders hohen Anstieg der CO₂-Emissionen um 52 %, 34 % bzw. 14 %. In den übrigen Fällen bewirkt der Notkühler gegenüber der netzgeführten Variante einen leichten bis mäßigen Emissionsanstieg um 1 % beim Wärmenetz, durchschnittlich 3 % bei den NWG, durchschnittlich 5 % bei den WG (ohne WG 1, 2 und 5) und 8 % beim Industrie-BHKW.

Hochrechnungen für die betrachteten Wohn- und Nichtwohngebäude auf Basis des Mengengerüsts der Leitstudie 2011 (BMU 2012) für das Jahr 2020 zeigen, dass die gesamten CO₂-Emissionen im WG-Bereich zwischen ca. 3,9 Mio. t (wärmegeführt) und 4,8 Mio. t (ungekoppelt) und im NWG-Bereich (siehe Abb. 1-2) entsprechend zwischen ca. 9,1 Mio. t und 11,7 Mio. t liegen. Die insgesamt mögliche CO₂-Einsparung gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung verringert sich durch die Teilnahme am Minutenreservemarkt im günstigsten Fall (Flex 1) von 18 % auf 11% (WG) und von 22 % auf 16 % (NWG). Im ungünstigsten Fall (Flex-3) reduziert sich die CO₂-Einsparung von 22 % auf 9 % (NWG) bzw. von 18 % auf minus 4 % (WG). Bei den Wohngebäuden findet unter Einsatz des Notkühlers also ein Vorzeichenwechsel statt und die Emissionen steigen gegenüber der ungekoppelten Referenz um 4 % an.

Abb. 1-2: Vergleich der CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für alle NWG-Typen, aggregiert für das Jahr 2020



Bemerkungen: NWG 1: Krankenhäuser; NWG 2: Altenheime; NWG 3: Hotels; NWG 5: Bürogebäude; NWG 6: Schulen

Quelle: eigene Berechnungen

Neben den steigenden CO₂-Emissionen gibt es eine Reihe weiterer Nachteile bzw. Hemmnisse, die eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt behindern. Um diese zu erfassen, wurde aus technischer, ökonomischer, ökologischer, politisch-juristischer und sozialer Sicht analysiert, welche Aspekte direkt hemmend wirken (können). Die darauf aufbauende ad-hoc Bewertung durch einschlägige Experten auf dem Projekt-Workshop im Mai 2012 sowie die weiteren eigenen Analysen zeigen, dass die ökonomischen Hemmnisse und die geltende Mindestgebotsdauer für Minutenreservegebote am relevantesten sind.

Zu den wesentlichen ökonomischen Hemmnissen gehören die noch zu teure Fernwirktechnik für kleinere BHKW und die größere wirtschaftliche Attraktivität besonders der Eigenstromnutzung als auch eines gezielten Stromverkaufs am Spotmarkt.

In technischer Hinsicht sind die bisher übliche wärmegeführte Auslegung der BHKW, fehlende Standards für die benötigte Fernwirk- und Kommunikationstechnik, der starke Rückgang des Wärmebedarfs im Sommer („Sommerloch“) und speziell im Wohngebäudebereich der mangelnde Platz für Flexibilisierungsmaßnahmen als relevante Hemmnisse zu nennen.

Im KWKG und der Förderrichtlinie zu Mini-KWK-Anlagen fehlen Begriffe und Regelungen zu netzgeführten und zu virtuell miteinander verbundenen BHKW sowie konkrete und einheitliche Anforderungen an die Ausstattung mit Fernwirk-, Informations- und Kommunikationstechnik. Die Vorgaben für die Zuschussgewährung an die Errichtung größerer Speicher und die Wahlmöglichkeit über den Zeitraum für die KWK-Zuschläge bei kleinen BHKW (< 50 kW_{el}) greifen zu kurz bzw. bieten zu wenig Anreize.

Nicht zuletzt behindern verschiedene soziale Faktoren, wie die bisher übliche Praxis

(wärmegeführte Auslegung und Betrieb), mangelnde Akzeptanz von Eigentümern gegenüber externen Zugriffen, mangelnde Motivation und mangelndes Verständnis des Regelleistungsmarkts den Wechsel zu netzgeführten BHKW..

Trotz der – insbesondere in Zukunft – nennenswerten technischen Minutenreservepotenziale von BHKW ist ein solcher Einsatz nicht zwingend erforderlich. Die identifizierten energiewirtschaftlichen und systemtechnischen Nachteile von netzgeführten BHKW im Vergleich zu konventionellen Systemen (Gasturbine, GuD) fallen jedoch mit steigender Anlagengröße und fortschreitendem Zeithorizont immer weniger ins Gewicht. Eine (breitere) Markteinführung von größeren Anlagen (ab ca. 100 kWel), die überwiegend von neuen Anbietern verfolgt wird, erscheint daher kurz- bis mittelfristig realistisch und auch sinnvoll. Bei kleineren Systemen wird dies neben ihrem Ausbau maßgeblich von der Entwicklung kleiner und kostengünstiger Fernwirktechnik, dem Nachweis ihrer Machbarkeit sowie von der weiteren Entwicklung des Minutenreservemarkts abhängen. Vor diesem Hintergrund wurden die folgenden Handlungsempfehlungen bezogen auf netzgeführte BHKW abgeleitet:

- Aufstellung von konkreten, anwendungsspezifisch differenzierten sowie einheitlichen Mindestanforderungen an die Fernwirktechnik und ihre Aufnahme in das KWKG sowie die Mini-KWK-Förderrichtlinie
- Bestimmung von technischem Stand, kommerzieller Verfügbarkeit, Kosten und Kostensenkungspotenzialen von Fernwirktechnik für BHKW.
- Bestimmung der ökonomischen Potenziale von netzgeführten BHKW, differenziert nach Anlagengröße und Anwendungsbereich
- Prüfung der Einführung von zeitlich begrenzten (und ggf. gedeckelten) einmaligen Zuschüssen für eine Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt gegen Nachweis der Präqualifikation
- Durchführung einer Aufwand-Nutzen-Analyse hinsichtlich einer Verringerung der Mindestgebotsdauer für Minutenreserveangebote von vier auf zwei bzw. einer Stunde
- Beginn einer Förderung bei großen Anlagen und vorzugsweise im jüngeren Bestand, falls die energiewirtschaftlichen Aussichten positiv bewertet wurden, zugleich aber noch keine ausreichende Wirtschaftlichkeit gegeben ist
- Kopplung der Zuschüsse an die Errichtung von größeren Wärmespeichern als heute üblich an eine Mindestgröße wie z.B. zwei Stunden Nennlastbetrieb, dabei Prüfung der Einführung von Boni für besser gedämmte bzw. kompaktere Speicher mit hoher Kapazität
- Keine Unterstützung eines Einsatzes von Notkühlern (Flex-3) im kleinen Anlagenbereich und zunächst, d.h. vor den Ergebnissen aus den vorgeschlagenen Untersuchungen, auch nicht für eine Anlagenvergrößerung (Flex-1)
- Priorität vor Unterstützungsmaßnahmen für strom- und netzgeführte BHKW sollten die Maßnahmen zur Steigerung des weiteren Ausbaus und Maßnahmen zur Gebäudesanierung haben
- Grundsätzliche Klärung der Frage, welche Rollen dezentrale Systeme wie BHKW in Zukunft übernehmen sollen (z.B. dezentrale Bereitstellung von Regelleistung) und welche Regelleistungs-Strukturen (zentral, dezentral, hybrid) langfristig besser zur Transformation der Energieversorgung zu Erneuerbaren Energien passen.

2 Short summary

In the context of the increasing share of renewable energy in the electricity sector and their fluctuating feed in, a higher demand for control reserve (especially minute reserve) is expected to be needed to compensate forecast deviations. At the same time, the share of combined heat and power (CHP) in electricity production is to reach 25 %. There is a large, yet unexploited potential for the installation of small CHP units in the residual sector with currently more than 17 Million one- and small multi-family-houses. These small CHP units are flexibly controllable and can contribute to the provision of control reserve and thereby to the integration of renewable electricity when they are pooled to market-compatible larger units.

Against this background, the aim of this investigation was to determine the technical balancing potential of CHP in Germany for the years 2010, 2020 and 2030. It focuses on small units for the heat supply of single residential and commercial (non-residential) buildings. In addition, a larger CHP unit in a district heating network and an industrial application were examined. Furthermore, this study considers the questions to what extent different flexibility measures increase the potential provision of control reserve how high the CO₂ emissions turn out to be compared with the heat-operated mode or an non-coupled reference system and which obstacles small CHP units face in their contribution to the control reserve market and how these can be overcome. As the control reserve market is divided into three sub-markets (primary, secondary and minute reserve) with very different requirements, it was first examined which sub-market corresponds best with the use of CHP.

The analysis of the compatibility of CHP properties with the prequalification requirements and the trading process showed that currently the primary reserve market is ineligible and the secondary reserve market is only partly suited as a marketing option. Moreover, many new business models aim at the provision of minute reserve. Therefore, the minute reserve market was selected as the most suitable control reserve market for CHP, from a technical and regulatory point of view. Hence, this market was chosen for deeper investigations.

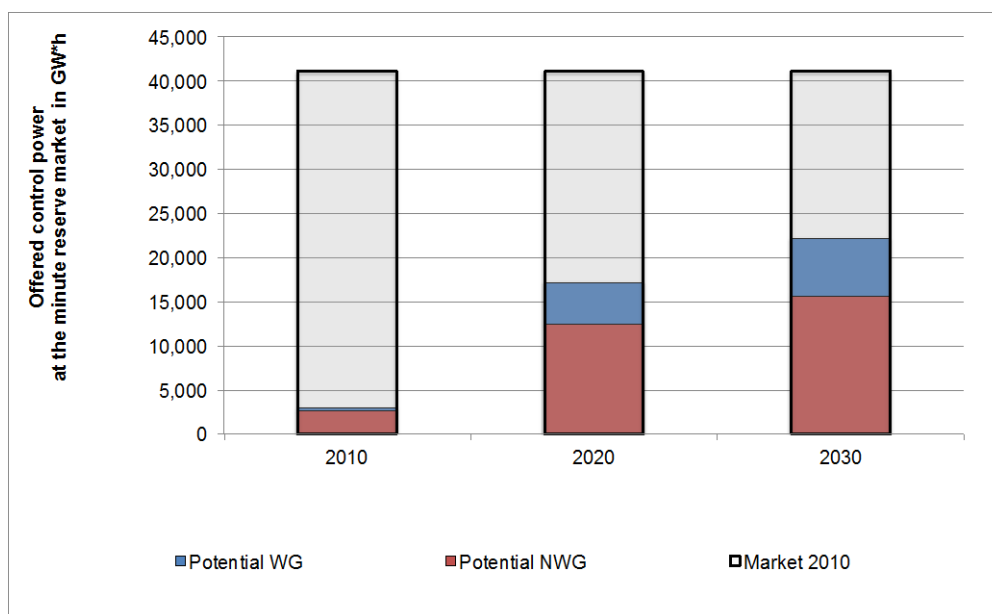
This study distinguishes between application areas for small CHP units: 1) residential buildings 2) non-residential buildings 3) district heating networks and 4) industry. For each area concrete supply buildings were chosen and time series of their heat demand were calculated. Based on these, suited CHP units (including peak boilers and thermal storage) were selected. These units were planned based on the thermal base load (about 30 % of the peak load). Ten types of residential buildings with different size and different efficiency standards and five non-residential objects with high CHP potential were selected which represent these sectors. In contrast, the district heating network and the industrial application have been examined on the basis of one example case each. The considered system sizes range from 1 to 50 kW_{el} (residential buildings), 20 to 1,200 kW_{el} (non-residential buildings), at 2,800 kW_{el} (district heating network) and 50 kW_{el} (industry). To scale up the results for single residential and non-residential buildings to the actual size of these sectors, the development path of the scenario A

of the “Long term scenarios and strategies for the expansion of renewable energies in Germany under consideration of the European and global development”² (BMU 2012) was used.

The technical potential of small CHP to contribute to the minute reserve market was determined using an own model. With this model simulations for heat led and “reserve power” modes of operation were done for one year with a temporal resolution of 15 minutes.

The results for the “reserve power” led mode of operation show that about 68 % (residential buildings), 71 % (non-residential buildings), 82 % (heating networks) and 71 % (industry) of the installed CHP capacity can be used for the provision of minute reserve in annual average. During about one third of a year with low ambient temperatures the full plant capacity can be used, whereas in summer the control reserve potential is significantly lower. According to projections for the residential and non-residential buildings, the installed CHP could have provided up to about 7 % of the total minute reserve offered in 2010. Assuming a steady control power market and a CHP expansion correspondent to the “Leitstudie 2011”, a coverage of up to 42 % (54 %) of the minute reserve market size would be possible in the year 2020 (2030) (see).

Abb. 2-1: Potentials for minute reserve by CHP at considered residential and non residential buildings



Source: Own calculations

In addition, the influence of three different flexibility measures on the control reserve potential has been investigated: the duplication of plant size (flex-1), the quadruplication of storage volume (flex-2) and the use of an emergency cooler (flex-3). The effects of these measures can be best illustrated with reference to the annual load duration curve of the minute reserve provision:

- This curve has a plateau at the installed power and declines afterwards.

² Also known as “Leitstudie 2011”

- The increase of the plant size lifts the “winter-plateau” of the curve up to a higher power, but doesn’t change its progression apart from that. The enlargement of the storage helps to stretch the plateau to the right, meaning that the full capacity can be used for the provision of control reserve in more hours of the year.
- The use of an emergency cooler (flex-3) de-couples the reserve provision and the heat demand, so that the full power can be offered at any time (constant supply plateau).

The actual effect of the flexibility measures depends strongly on the design of the CHP plants: The lower the plant power in comparison to the peak demand, the bigger is the effect of an increasing plant size. The opposite is true for the larger thermal storage. An additional cost-benefit comparison shows that, for the exemplary investigated objects, the enlargement of the storage (flex-2) leads to the lowest costs per additional provided control reserve. Depending on the plant design, similarly low costs as for flex-2 can also be achieved with flex-1 and flex-3.

Tab. 2-1: Cost-benefit-relation of doubled plant size, four-fold storage volume and use of emergency cooler for block-type CHP in old existing buildings

Building Type	Flex-1 Doubled Plant Size in Ct/kW _{el} ·h	Flex-2 Fourfold storage volume in Ct/kW _{el} ·h	Flex-3 Emergency Cooler in Ct/kW _{el} ·h
WG 2 small mfh	17,0	3,0	4,9
WG 3 big mfh	5,6	3,6	9,3
WG 4 towers	2,0	0,6	2,6

MFH: multi family home

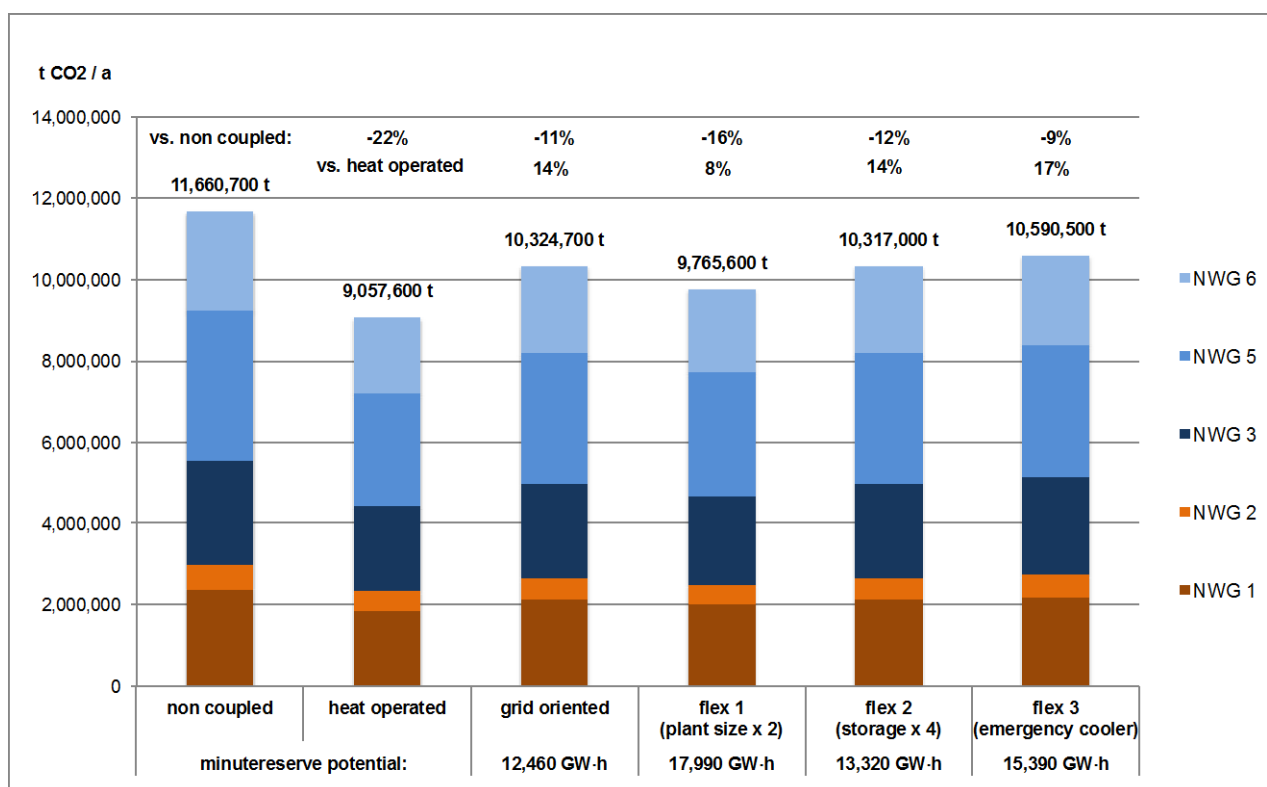
Source: Own Calculations

The CO₂ emissions of the different CHP modes have been examined using the Finnish allocation method. For this method, non-coupled electricity and heat generation from a combined cycle gas turbine and a gas boiler was assumed as reference system. The change from today’s heat led operation mode towards an control reserve orientated operation leads to 8-16 % higher CO₂ emissions on object level. , which compensates about half of the advantages of CHP towards non-coupled generation (from 15-25 % in the heat led case down to 8-13 % in the grid oriented case). The performance of the grid oriented operation remains significant better than that of the non-coupled generation with respect to CO₂-emissions and primary energy needs.

The different flexibility measures have different effects on the CO₂-emissions. The double plant size (Flex-1) leads to lower emissions in most cases. The larger storage (Flex-2) doesn’t cause changes in emissions for non-residential buildings (< 0.2 %), but lead to slightly higher emissions (< 4 %) in the residential sector and the case studies of CHP for district heating and industry. The emergency cooler (Flex-3) causes significantly higher emissions for the residential building types no. 1 (+52 %), no. 5 (+34 %) and no. 2 (+14 %), where a stirling engine with a very low CHP coefficient is being in use. Though it has only rather small effects (from +1 % for district heating up to +8 % for the industry case study) for all the other considered objects.

Projections to the year 2020 on the basis of the "Leitstudie 2011" show that the total CO₂ emissions of the residential buildings will be between 3.9 million tons (control reserve operation mode) and 4.8 million tons (non-coupled) and between about 9.1 million tons and 11.7 million tons for non-residential buildings (see Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Due to the participation in the minute reserve market, the possible CO₂ savings towards the non-coupled generation are reduced between 18 % to 11 % (residential buildings, flex 1) and from 22 % to 16 % (non-residential buildings, flex 1) in the best case and up from 18 % to 4 % (residential buildings, flex 3) and from 22 % to 9 % (non-residential, flex-3 and control reserve operation mode) in the worst case.

Abb. 2-2: Comparison of the CO₂-Emissionen for non-coupled, "reserve power" led and flexible operating mode for all non-residential types, aggregated for the year 2020



Source: Own calculations

In addition to rising CO₂ emissions, there are a number of other disadvantages or barriers that hinder the participation of CHP in the minute reserve market. To determine these barriers, it was analysed from a technical, economic, ecological, political-legal and social perspective which aspects can have an inhibiting effect. An expert-review that was conducted during a workshop in Mai 2012 as well as further analyses show that economic obstacles and the current minimum duration of four hours for minute reserve bidding are the most relevant barriers. The key economic constraints include the still too expensive remote control technology for small CHP and the greater economic attractiveness of self consumption or the electricity sale at the spot market. The so far common heat led design of the CHP, the lack of standards for the required remote control and communication technology, the low heat demand in summer and especially in residential buildings as well as the poor possibilities for flexibility measures are the main technical constraints. In the CHP law (KWKG) and the funding guidelines for small CHP plants, terms and regulations for the participation in control reserve markets as well as

concrete and uniform requirements for remote control, information and communication technologies are missing. The requirements for the granting of subsidies for the construction of larger storage and the possibility to choose the period of CHP surcharges for small CHP (<50 kW_{el}) are inadequate or provide insufficient incentives. Moreover, several social factors such as the so far common practice (heat led design and operation), the lack of acceptance of owners against external accesses, the lack of motivation and the lack of understanding of the control power market impede the participation of small CHP units in the control reserve market.

In spite of the – particularly in the future – significant technical potential of small CHP to provide control reserve, it is not mandatory. Though, the identified energy-economic and systematic disadvantages of CHP used for control reserve against conventional systems (gas turbine, combined cycle) become less and less important with an increasing plant size and a progressing time horizon. A (broader) market introduction of larger plants (> 100 kW_{el}), which is pursued by mostly new providers, appears to be realistic in the short to medium term and reasonable as well. For smaller systems, this will depend on their expansion together with the development of smaller and less expansive remote control technology, the demonstration of its feasibility as well as the further development of the minute reserve market.

Against this background, the following recommendations were derived for the participation of small CHP in the minute reserve market:

- Development of concrete, application-specific and uniform minimum requirements for the remote control technology and its inclusion in the KWKG as well as the funding guidelines for small CHP.
- Determination of the technical status, commercial availability, cost and cost reduction potentials of remote control technology for CHP.
- Determination of the economic potential of CHP participating in the control reserve market according to plant size and scope.
- Examination of the introduction of temporary (and if necessary capped) non-recurring grants for the participation of CHP on the control power market (if prequalification criteria are met).
- Conduction of a cost-benefit analysis in terms of reducing the minimum bid period for minute reserve from four down to two or one hours.
- Start of a funding for large plants and preferably in younger stock, if the energy-economic prospects were rated positively, while a sufficient profitability is not given.
- Coupling of the support for thermal storages larger than usual today to a minimum plant size (e.g. storage capacity of two hours). Along with that an examination of the introduction of bonuses for better insulated or compact high-capacity storage.
- No support of the use of emergency coolers (flex-3) in the small plant sector and for the moment, i.e. before the results of the proposed studies, not even for an expansion of the plants (flex-1)
- Measures for building insulation should have priority over the support of electricity led or control reserve CHP.

- Fundamental analysis of the question which roles decentralized systems such as CHP should take on in future (e.g. decentralized provision of control reserve) and which control reserve structures (centralized, decentralizes, hybrid) are better suited for the transformation of the energy supply to renewable energy in the long-term.

3 Einführung

Aus Klima- und Ressourcenschutzgründen wird in Deutschland ein starker Ausbau von erneuerbaren Energien verfolgt. Bis zum Jahr 2050 sollen sie nach dem Energiekonzept der Bundesregierung einen Anteil von mindestens 60 % am Primärenergieeinsatz und mindestens 80 % bezogen auf den Stromverbrauch erreicht haben. Bereits bis zum Jahr 2020 ist nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ein Anteil von mindestens 35 % an der Stromversorgung gesetzlich verankert (BRD 2012). Der Großteil des Stroms wird dabei aus den dargebotsabhängigen Quellen Windkraft und Photovoltaik stammen. Um die damit verbundenen Schwankungen des Angebots und Prognoseabweichungen ausgleichen zu können, wird allgemein ein zunehmender Bedarf an Regelleistung, speziell der Minutenreserve prognostiziert. Für das Jahr 2020 wird in der zweiten Netzstudie der dena ein Bedarf in Höhe von 4.180 MW_{el} an positiver und 3.317 MW_{el} an negativer Minutenreserve für ihre Modellberechnungen ermittelt (dena 2010). Dies bedeutet, dass etwa 1.000 MW_{el} (2.000 MW_{el}) mehr negative (positive) Minutenreserve im Vergleich zum Jahr 2010 benötigt werden.

Parallel zum Ausbau der erneuerbaren Energien soll der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bis zum Jahr 2020 auf 25 % der Nettostromerzeugung gesteigert werden (BKWK 2012). Dabei bestehen insbesondere noch im Wohngebäudebereich mit derzeit mehr als 17 Millionen Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern sehr große unerschlossene Potenziale. Ihre Wärmeversorgung kann – entweder netzgebunden oder objektscharf – durch so genannte Blockheizkraftwerke (BHKW) erfolgen. Diese sind sehr flexibel und könnten demnach grundsätzlich auch Regelleistung bereitstellen und damit zur Integration von Strom aus erneuerbaren Energien beitragen. Kleinere Anlagen können dazu virtuell miteinander zu größeren Regelkraftwerken verknüpft werden.

Das technische Potenzial von BHKW für die Bereitstellung von Regelleistung ist bislang noch wenig untersucht und bekannt. Es dürfte maßgeblich von der Möglichkeit abhängen, die Elektrizitätserzeugung und Wärmebedarfsdeckung durch (größere) Wärmespeicher und durch neue Betriebsstrategien zeitlich zu entkoppeln sowie ggf. mehrere BHKW virtuell miteinander zu bündeln.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Untersuchung zum technischen Regelleistungspotenzial durch BHKW der Fokus besonders auf den kleineren Leistungsbereich von BHKW für die objektscharfe Versorgung von Wohngebäuden und von gewerblichen Objekten (Nichtwohngebäuden) gelegt. Ergänzend dazu wird jeweils ein Fallbeispiel eines größeren Wärmenetz- und eines Industrie-BHKW untersucht. Ziel der Untersuchung ist es folgende Fragen zu beantworten:

- Welcher Regelleistungsmarkt ist für BHKW am besten geeignet und wie hat sich dieser Markt in den letzten Jahren entwickelt?
- Wie groß ist dort das technische Potenzial für das Angebot von Regelleistung durch die betrachteten BHKW in den Jahren 2010, 2020 und 2030?
- Im welchem Umfang können Flexibilisierungsmaßnahmen die Potenziale erhöhen?
- Wie hoch sind die zugehörigen CO₂-Emissionen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb und zu einem ungekoppelten Referenzsystem?

- Welche Hemmnisse erschweren die Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt und wie können diese überwunden werden?

4 Analyse der Regelleistungsmärkte für den Einsatz von BHKW

Die mögliche Teilnahme von BHKW an den drei verschiedenen Regelenergiemärkten (Primär-, Sekundär- und Minuten³-Reserve) hängt neben ihren technischen Eigenschaften maßgeblich von den Strukturen der Märkte und ihrer einschlägigen technischen und regulatorischen Anforderungen ab. Diese werden nachfolgend dargestellt und analysiert (Kapitel 4.2).

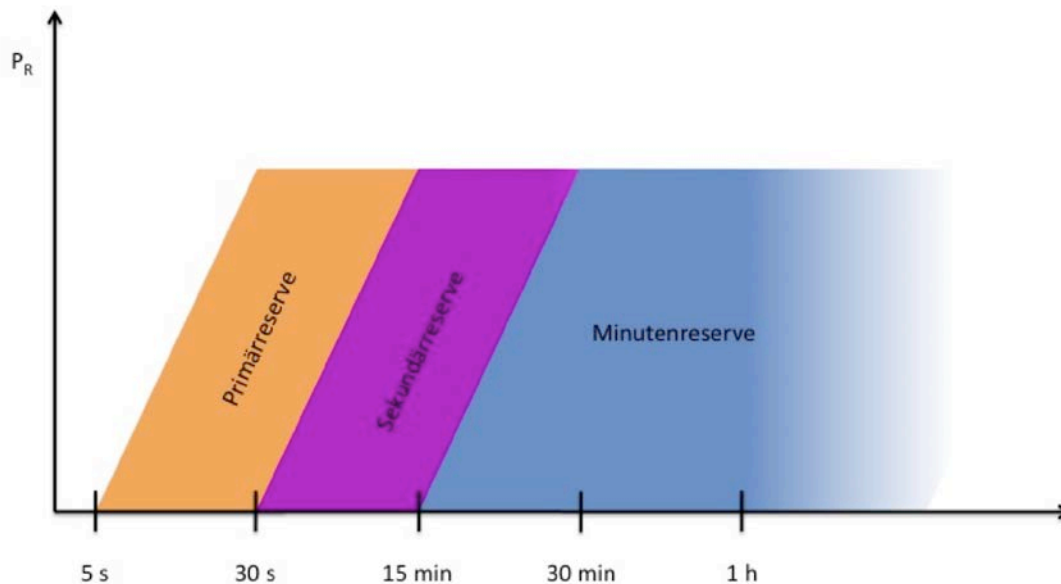
4.1 Regelleistungsmärkte

Im elektrischen Netz müssen sich Angebot und Nachfrage in jedem Augenblick entsprechen, da das Stromnetz selber keine Puffer- oder Speicherkapazitäten besitzt. Ein Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage führt daher unmittelbar zu einem Abfall oder Anstieg der Soll-Frequenz von 50 Hz im europäischen Verbundsystem. Da die Prognose der Last und der Einspeisung – insbesondere der aus regenerativen fluktuierenden Quellen – mit Abweichungen verbunden ist, kommt es ständig zu kleineren und zunehmend zu größeren Abweichungen zwischen Verbrauch und Erzeugung, welche ausgeglichen werden müssen. Dieser Ausgleich geschieht mit Hilfe von Regelleistung. Übersteigt die elektrische Nachfrage das Angebot (Frequenzabfall), muss positive Regelleistung die Angebotslücke auffüllen. Bei einer zu geringen Nachfrage (Frequenzanstieg) wird das Angebot mit Hilfe der negativen Regelleistung reduziert.⁴ Die Regelleistung wird in drei Arten eingeteilt, welche unterschiedliche Zeiträume und Reaktionsgeschwindigkeiten für den Ausgleich abdecken (siehe Abb. 4-1).

³ Allgemein auch Tertiärreserve genannt.

⁴ Die aktuelle Netzfrequenz und der oben beschriebene Einsatz der Primärreserve werden auf der folgenden Webseite dargestellt und erläutert: <http://www.netzfrequenzmessung.de/>

Abb. 4-1: Struktur und zeitliche Reihenfolge der Regelleistungsbereitstellung



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (UCTE 2009), (VDN 2007)

Die Primärreserve (PR) wird automatisch als Erstes und daher insgesamt am häufigsten eingesetzt. Über Frequenzmessungen wird in jedem beteiligten Kraftwerk ständig bestimmt, ob und wie viel positive oder negative Regelleistung geliefert werden muss. Ein Totband, in welchem die Primärregelung nicht angesprochen wird, kann zwischen Anbieter und Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) einzeln vereinbart werden. Die Primärreserve muss nach fünf Sekunden vollständig verfügbar und nach spätestens 15 Minuten vollständig von der Sekundär- (SR) und Minutenreserve abgelöst sein. Für das europäische Verbundnetz der ENTSO-E⁵ muss von allen Mitgliedern gemeinsam eine Primärregelleistung von insgesamt 3 GW bereitgestellt werden, um einen Ausfall von zwei großen Kraftwerken (à 1.500 MW_{el}) ohne Netzausfälle kompensieren zu können. Diese verteilt sich je nach Leistungsnachfrage in den Gebieten der einzelnen ÜNB unter den Mitgliedern (UCTE 2009).

Den von den ÜNB jeweils für erforderlich gehaltenen Regelleistungsbedarf beschaffen diese mittels Ausschreibung auf den entsprechenden Regelleistungsmärkten bei den von Ihnen qualifizierten Anbietern (sofern sie anbieten). Die Ausschreibungsverfahren, Zugangsbedingungen und Anforderungen für die drei Märkte sind zum Teil sehr verschieden und unterschiedlich anspruchsvoll (siehe Kapitel 4.2). Umfang und Höhe der Präqualifikationsanforderungen sind für die Primärreserve am höchsten und für die Minutenreserve am niedrigsten. Dies spiegelt sich in umgekehrter Proportion deutlich an der Anzahl der Marktteilnehmer für die drei Regelleistungsmärkte wieder (siehe Tab. 4-1): am wenigsten Teilnehmer im Primär- und am meisten Teilnehmer im Minutenreservemarkt. Der

⁵ European Network of Transmission System Operators for Electricity

Minutenreservemarkt scheint demnach am besten für neue Anbieter geeignet zu sein, gefolgt vom Sekundärreservemarkt, der in den letzten drei Jahren gleich viele neue Teilnehmer wie der Minutenreservemarkt aufweist. Die zuletzt starke Zunahme bei der Primärreserve ist auf den Beginn der gegenseitigen Öffnung von deutschem und schweizerischem Primärreservemarkt seit Anfang 2012 zurückzuführen (BNetzA 2011b).⁶ Demnach stammen 4 von 6 neuen Teilnehmern aus der Schweiz.

Tab. 4-1: Entwicklung der Teilnehmeranzahl an den verschiedenen Regelleistungsmärkten (2007-2012)

	31.12.07	31.12.08	31.12.09	30.06.11	12.04.12
Primärreserve	5	6	7	8	14
Sekundärreserve	5	6	9	13	15
Minutenreserve	23	27	28	29	34

Quellen: (BNetzA 2009) (BNetzA 2010a) (50 Hertz et al. 2012)

Ein Blick auf die Anbieter und ihre unternehmerischen Zugehörigkeiten der im April 2012 teilnehmenden Unternehmen an den Regelleistungsmärkten (siehe Tab. 4-1) zeigt, dass der Markt für Minutenreserve anbieterseitig demnach am stärksten diversifiziert ist. Mit 13 von mittlerweile 34 Anbietern gehören zwar (noch) knapp 2/5 dieser Unternehmen zu den großen Energiekonzernen, die zugleich den Primär- und Sekundärreservemarkt dominieren. Gleichwohl sind hier im Unterschied zu den anderen beiden Märkten auch viele kommunale und regionale Energieversorger sowie Betreiber von Industriekraftwerken tätig. Neue Geschäftsmodelle und Anbieter für Minutenreserve aus KWK bzw. BHKW Anlagen werden im Kapitel 4.4 vorgestellt. Die Teilnehmerstruktur zeigt ferner, dass der überwiegende Teil der Primärreservenanbieter auch in den anderen beiden Märkten anbietet, während sich knapp die andere Hälfte allein auf den Primärreservemarkt konzentriert (s.o.). Dagegen gibt es lediglich sechs Anbieter (davon fünf von Primärreservenanbietern unabhängige Anbieter), die zugleich sowohl den Minutenreserve- und Sekundärreservemarkt abdecken. Dies legt nahe, dass eine Ausweitung des Angebots vom Minutenreserve- auf den Sekundärreservemarkt (noch) auf hohe Hürden stößt.

⁶ „Voraussichtlich ab Anfang 2012 sollen in einer ersten Ausbaustufe 25 MW des schweizerischen Bedarfs für die deutschen PRL-Anbieter geöffnet werden. Für die Deckung des deutschen Bedarfs auch aus der Schweiz ist keine Begrenzung vorgesehen. ...“ (BNetzA 2011a)

Tab. 4-2: Anbieter (inkl. Konzern-/Unternehmenszugehörigkeiten) nach Regelenergiearten (Stand 12.04.2012)

Anbieter	PRL	SRL	MRL	Zugehörigkeit
n Energy Trading SE	X	X	X	E.on-Konzern
EnBW Kraftwerke AG	X	X	X	EnBW-Konzern
GDF Suez Energie Deutschland AG	X	X	X	GDF Suez-Konzern (F)
RWE Supply&Trading GmbH	X	X	X	RWE-Konzern
Stadtwerke München GmbH	X	X	X	-
Statkraft Markets GmbH	X	X	X	Statkraft-Konzern (NO)
Steag GmbH	X	X	X	Konsortium Rhein-Ruhr/Evonik
Vattenfall Europe Generation AG	X	X	X	Vattenfall-Konzern
Alpiq AG	X			Alpiq-Konzern (CH)
Axpo AG	X			-
BKW FMB Energie AG	X			(CH)
Centralschweizerische Kraftwerke AG	X			Axpo-Konzern (CH)
EGL AG	X			(CH)
Trimet Aluminium AG	X			-
E.on Westfalen Weser Energie-Service GmbH		X	X	E.on-Konzern
Energy2Market GmbH		X	X	-
Kraftwerke Mainz Wiesbaden AG		X	X	-
Mark-E AG		X	X	-
TiWaG Tiroler Wasserkraft AG		X	X	Österreichischer Anbieter
Trianel GmbH		X	X	Stadtwerke-Verbund
Alpiq Spreetal GmbH			X	Alpiq-Konzern (CH)
ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH			X	ArcelorMittal-Konzern
BalancePower GmbH			X	-
CURRENTA GmbH & Co. KG			X	Bayer-/Lanxess-Konzern
Envia Mitteldeutsche Energie AG			X	-
GeneraTec GmbH			X	N-Ergie-Konzern
Infracor GmbH			X	Evonik-Konzern
Lechwerke AG			X	RWE-Konzern
MVV Energie AG			X	-
Next Kraftwerke GmbH			X	-
RWE Innogy GmbH			X	RWE-Konzern
Stadtwerke Düsseldorf AG			X	EnBW-Konzern

Anbieter	PRL	SRL	MRL	Zugehörigkeit
Stadtwerte Hannover AG			X	-
Stadtwerte Leipzig GmbH			X	-
Stadtwerte Rosenheim GmbH & Co. KG			X	-
swb Erzeugung GmbH & Co. KG			X	-
TeraJoule GmbH			X	-
ThyssenKrupp Steel AG			X	ThyssenKrupp-Konzern
VSE AG			X	RWE-Konzern
VW Kraftwerk GmbH			X	-

Quelle: (50 Hertz et al. 2012), eigene Recherchen zur Konzernzugehörigkeit

4.2 Rahmenbedingungen für einen BHKW-Einsatz

Die regulatorischen organisatorischen Bedingungen für die Ausschreibungen und Angebote von Regelenergie werden von der Bundesnetzagentur (BNetzA) beschlossen und vorgegeben. Dabei sind die Bedingungen für Primär- und Sekundärregelung, BK6-10-097 (BNetzA 2011b) und BK6-10-098 (BNetzA 2011c), zuletzt im April 2011 aktualisiert worden und die Anforderungen an die Minutenreserve wurden während des Forschungsvorhabens geändert. Bis zum 01.12.2011 galt noch der Beschluss BK6-06-012 vom August 2006 (BNetzA 2006), der vor allem in den Punkten Mindestangebotsgröße, Abruf und Blockangebote mit dem Beschluss BK6-10-099 (BNetzA 2011a) vom 18.10.2011 geändert wurde.

In Tab. 4-3 sind alle geltenden Anforderungen mit Stand Ende Mai 2012 für die verschiedenen Regelarten zusammengefasst und farblich bewertet, inwieweit BHKW diese regulatorischen Anforderungen erfüllen können. Die Begründungen für die Bewertungen werden nachfolgend zusammen mit denen für die technischen Anforderungen (siehe Tab. 4-4 bis Tab. 4-6) gegeben.

Tab. 4-3: Organisatorische Rahmenbedingung für die Erbringung von Regelleistung (Stand Mai 2012)

	Primärregelung (PR)	Sekundärregelung (SR)	Minutenreserve (MR)
Ausschreibung	Wöchentliche Ausschreibung		Tägliche Ausschreibung (10 Uhr)
Zuschlag	Dienstag Nachmittag der Vorwoche	Mittwoch Nachmittag der Vorwoche	Vormittag des Vortages (11 Uhr)
Bereitstellungszeitraum	Die komplette Woche	zwei verschiedene Zeitscheiben, peak (Mo-Fr 08-20h) und off-peak (verbleibende Stunden)	jeden Tag für sechs verschiedene Zeitscheiben à vier Stunden
Mindestgebotsgröße	+/- 1 MW	5 MW	15 MW (bis 31.12.11) 10 MW (bis 02.07.12) 5 MW (ab 03.07.12)
Angebotsinkrement	1 MW		
Poolung von Anlagen	Erlaubt		
Abruf	automatisch	Anforderung per Fernwirkleitung	Anforderung per Fernwirkleitung
Sonstiges	Positive und negative Primärregelleistung wird gemeinsam ausgeschrieben		Unteilbare Blockangebote ⁷ sind möglich

Bemerkung: Von Rot nach Grün wird die Vereinbarkeit mit KWK-Anlagen dargestellt. Rot = schwer vereinbar, Orange = mäßig vereinbar, Grün = gut vereinbar; Quellen: siehe erste Tabellenzeile, eigene Darstellung

Quellen: (BNetzA 2011b) für Primärreserve; (BNetzA 2011c) für Sekundärreserve und (BNetzA 2010b) (BNetzA 2006) für Minutenreserve

Anlagenbetreiber, die sich mit ihren Anlagen am Regelenergiemarkt beteiligen wollen, müssen diese von den Übertragungsnetzbetreibern qualifizieren lassen. Diese sogenannte Präqualifikation ist im Transmission Code 2007 des VDN (VDN 2007) näher beschrieben. Dabei werden die technischen Anforderungen, die der Präqualifikation zu Grunde liegen, von den Übertragungsnetzbetreibern bestimmt.

Die technischen Anforderungen an die Primärenergiebereitstellung sind dabei am anspruchsvollsten. Zudem muss grundsätzlich jede regelbare Anlage über einer Nennleistung von 100 MW_{el} in der Lage sein, Primärregelleistung bereitzustellen.

⁷ Diese Blockangebote können nur als ganzes angenommen oder abgelehnt und müssen bei Bedarf als Block abgerufen werden.

Tab. 4-4: Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Primärregelleistung und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen

Präqualifikationsanforderungen für Primärregelleistung	Eigene Bewertung bzgl. BHKWs
Der regelbare Bereich bei mind. +/- 2 % der Nennleistung und mind. +/- 2MW	möglich
Bei Frequenzabweichung von +/- 200 mHz muss die Leistung gleichmäßig in 30 Sekunden aktiviert und mindestens jeweils 15 min abgegeben werden können	schlecht bis unmöglich
Nach einigen Sekunden muss die erste Reaktion messbar sein	schlecht bis unmöglich
Die Frequenz-Leistungskennlinie muss einstellbar sein	noch nicht bewertbar
Ständige Onlineüberwachung des Betriebsstatus	möglich
Eine Verfügbarkeit von 100 % muss garantiert werden	möglich

Quellen: [(UCTE 2009), (VDN 2007), (BHKW-Consult 2011), (Dena 2010)]

Tab. 4-5: Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Sekundärregelleistung und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen

Präqualifikationsanforderungen für Sekundärregelleistung	Eigene Bewertung bzgl. BHKWs
Leistungsänderungsgeschwindigkeit von mindestens 2 % der Nennleistung pro Minute	möglich
Volle Aktivierung der Sekundärreserve nach fünf Minuten	möglich
Erste messbare Reaktion spätestens 30 Sekunden nach Anforderung	schlecht
Thermische technische Einheiten müssen sich rotierend (synchron) am Netz befinden	schlecht
Eine Verfügbarkeit von 100 % muss garantiert werden	möglich

Quellen: [(UCTE 2009), (VDN 2007), (BHKW-Consult 2011), (Dena 2010)]

Tab. 4-6 Geforderte technische Voraussetzungen für das Anbieten von Minutenreserve und deren Vereinbarkeit mit den betrachteten KWK-Anlagen

Präqualifikationsanforderungen für Minutenreserve	Eigene Bewertung bzgl. BKKWs
In voller Höhe innerhalb von 15 Minuten zu erbringen	gut
Eine Verfügbarkeit von 100 % muss garantiert werden	möglich

Quellen: [(UCTE 2009), (VDN 2007), (BHKW-Consult 2011), (Dena 2010)]

Der Zugang zu und die Teilnahme an den Regelenergiemärkten sind reguliert und hohen Anforderungen unterworfen. Diese sind bezüglich organisatorischer und technischer Eigenschaften im Primär- und Sekundärreservemarkt deutlich höher als bei der Minutenreserve. Dies allein lässt bereits vermuten, dass der erste Zugang von BHKW als Regelkraftwerke auf dem Minutenreservemarkt stattfindet. Wie die nachfolgenden

Ausführungen zeigen, wird dagegen eine Teilnahme an den anderen beiden Märkten aus heutiger Sicht wenig (Sekundärreserve) bis gar nicht (Primärreserve) realistisch sein, da wesentliche, vor allem technische Anforderungen durch die heutigen BHKW kaum oder nicht erfüllt werden können.

Am Primärregelleistungsmarkt ist die vorgeschriebene wöchentliche Ausschreibung, die Vorhaltung der Leistung über eine Woche und die Kopplung von positiver und negativer Primärregelleistung besonders kritisch für BHKW. Bei einer wöchentlichen Ausschreibung mit fünf Tagen Vorlauf muss der Einsatz der BHKW Anlagen schon für die nächsten 13 Tage prognostiziert und festgelegt werden. Eine hinreichend verlässliche Wetter- und Temperaturprognose, welche den Wärmebedarf bestimmen könnte, kann für diesen Zeitraum aber nicht angenommen werden. Die Vorhaltung der Leistung über die komplette Woche erschwert die Möglichkeit zur Teilnahme zusätzlich, denn es müsste sichergestellt werden, dass die Wärme über die komplette Zeit abgenommen werden kann. Gleichzeitig besteht die Verpflichtung, positive und negative Primärleistung gemeinsam anzubieten, welche ein weiteres Hindernis für den Einsatz von BHKW-Anlagen in diesem Gebiet darstellt. Diese Vorgabe ließe sich nur mit BHKW-Anlagen im Teillastbetrieb realisieren, was aus technisch-ökonomischer Sicht (geringere Wirkungsgrade sowie ggf. häufigeres An- und Abfahren) jedoch unvorteilhaft ist. Innovative Konzepte wie Brennstoffzellen-KWK mit guter und effizienter Teillastfähigkeit könnten diese Hürde allerdings in Zukunft zu überwinden helfen.

Aus technischer Sicht ist die geforderte schnelle Reaktionszeit mit den heutigen BHKW-Anlagen nur sehr schlecht zu realisieren. Schon nach einigen Sekunden muss eine Reaktion messbar sein. Dies ist mit thermischen Kolbenmaschinen aus einem Kaltstart heraus nicht zu gewährleisten. Auch die komplette Aktivierung der Leistung nach 30 Sekunden ist für BHKW Anlagen nicht darstellbar. Ein regelbarer Bereich von mind. +/- 2 MW ist mit verschiedenen BHKW-Anlagen, welche in einem Pool verschaltet sind, dagegen möglich. Auch eine ständige Onlineüberwachung könnte bei BHKW-Anlagen technisch realisiert werden, in der Praxis allerdings aus ökonomischen Gründen (zusätzliche Kosten für TK- und MSR-Technik⁸) scheitern. Die 100 %ige Verfügbarkeit lässt sich zwar nicht für Einzelanlagen garantieren, in einem Pool oder durch Absicherung der Leistung durch Dritte könnte dieses Kriterium jedoch erfüllt werden.

Auch für die Sekundärregelleistung gilt die wöchentliche Angebotsvergabe mit den zuvor beschriebenen Nachteilen für den Einsatz von BHKW-Anlagen in diesem Segment. Die Leistungsvorhaltung ist im Vergleich zum Primärreservemarkt etwas einfacher, da für zwei Zeiträume (jeweils 12 h peak und off-peak) pro Woche angeboten werden kann, aber auch dies erlaubt nur eine relativ geringe Flexibilität bzw. bedingt eine hohe Prognosegüte. Die geforderte Leistungsänderungsgeschwindigkeit von mindestens 2 % der Nennleistung pro Minute ließe sich mit BHKW-Anlagen realisieren, ebenso eine 100 %ige Verfügbarkeit über einen entsprechend großen Pool. Die dauerhafte Synchronisation mit dem Netz kann nur über einen permanenten Betrieb im Leerlauf oder in Teillast erfüllt werden, was jedoch aufgrund von höheren Wartungs- und Betriebskosten nicht bevorzugt werden wird. Besonders schwierig

8 TK: Telekommunikation, MSR: Mess-, Steuer- und Regelung

wird es dagegen bei der Forderung nach einer ersten messbaren Reaktion nach 30 Sekunden. Dies ist mit BHKW nicht aus dem *standby*-Betrieb, sondern nur aus einem Teillastbetrieb (z. B. 50 %, um sowohl positive als auch negative Sekundärreserve gleichermaßen gut anbieten zu können) heraus erfüllbar (siehe Tab. 4-7). Voraussetzung dafür ist jedoch, dass über die gesamte vorzuhaltende Zeit (12 h) und eine Woche lang ein ausreichend hoher Wärmebedarf besteht und ggf. ein größerer Pufferspeicher als heute üblich vorhanden ist (Gerigk, U. 2012). Daher dürfte diese Option ohne Flexibilisierung der Anlagen nur für Anwendungsfälle mit entsprechend hoher thermischer Grundlast und nicht in der Breite in Frage kommen.

Tab. 4-7: Technische Parameter einzelner KWK-Anlagentypen

Technologie	Kaltstartzeit	Warmstartzeit aus Standby
Motor-BHKW	1 min 30 s	< 1 min
Mikrogasturbine	2 min 30 s	1 min 30 s
PEM-Brennstoffzelle	30 min	15 min
MCFC-Brennstoffzelle	8 h	15 min
Stirlingmotor	> 1 h	8 min

Quelle: (Kurscheid 2009)

Im Minutenreservemarkt erfolgen die Ausschreibungen im Unterschied zu den anderen beiden Märkten täglich. Nur für Sonntag und Montag wird schon am Freitag, also einen bzw. zwei Tage früher ausgeschrieben. Am Markt für Minutenreserve kann für sechs Zeitscheiben à vier Stunden geboten werden. Dies ermöglicht weitaus flexiblere Angebotsabgaben für die BHKW-Betreiber als im Primärreservemarkt und Sekundärreservemarkt und dürfte daher kein wesentliches Hemmnis für die Teilnahme darstellen.

Die lange Anfahrzeit von 15 Minuten ermöglicht es allen KWK-Anlagen diese Bedingung aus dem *standby*-Betrieb heraus zu erfüllen, mittels Kaltstart schaffen es dagegen nur BHKW und Mikrogasturbinen. Die Verfügbarkeit kann über einen Pool ermöglicht werden oder die Absicherung der Leistung durch Dritte geschehen.

Der Abgleich der BHKW-Eigenschaften mit den technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen lässt erwarten, dass eine breite Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt zunächst auf den Minutenreservemarkt beschränkt bleiben wird. Es sprechen derzeit jedenfalls gewichtige Gründe (s.o.) gegen eine erfolgreiche Präqualifikation von BHKW am Primärreservemarkt und in der Breite auch gegen eine Teilnahme am Sekundärreservemarkt. Ohne maßgebliche Änderungen auf Seite der Anforderungen und/oder der BHKW-Anlagentechnik (inkl. Kommunikation) und Betriebsweise ist nicht mit einer Überwindung der bestehenden Hürden zu rechnen. Wenn doch, dann kommt dafür die Sekundärreserve eher in Betracht als die Primärreserve.

Dies zeigt die jüngst erfolgreiche Präqualifikation des Unternehmens e2m – energy2market mit ihrem virtuellen „Grünen Kraftwerk“, welches aus einem relativ großen Pool aus verschiedenen erneuerbaren Energien- und KWK-Anlagen besteht, sowohl am Minutenreserve- als auch am Sekundärreserve-Markt (vgl. Tab. 4-2). Die KWK- und BHKW-Anlagen werden über eine eigene Schnittstelle (e2m-Port) in die zentrale eigene Anlagensteuerung eingebunden und für Sekundärreserveangebote in Teillast betrieben, um alle Sekundärreserve-Anforderungen (s.o.)

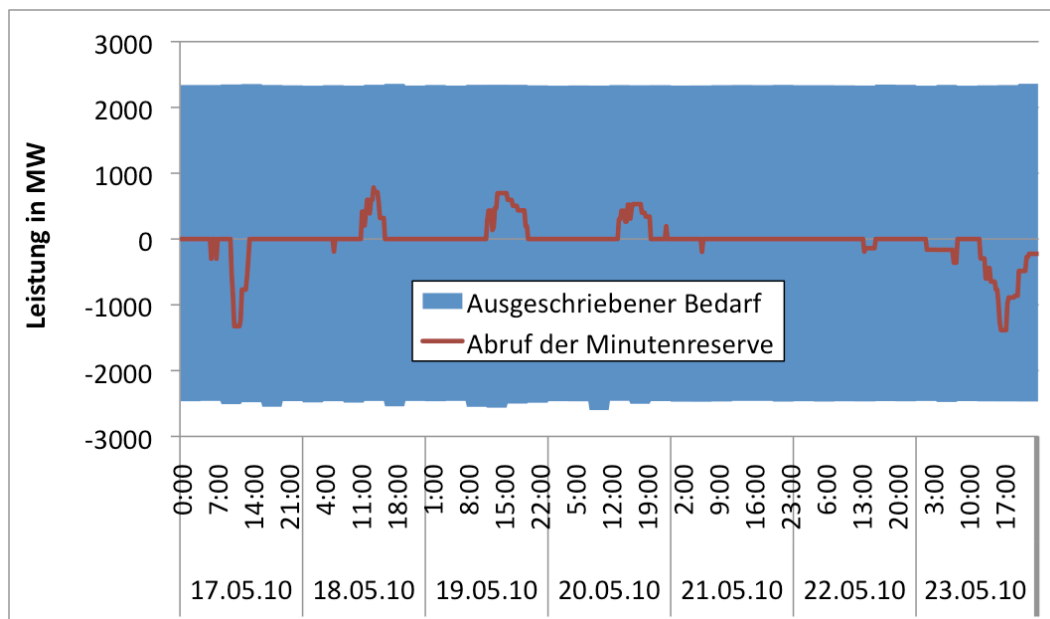
erfüllen zu können (Gerigk, U. 2012). Dabei handelt es sich in der Regel um größere Anlagen (ab ca. 100 kW_{el}) mit großen angeschlossenen Wärmesenken, wie sie insbesondere im Industrie- und Gewerbebereich und bei Wärmenetzen vorzufinden sind. Eine differenzierte Angebotsstrategie (Fokus auf Vorhaltung statt auf Abruf) hilft dabei die technisch-ökonomischen Belange der BHKW, d. h. möglichst wenige Leistungsänderungen, zu berücksichtigen.

Gleichwohl zeigt eine ergänzende Analyse der derzeitigen Marktakteure und neuen Geschäftsmodelle (siehe Kapitel 4.4), dass die meisten Anbieter und Modelle zur Zeit – mit Ausnahme des Anbieters e2m – auf einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt abzielen. Daher und aufgrund der zuvor genannten Gründe sowie des Analysefokuses auf BHKW im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich, beziehen sich die folgenden Untersuchungen sowie die Modellierungen ausschließlich auf den Minutenreservemarkt.

4.3 Minutenreservemarkt

Der Einsatz der Minutenreserve kann nicht prognostiziert werden, sondern wird je nach Situation angefordert. Die komplette Minutenreserve wird dabei nur in Ausnahmefällen aktiviert, zu den meisten Zeitpunkten wird die Minutenreserve nicht benötigt. Die Abb. 4-2 verdeutlicht diese Charakteristik an Hand einer Beispielwoche im Mai des Jahres 2010.

Abb. 4-2: Minutenreservееinsatz in Deutschland für eine Beispielwoche im Mai 2010

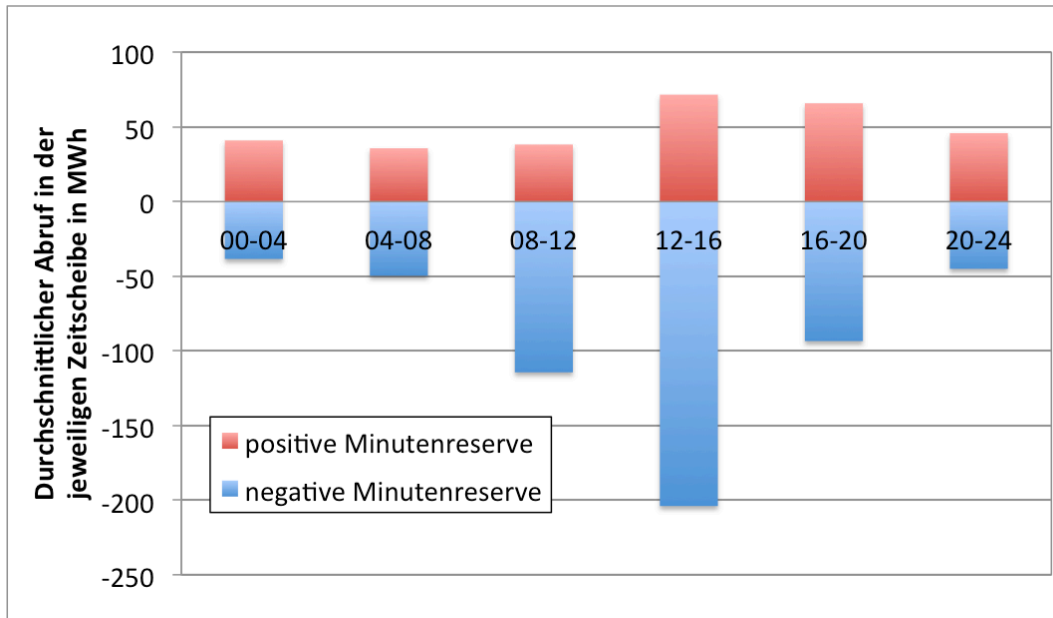


Quelle: Eigene Darstellung nach Veröffentlichungen der ÜNB zu Minutenreservееinsätzen und Daten zum Marktgeschehen (50 Hertz et al. 2011)

Auch wenn sich der Einsatz der Minutenreserve nicht vorhersagen lässt, so ist aus den Daten der letzten vier Jahre ersichtlich, dass die Aktivierung der Minutenreserve eher am Tage zu Zeiten der Lastspitzen stattfindet, denn dann haben Prognosefehler der Last von wenigen Prozentpunkten die absolut größte Auswirkung. Abb. 4-3 zeigt diesen Umstand für die mittlere eingesetzte Minutenreserve im Jahr 2010. Neben dem Abruf haben auch die Leistungs- und Arbeitspreise für Minutenreserve einen charakteristischen Tagesgang. In Zeiten hoher Last sind die Preise für positive Regelleistungsvorhaltung tendenziell hoch und für negative

Regelleistung niedrig. In lastschwachen Zeiten dreht sich das Bild, und die Preise für negative Minutenreserve steigen, wogegen die Preise für positive Minutenreserve sinken.

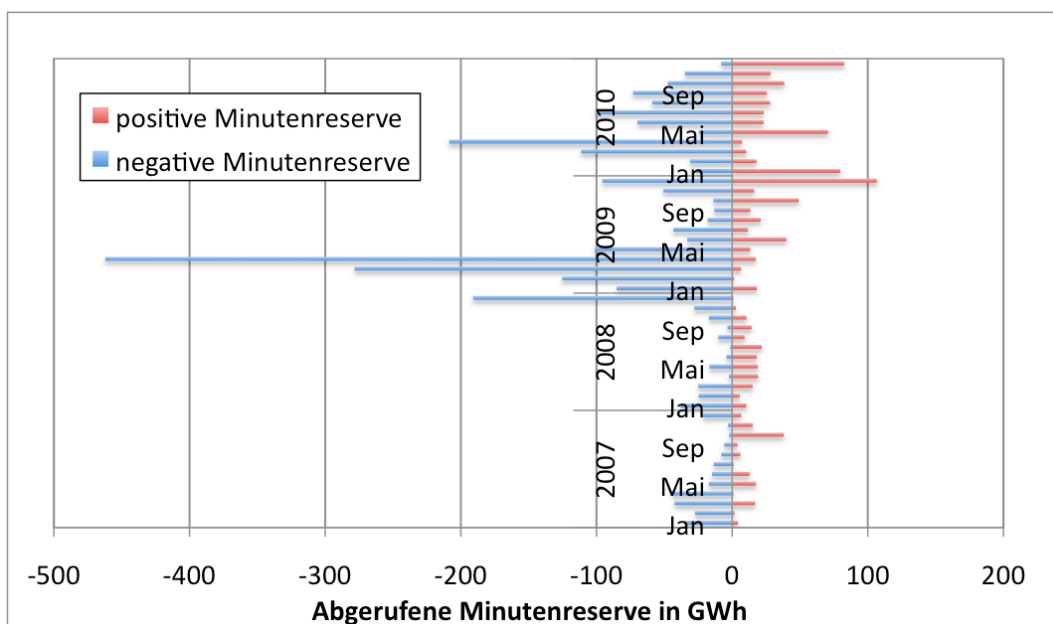
Abb. 4-3: Der mittlere Einsatz von Minutenreserve in jeder 4-Stunden Zeitscheibe des Jahres 2010



Quelle: (50 Hertz et al. 2011)

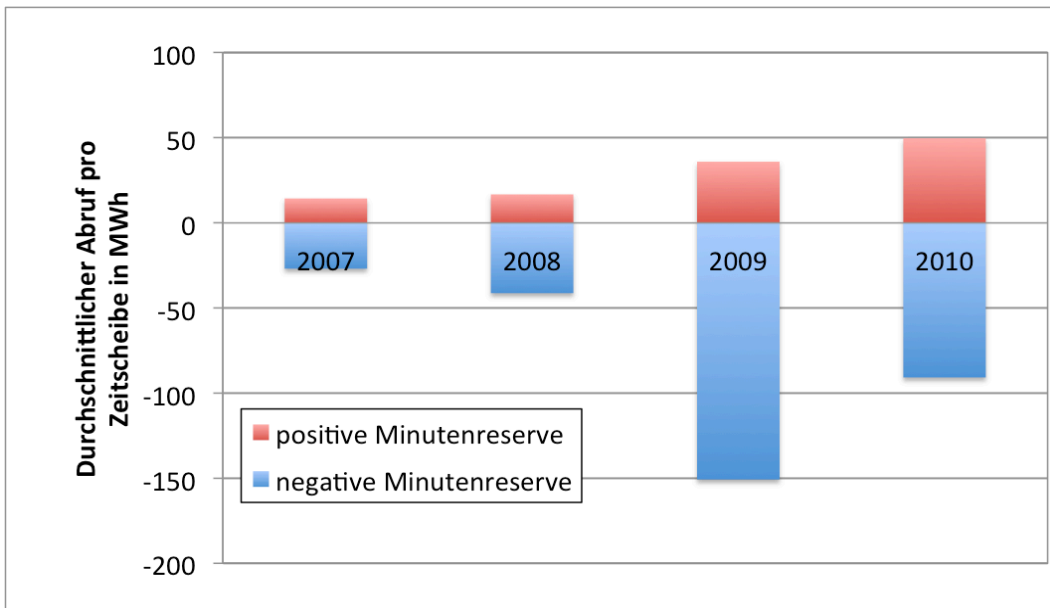
Wie Abb. 4-4 und Abb. 4-5 zeigen, hat der Abruf von Minutenreserve in den letzten Jahren zugenommen. Dabei fällt das erste Halbjahr 2009 aus dem Rahmen, in dieser Zeit wurde besonders umfassend negative Minutenreserve abgerufen.

Abb. 4-4: Entwicklung der abgerufenen monatlichen Minutenreserve



Quelle: (50 Hertz et al. 2011)

Abb. 4-5: Entwicklung der durchschnittlichen Abrufe der Minutenreserve von 2007 bis 2010

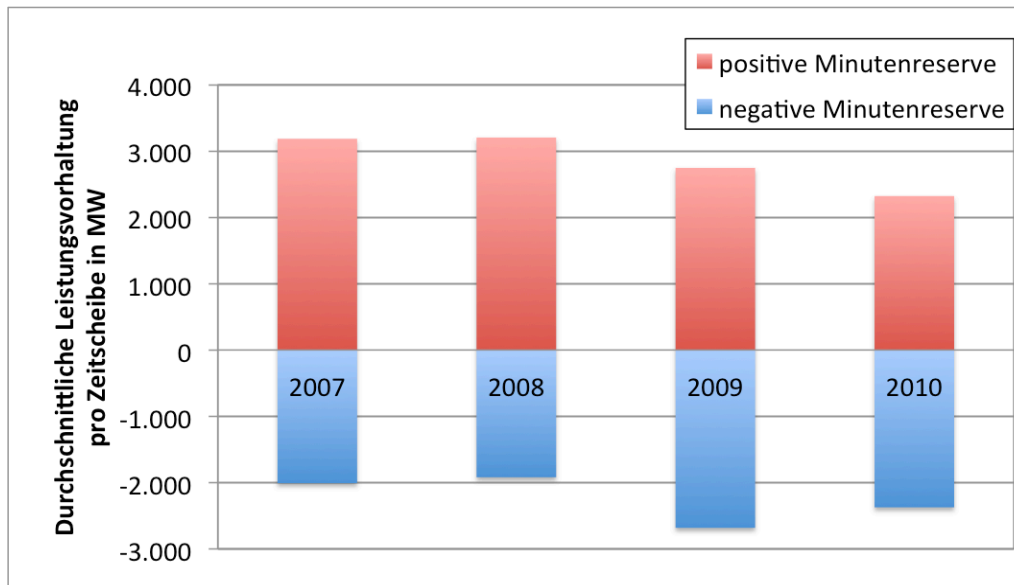


Quelle: (VDI Gesellschaft Energie und Umwelt 2008)

Die vorgehaltene positive Minutenreserve ist dagegen gefallen, im Jahr 2010 wurde gegenüber 2007 im Schnitt in jeder Zeitscheibe über 800 MW weniger Reserveleistung vorgehalten. Die Abb. 4-6 zeigt aber auch, dass die negative Vorhaltung von Minutenreserve in etwa konstant geblieben ist. Eine mögliche Ursache dieser Entwicklung ist die Einrichtung des Netzregelverbundes⁹ von drei Übertragungsnetzbetreibern ab Dezember 2008 und die Teilnahme aller vier ÜNB ab Mai 2010.

⁹ Der Netzregelverbund dient der Vermeidung von gegeneinander gerichteten Regelleistungsabrufen und einer gemeinsamen Beschaffung der Regelleistung für die unterschiedlichen Übertragungsnetzbetreiber. Er ist mit dem Beschluss BK6-08-111 der Bundesnetzagentur für alle ÜNB ab dem 31. Mai 2010 verpflichtend geworden.

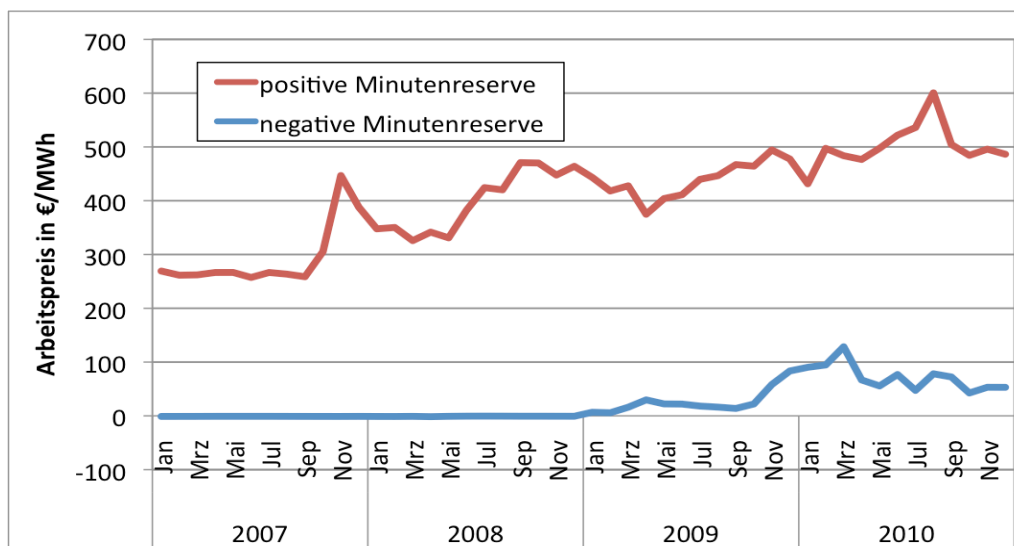
Abb. 4-6: Entwicklung der durchschnittlich vorgehaltenen Minutenreserveleistung von 2007 bis 2010



Quelle: (50 Hertz et al. 2011)

Eine detaillierte Analyse der Zahlen für einzelne Übertragungsnetzbetreiber legt den Schluss nahe, dass der sprunghafte Anstieg des Einsatzes von negativer Minutenreserve im ersten Halbjahr 2009 wahrscheinlich auf eine geänderte Strategie der Betriebsführung einzelner Übertragungsnetzbetreiber zurückzuführen ist. Mit einem Anziehen der Arbeitspreise für negative Minutenreserve (vgl. Abb. 4-7) im ersten Halbjahr 2009 wurde diese Betriebsstrategie wieder eingestellt. Erst seit Ende 2008 nimmt der Arbeitspreis für negative Minutenreserve im Durchschnitt positive Werte an. Zuvor lag der durchschnittliche Preis bei oder unter Null.

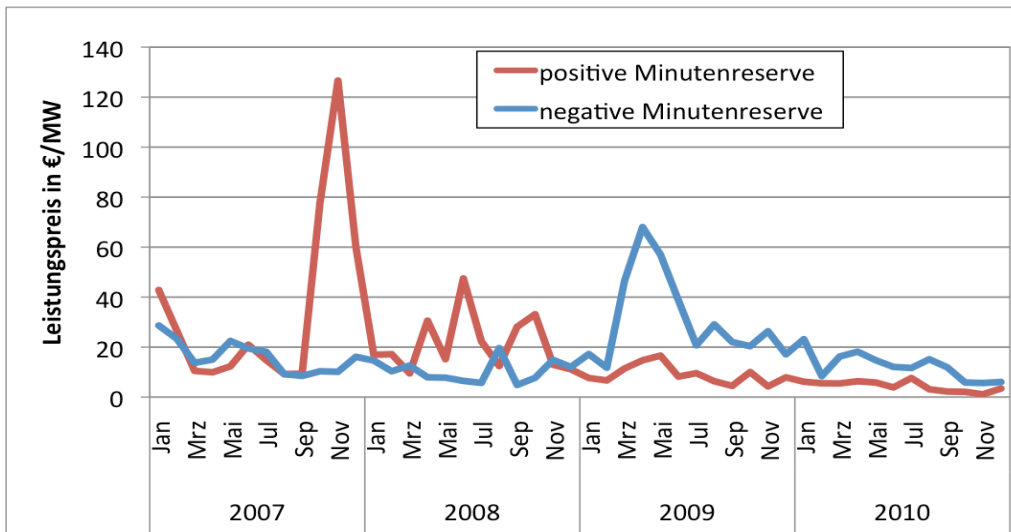
Abb. 4-7: Entwicklung der monatlich durchschnittlichen Arbeitspreise



Quelle: (50 Hertz et al. 2011)

Die Leistungspreise für die Bereitstellung von Minutenreserve sind in den letzten Jahren gesunken. Abb. 4-8 zeigt diese Entwicklung auf. Insgesamt ist die Preisentwicklung auf den Regelleistungsmärkten volatil und hohen Schwankungen ausgesetzt (vgl. Kapitel 9.1.6).

Abb. 4-8: Entwicklung der monatlich durchschnittlichen Leistungspreise



Quelle: (50 Hertz et al. 2011)

Aus den obigen Abbildungen wird zwar erkennbar, dass die Arbeitspreise für positive Minutenreserve die Preise für negative Regelleistung übersteigen, daraus lässt sich aber nicht schließen, dass die Bereitstellung für positive Regelleistung prinzipiell für den Einsatz von BHKW-Anlagen zu bevorzugen wäre. Bei einer ökonomischen Entscheidung über ein Angebot von positiver oder negativer Minutenreserve sind neben den Arbeitspreisen auch Leistungspreise und Abrufwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Zusätzlich können beim Einsatz von negativer Minutenreserve Brennstoffkosten eingespart werden, die fahrplanmäßig geplanten Energiemengen werden aber trotzdem geliefert. Beim Abruf von negativer Minutenreserve wird dem Anbieter der Regelleistung vorgegeben, seine Einspeisung zu reduzieren. Die Energiemenge, um die der Anbieter seine Einspeisung reduziert hat, wird dann bilanziell vom ÜNB an den Anbieter geliefert. Er kann seinen Fahrplan also mit verringerter eigener Produktion zu 100 % erfüllen.

4.4 Beispiele für BHKW-Pools am Minutenreservemarkt

Bei den vier großen Energieversorgungsunternehmen ist die Bereitstellung der Minutenreserve ein Teil der Kraftwerks-Optimierungsstrategie, welche durch konzerneigene Handelsabteilungen strukturiert wird (u.a. „RWE Supply & Trading GmbH“, „E.ON Energy Trading SE“, etc.). Sie verwenden dazu ihren gesamten Kraftwerkspark von konventionellen Kraftwerken über GuD und KWK-Anlagen bis hin zu Wasserkraftwerken und Kleinst-Erzeugungsanlagen. Demgegenüber stehen mehrere kleinere Anbieter wie Stadtwerke, regionale Versorger, Betreiber von Werkskraftwerken aus energieintensiven Branchen (z. B. Chemie- und Industrieparks) oder auch reine Vermarktungsunternehmen ohne eigene Kraftwerke. Stadtwerke oder Zusammenschlüsse von Stadtwerken können durch eine bessere Strukturierung ihrer Kraftwerksfahrpläne Zusatz Erlöse im Minutenreservemarkt erzielen (Trianel GmbH 2011). Neue Anbieter, teilweise reine Vertriebsunternehmen, setzen dagegen eher auf das Modell des „virtuellen Kraftwerks“ – ein informations- und regeltechnischer

Zusammenschluss von vielen verteilten, dezentralen Stromerzeugungsanlagen wie BHKW bzw. NEA10 zu einem ferngesteuerten „großen“ Kraftwerk. Diese virtuellen Kraftwerke (VKW) sind meist zugangsoffen, d. h. bei entsprechender technischer Qualifikation der Anlagen ist die Teilnahme an einem virtuellen Kraftwerk für jeden Betreiber möglich.

In der Tab. 4-8 wird ein Überblick über aktuelle, neue Geschäftsmodelle für das Angebot von Minutenreserve u.a. aus gepoolten KWK-Anlagen gegeben. Dabei gehören zwei der Akteure zu den vier großen Stromkonzernen, bei den anderen sieben handelt es sich überwiegend um relativ neue Akteure ohne Konzernzugehörigkeit. Drei der Modelle beschränken sich zunächst auf verschiedene Großstädte (Berlin, Hamburg, Leipzig und Frankfurt) und drei bis fünf bieten bereits bundesweit an. Die meisten Anbieter setzen auf die Vermarktung von fremden Anlagen und werben dafür in der Regel über eine Beteiligung an den möglichen Zusatzerlösen. Eigene Anlagen werden dagegen dezidiert nur von den Unternehmen Lichtblick und Mainova vermarktet. Insgesamt werden sowohl die Sektoren Industrie und Gewerbe als auch private Haushalte adressiert, wobei sich die Angebote bisher explizit häufiger auf Anlagen mit einer Leistung größer als 100 kW_{el} und damit die beiden ersten Sektoren beziehen als auf Anlagen mit kleinerer Leistung bzw. den Haushaltssektor.

Ergänzend werden exemplarisch kurz drei neue Anbieter von Minutenreserve aus BHKW und anderen Anlagen vorgestellt:

- Energy2Market betreibt ein „grünes Kraftwerk“ aus verschiedenen regenerativen Einspeisern, KWK- und BHKW-Anlagen, die über eine universelle, eigene Schnittstelle zentral angesteuert werden (energy2market 2012). Eine Besonderheit ihres Geschäftsmodells ist, dass sowohl Sekundär- als auch Minutenreserveleistung angeboten wird (siehe Seite 43).
- Die TeraJoule GmbH vermarktet seit kurzem negative Minutenreserve aus BHKW, die zusammen mit Biomasseanlagen ein virtuelles Kraftwerk bilden. Ein weiteres virtuelles Kraftwerk desselben Anbieters besteht aus Notstromaggregaten und wird nur für positive Regelleistung genutzt (TeraJoule Energy 2012).
- Das Unternehmen Next Kraftwerke¹¹ bietet die Einbindung von BHKW ab einer Leistung von ca. 200 kW_{el} in ihren Pool an, um damit Zusatzerlöse via Direktvermarktung bzw. Einsatz am Regelleistungsmarkt zu generieren. Für die nötige Ausstattung der BHKW mit „intelligenter“ Fernwirktechnik wird ein Contracting-Modell angeboten, wonach die Anschaffung der standardisierten eigenen Fernwirktechnik an die Teilnahme am Next-Pool gebunden und darüber vorfinanziert wird. Die künftigen Erlöse am Minutenreservemarkt werden dann damit verrechnet (Next Kraftwerke 2012).

¹⁰ Netzersatzanlagen

¹¹ Eine Ausgründung aus dem Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln (EWI).

Tab. 4-8: Übersicht über geplante und bestehende Geschäftsmodelle für die Vermarktung von KWK u.a. am Minutenreservemarkt

Akteur Modell / Name	Ziele Status quo	Einsatzgebiet BHKW-Spezifikationen	Quelle
Lichtblick AG Schwarmstrom, „ZuhauseKraftwerk“	100.000 Einheiten (ohne Zeitangabe) Präqualifikation für Regelleistungsmarkt Derzeit rd. 500-600 Anlagen; Start Regelleistungsangebote in der zweiten Hälfte 2013 geplant	Hamburg, Berlin, Leipzig, Ruhrgebiet VW-Mini-BHKW „EcoBlue“- Modell, 19kW _{el}	(Lichtblick AG 2011) (Kampwirth, R. 2012)
Mainova, ABGnova Modellprojekt „Virtuelles Kraftwerk“	Verbesserung der BHKW-Nutzung VKW1 mit NEA2 und 2xBHKW à 34kW _{el}), langfristig 170 BHKW- Anlagen (2011); Start des VKW im April 2012 mit 10 BHKWs	Frankfurt Bestehende BHKW und elektrische Verbraucher integrierbar, unabhängig von Typ und Hersteller	(Utesch 2011) (Utesch, Bernd 2012)
Vattenfall Europe Wärme AG Pilotprojekt „Virtuelles Kraftwerk“	VKW aus Mini-BHKW und WP3: 100.000 (200.000) versorgte WE4 bis 2011 (2013) 100 BHKW mit insg. 50MW _{el} (Ende 2011); Seit Nov. 2011 auch Teilnahme am SR-Markt möglich	Berlin Eig. „VHP-ready“-Standard, BHKW von SES, Senertec und WP von Stiebel Electron	(Balzer o. J.) (energate/e21.in fo 2012)
Next Kraftwerke „Next Pool“	Erlössteigerung durch Bereitstellung von Regelernergie und Direktvermarktung Status: nicht bekannt	Bundesweit KWK mit mind. 200 kW	(Next Kraftwerke 2012)
TeraJoule Energy „Virtuelles Kraftwerk“	Ausbau von Pool und Dienstleistungen Start mit NEA; präqualifiziert für den Minutenreservemarkt	Vermutlich bundesweit Bio-/Deponiegas-BHKW und Biomasseheizkraftwerke	(Terajoule Energy 2012)
Energy2market ViNEA- Kraftwerkspool	Ausbau von Pool und Dienstleistungen präqualifiziert für den Minuten- und Sekundärreservemarkt	Vermutlich bundesweit Erneuerbare Energien, Deponiegas und KWK	(energy2market 2012)

Bemerkungen: ¹Virtuelles Kraftwerk, ²Netzersatzanlage, ³Wärmepumpe, ⁴Wohneinheit

4.5 Zusammenfassung: Analyse Regelleistungsmärkte

Der Regelleistungsmarkt ist in drei Teilmärkte für Primär-, Sekundär- und Minutenreserve aufgeteilt. Diese werden durch die Bundesnetzagentur reguliert und zeichnen sich durch zum Teil sehr unterschiedliche organisatorische und technische Anforderungen hinsichtlich Zugang und Teilnahme zu den Märkten aus. Sie sind am höchsten für die Primärreserve und am geringsten für die Minutenreserve. Daher eignet sich der Minutenreservemarkt grundsätzlich am besten für neue Anbieter. Er weist dementsprechend auch die meisten (neuen) Teilnehmer auf, der Primärreservemarkt dagegen die kleinste Teilnehmerzahl. Neue Geschäftsmodelle für virtuelle KWK-Regelkraftwerke zielen daher bisher in den meisten Fällen auf den Minutenreservemarkt, in einem Fall jedoch auch auf die Teilnahme von großen BHKW am Sekundärreservemarkt. Die Geschäftsmodelle unterscheiden sich hinsichtlich des gewählten Einsatzgebietes (wenige Großstädte oder Deutschland), der Anwendungsbereiche (Industrie, Gewerbe und Haushalte) und der entsprechend adressierten KWK-Anlagengröße.

Die anforderungsscharfe Analyse der Vereinbarkeit von KWK-Eigenschaften mit den geltenden Anforderungen für den Zugang und die Teilnahme an den Regellenergiemärkten zeigt, dass derzeit die Primärreserve nicht und die Sekundärreserve nur bedingt in Frage kommt. Die Hürden sind bei der Sekundärreserve geringer als bei der Primärreserve. Aus diesem Grund und zudem in guter Übereinstimmung mit den bestehenden Marktstrukturen wird allein der Minutenreservemarkt für die vertiefende Marktanalyse und die Ermittlung des Regelleistungspotenzials durch die später folgende Modellierung ausgewählt.

Die Analyse des Minutenreservemarktes für den Zeitraum 2007 bis 2010 zeigt, dass

- der ausgeschriebene Bedarf positiv wie negativ eine relativ konstante Größe ist und innerhalb eines Jahres im Mittel deutlich über der tatsächlich abgerufenen Minutenreserve liegt (siehe Abb. 4-2),
- die Aktivierung der Minutenreserve eher am Tage zu Zeiten der Lastspitzen stattfindet (siehe Abb. 4-3),
- der Abruf von Minutenreserve im betrachteten Zeitraum zugenommen hat, wobei zwischenzeitlich, im ersten Halbjahr 2009 sehr viel negative Minutenreserve abgerufen wurde (siehe Abb. 4-4 und Abb. 4-5),
- die vorgehaltene positive Minutenreserve im Zeitverlauf gefallen ist, während die negative Vorhaltung von Minutenreserve dagegen in etwa konstant geblieben ist (siehe Abb. 4-6),
- die Arbeitspreise für die Minutenreserve in diesem Zeitraum trotz Schwankungen insgesamt gestiegen sind, wobei die Preise für die positive Minutenreserve durchgängig deutlich (und mit zunehmenden Abstand) über denen für die negative Minutenreserve und diese ohnehin erst seit dem Jahr 2009 über Null liegen (siehe Abb. 4-7),
- die Leistungspreise für die Bereitstellung von Minutenreserve dagegen in den letzten Jahren trotz hoher Schwankungen insgesamt gesunken sind (siehe Abb. 4-8).

5 Annahmen und Parameter

Für die Modellberechnungen und Potenzialanalysen werden folgende Informationen benötigt, deren Abgrenzung und Bestimmung in den folgenden Kapiteln näher beschrieben wird:

- Entwicklung der installierten elektrischen Leistung in BHKW in Deutschland von 2010 bis 2030 zur Hochrechnung der Potenziale von der Anlagenebene auf die nationale Bestandesebene (siehe Kapitel 5.1).
- Wärmebedarfsprofile für die betrachteten Anwendungsfälle und Versorgungsobjekte als jederzeit einzuhaltende Randbedingung bei der Optimierung der KWK-Betriebsweisen (siehe Kapitel 5.2).
- KWK-Anlage: Elektrische und thermische Leistung, thermische Leistung des Spitzenkessel, Volumen des Wärmespeichers, Vor- und Rücklauftemperatur am Ein- und Ausgang des Wärmespeichers als technische Randbedingungen für die Optimierung (siehe Kapitel 5.3).
- Entwicklung der Versorgungsobjekte (Anzahl und Wärmebedarf) von 2010 bis 2030.
- Angebots- und Abrufcharakteristiken/-daten im Tagesverlauf am Minutenreservemarkt als Eingangsparameter für die Optimierung (siehe Kapitel 4.3).

Als relevante Anwendungsfelder für die BHKW werden folgende vier Bereiche untersucht:

- a) Wohngebäude (10 Typen),
- b) Nichtwohngebäude (5 Typen),
- c) Wärmenetze (1 Fallbeispiel) und
- d) Industrie (2 Fallbeispiele).

Für jeden dieser Bereiche werden konkrete Versorgungsobjekte ausgewählt, deren Wärmebedarfsprofile bestimmt und dafür jeweils passende, kommerziell verfügbare KWK-Anlagen ausgelegt (inkl. Spitzenkessel und ggf. Speicher). Dabei kann der Wohn- und der Nichtwohngebäudebereich über die Ableitung von „repräsentativen“ Typen auch als Sektor quantitativ analysiert werden, während dies aufgrund des exemplarischen Charakters der Versorgungsobjekte für die anderen beiden Bereiche nicht möglich ist.

5.1 Szenario-Entwicklung von BHKW in Deutschland bis zum Jahr 2030

Zu Beginn des Projektes¹² wurde zusammen mit dem Auftraggeber eine Szenariostudie als Grundlage für die weiteren Analysen ausgewählt. Dabei handelt es sich um den Schlussbericht zum mehrjährigen Forschungsvorhaben „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ (EE-Langfristszenarien 2011) im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU 2012). Grund für die Auswahl war, dass sich diese Studie im Vergleich zu anderen aktuellen nationalen Energieszenarien durch eine besonders hohe Differenzierung des KWK-Sektors

¹² Auftaktveranstaltung am 21.01.11 in Dessau

inklusive BHKW auszeichnet. Verwendet wurde ein vorläufiger Datensatz für das Szenario A (Stand November 2011), der dem Auftragnehmer freundlicherweise von einem der Studienbearbeitern (Gerhardt 2011) über den Auftraggeber (Schneider 2011) zur Verfügung gestellt wurde. Der verwendete vorläufige Datensatz unterscheidet sich allerdings nur unwesentlich von dem endgültigen Datensatz der veröffentlichten EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012).

In den EE-Langfristszenarien 2011 werden drei „Hauptszenarien“ (A, B und C) sowie zwei Nebenszenarien (A' und THG 95) betrachtet. Die Unterschiede bei den Hauptszenarien betreffen im Wesentlichen die unterschiedliche Nutzung von EE-Strom, EE-Wasserstoff und den Verkehrssektor. Demnach wird in Szenario B der EE-Wasserstoff methanisiert und direkt ins Erdgasnetz eingespeist und in Szenario C wird für den Verkehrssektor keine Wasserstoffnutzung angenommen, sondern vollumfänglich auf Strom als Antrieb gesetzt. Das Nebenszenario A' nimmt für die Umsetzung der Stromsparziele einen anderen Verbraucherbezug an und das THG 95 zielt auf eine Reduzierung der Treibhausgas um 95 % im Vergleich zu 1990.

Die Entwicklung der KWK und BHKW ist von den unterschiedlichen Annahmen jedoch kaum betroffen und unterscheidet sich demnach in den verschiedenen Szenarien nur wenig voneinander. Das Szenario A wird als Haupt- bzw. Referenzszenario angesehen und wurde daher als Grundlage für den Entwicklungspfad der BHKW für den hier betrachteten Zeitraum 2010-2030 ausgewählt.

Der KWK-Sektor wird in den EE-Langfristszenarien 2011 differenziert nach verschiedenen Anwendungsbereichen (s.u.), Anlagentechniken (HKW, BHKW, Geothermie und Brennstoffzellen), Anlagengrößen ($< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$) sowie eingesetzten Energieträgern¹³ dargestellt und insgesamt in folgende vier Kategorien eingeteilt (Gerhardt 2011):

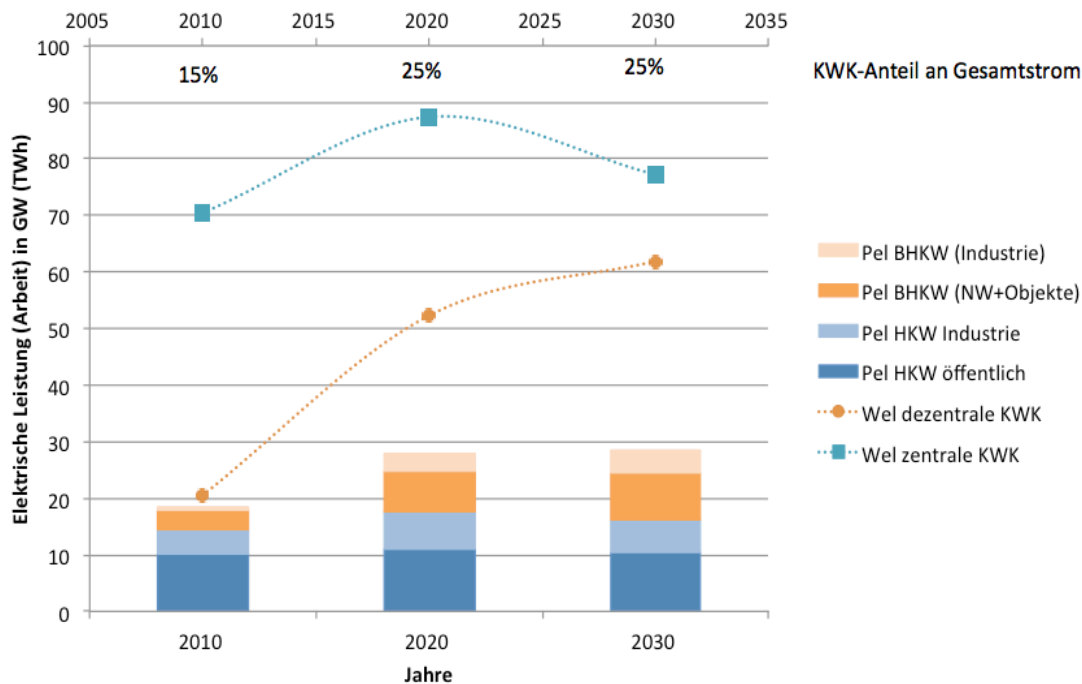
- Öffentliche KWK (öffentliche Fernwärme, große HKW)
- Öffentliche Nah- und Fernwärme (BHKW $> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$)
- Objektversorgung (BHKW $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$)
- Industrielle KWK (HKW und BHKW).

Diese Differenzierung bietet die Möglichkeit gemäß dem Szenario auch quantitativ zwischen zentraler KWK und BHKW zu unterscheiden. Demnach gehören die o.g. Kategorien „Öffentliche Nah-/Fernwärme“ und „Objektversorgung“ sowie die „Industrie-BHKW“ zum betrachteten BHKW-Bereich, während die „öffentliche KWK“ und die „industriellen HKW“ dagegen zur „zentralen“ KWK gezählt werden können, die hier nicht betrachtet wird.

13 Fossile Energieträger: Braunkohle, Steinkohle, Müll, Erdgas; Regenerative Energieträger: feste Biomasse (Holz), flüssige Biomasse (Pflanzenöl), gasförmige Biomasse (Biogas und -methan), Geothermie; Sonstige: Müll, Klär- und Deponiegase. Bei Anlagen, die an das Erdgasnetz angeschlossen sind, wird nach Erdgas- und Biomethan-Anteilen differenziert.

Somit ergibt sich aus der Studie „EE-Langfristszenarien 2011“ (BMU 2012) die in Abb. 5-1 gezeigte Entwicklung für den hier betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2030 für zentrale KWK und BHKW in Deutschland. Die gesamte Stromerzeugung aus KWK steigt daher bis zum Jahr 2020 sowohl zentral als auch dezentral stark an (um insg. etwa 50 Mrd. kWh_{el} auf rd. 140 Mrd. kWh_{el}) und erreicht damit den politisch angestrebten Anteil von 25 Prozent an der gesamten Nettostromerzeugung. Anschließend sinkt jedoch die Stromerzeugung aus zentraler KWK (hauptsächlich Industrie) um etwa 10 Mrd. kWh_{el}, während diejenige aus BHKW um etwa den gleichen Betrag weiter ansteigt und damit den Stromerzeugungsanteil konstant bei etwa 25 % hält. Die Bedeutung der BHKW wächst im Betrachtungszeitraum im Vergleich zur zentralen KWK deutlich, ausgedrückt in Anteilen an der gesamten KWK-Stromerzeugung von 22 % im Jahr 2010 auf 45 % im Jahr 2030.

Abb. 5-1: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung und der Stromerzeugung aus zentraler KWK und BHKW (inkl. Anteil an der gesamten Bruttostromerzeugung) von 2010 bis 2030 gemäß der EE-Langfristszenarien 2011



Quelle: (Schneider 2011)

Tab. 5-1: Vorläufiges Mengengerüst BHKW der EE-Langfristszenarien 2011 als Datenbasis für die Potenzialanalysen

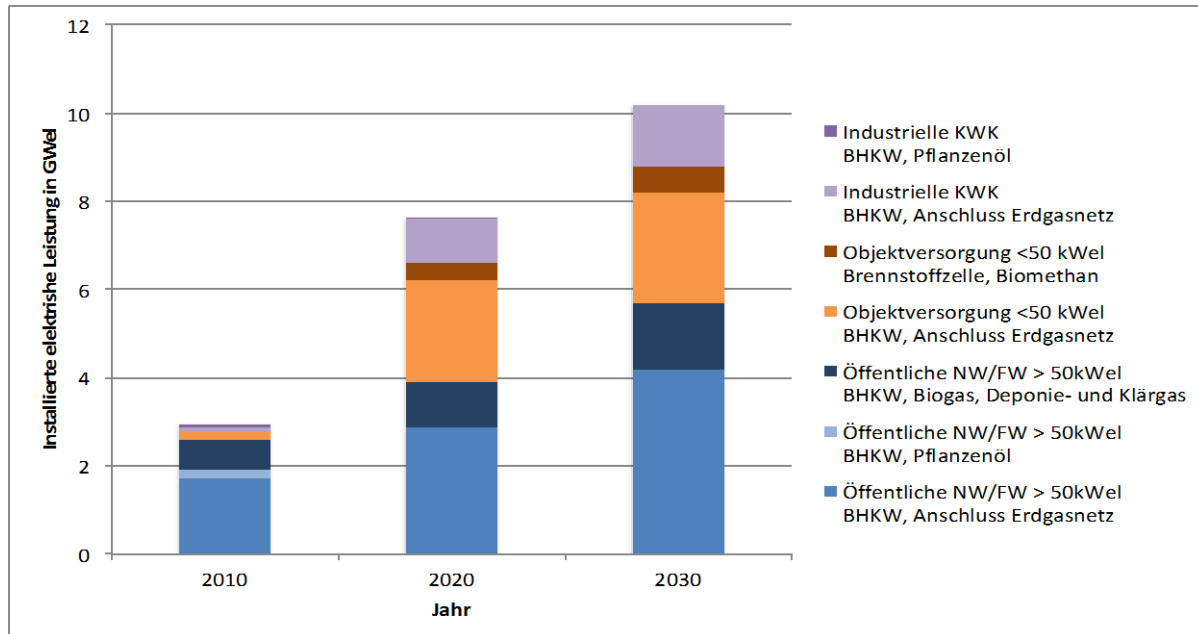
	2010	2020	2030
	Installierte elektrische Leistung [GW _{el}]		
Öffentliche Nah- und Fernwärme, BHKW > 50 kW _{el}	2,6	3,9	5,7
- BHKW, Anschluss Erdgasnetz	1,7	2,9	4,2
- BHKW, Pflanzenöl	0,2	0,0	0,0
- BHKW, Biogas, Deponie- und Klärgas	0,7	1,0	1,5
Objektversorgung, < 50 kW _{el}	0,2	2,7	3,1
- BHKW, Anschluss Erdgasnetz	0,2	2,3	2,5
- BHKW, Pflanzenöl	0,0	0,0	0,0
- Brennstoffzelle, Biomethan (Biogas + Bio-SNG)	0,0	0,4	0,6
Industrielle BHKW	0,2	1,1	1,4
- BHKW, Anschluss Erdgasnetz	0,1	1,0	1,4
- BHKW, Pflanzenöl	0,0	0,0	0,0
BHKW insgesamt	3,0	7,7	10,3

Bemerkung: SNG=Synthetic Natural Gas

Quelle: (Schneider 2011)

Die zugehörigen Entwicklungen von installierter elektrischer Leistung und Stromerzeugung innerhalb des BHKW-Sektors sind der besseren Übersichtlichkeit in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt. Die Abb. 5-2 zeigt die Entwicklung der installierten Leistung differenziert nach den drei Anwendungsbereichen und nach Energieträgern. Hiernach kommt es bei allen Anwendungen und besonders bei den ans Erdgasnetz angebundenen KWK-Anlagen zu nennenswerten Zuwächsen. Pflanzenöl als Energieträger hat dagegen den geringsten Anteil und wird ab dem Jahr 2020 nicht mehr für BHKW eingesetzt. Neben dem weiterhin dominanten Anwendungsbereich öffentlicher Nah- und Fernwärme auf Erdgasbasis (57 % in 2010 und 41 % in 2030) gewinnen besonders die kleinen Anlagen (< 50 kW_{el}) für die Objektversorgung (25 % in 2030) als auch die industriellen KWK (14 % in 2030) – beide ebenfalls mit Anschluss ans Erdgasnetz – an Bedeutung. Ab dem Jahr 2020 gelangen gemäß Leitstudie zudem mit Biomethan betriebene Brennstoffzellen für die Objektversorgung in den Markt und erreichen im Jahr 2030 einen Anteil von etwa 15 % an den in der Objektversorgung installierten KWK-Anlagen und 6 % an allen BHKW. Diese sind wegen ihrer hohen SKZ und ihrem hohen elektrischen Wirkungsgrad besonders interessant für einen strom- bzw. netzgeführten Betrieb.

Abb. 5-2: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung von BHKW zwischen 2010 und 2030 nach verschiedenen Anwendungsbereichen und Energieträgern gemäß vorläufiger Daten aus den EE-Langfristszenarien 2011



Quelle: (Schneider 2011)

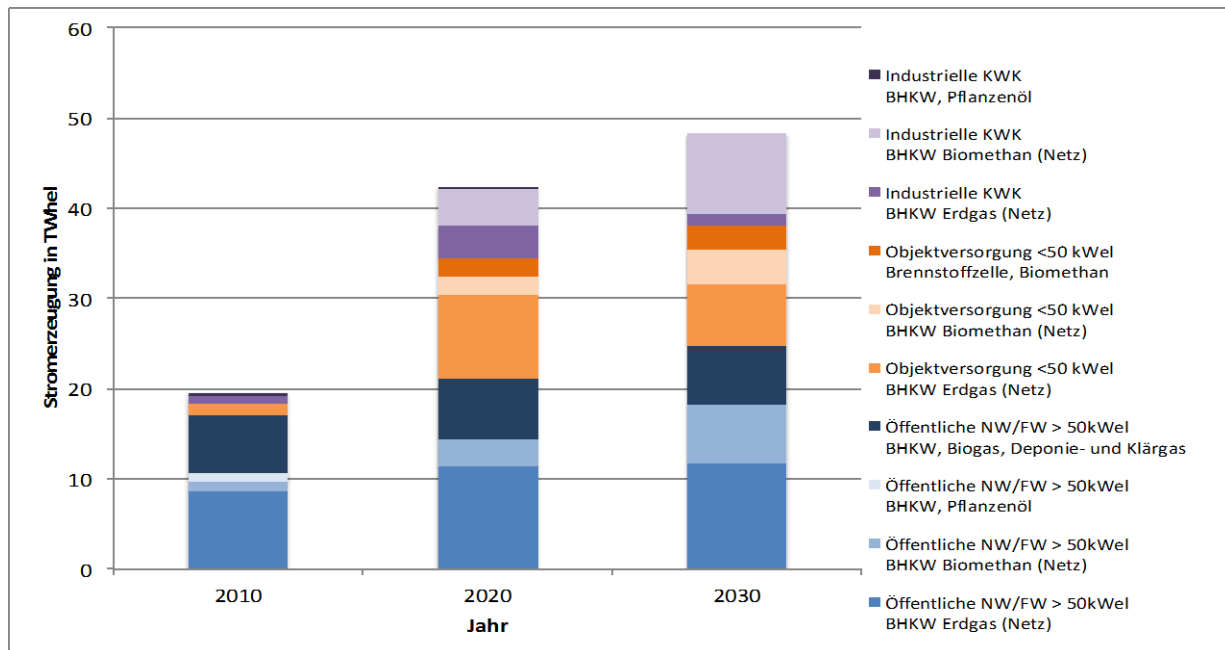
Die Abb. 5-3 lässt erkennen, dass die Stromerzeugung aus BHKW im gleichen Zeitraum weniger stark steigt als die installierte elektrische Leistung. Das ist – gemäß den vorläufigen Daten der EE-Langfristszenarien 2011 – maßgeblich durch sinkende Volllaststundenzahlen der KWK-Anlagen zu erklären. Der Rückgang bis zum Jahr 2030 beträgt für die nicht industriellen BHKW 24 %, im Fall der Biogas-BHKW an Wärmenetzen sogar 50 % und im Fall der Industrie BHKW 5 %. Der Hintergrund dafür dürfte darin liegen, dass in den EE-Langfristszenarien 2011 angenommen wird, dass KWK-Anlagen ab dem Jahr 2020 nicht mehr wärmegeführt, sondern stromgeführt und flexibilisiert eingesetzt werden. Dafür wurde unterstellt, dass bezogen auf die Wärmehöchstlast eine größere Anlagen- und Speicherdimensionierung¹⁴ stattfindet sowie elektrische Heizer für die Aufnahme von überschüssigem EE-Strom eingesetzt werden. Die Speicherauslegung wird für den Bereich der öffentlichen Versorgung um den Faktor 3 (2020) bis 5 (2030) im Vergleich zur Auslegung im Jahr 2010 vergrößert. Im industriellen Bereich werden zwecks Flexibilisierung ab dem Jahr 2020 erst Speicher in der Größe von drei Stunden (und fünf in 2030) bezogen auf die Engpassleistung unterstellt. Steigende SKZ sorgen aber auf der anderen Seite dafür, dass die Stromerzeugung aus den KWK-Anlagen nicht im gleichen Maße zurückgeht wie der Wärmeerzeugung (BMU 2012).

Der zuvor geschilderte Ausbaupfad von BHKW in Deutschland gemäß den EE-Langfristszenarien 2011 stellt unter den angenommenen Bedingungen zwar eine mögliche

¹⁴ Dabei bleibt offen, ob Anlage und Speicher in gleichem Umfang erhöht werden oder ob der Speicher im Vergleich zur Anlage überproportional größer dimensioniert wird. Letzteres hätte ein größeres Potenzial zur Folge.

Entwicklung dar, sie ist jedoch angesichts des sehr starken Zubaus bereits bis zum Jahr 2020 aus heutiger Sicht als sehr ambitioniert anzusehen. Dies ist bei der Interpretation der Hochrechnungen von Minutenreserve-Potenzialen (siehe Kapitel 7.2f) und CO₂-Emissionen (siehe Kapitel 8) zu berücksichtigen.

Abb. 5-3: Entwicklung der Stromerzeugung aus BHKW zwischen 2010 und 2030 nach verschiedenen Anwendungsbereichen und Energieträgern gemäß vorläufiger Daten der EE-Langfristszenarien 2011



Quelle: (Schneider 2011)

5.2 Wärmebedarfsprofile und BHKW-Auslegung

5.2.1 Wärmebedarfsprofile

Für die Bestimmung der Wärmebedarfsprofile¹⁵ der betrachteten Versorgungsobjekte werden entweder Messdaten bzw. synthetische Profile sowie meteorologische Daten benötigt. Messdaten lassen eine konsistente und gute Analyse auf der Objektebene zu, ermöglichen aber bei geringer Grundgesamtheit oder fehlenden Zusatzinformationen keine hinreichend genauen Rückschlüsse auf ihre „Repräsentativität“. Hochrechnungen von Ergebnissen auf die Bestandsebene sind daher mit unbekannten Fehlern behaftet. Synthetische Profile eignen sich dagegen, wenn sie empirisch gut belegt sind, sehr gut für Bestandsanalysen und Hochrechnungen, aber nur bedingt für genaue Rückschlüsse und Analysen auf konkreter Anlagen- und Objektebene.

Da die Auswahl an verfügbaren Messdaten und synthetischen Profilen ohnehin klein ist, wird vorrangig auf Konsistenz bei der Datengrundlage geachtet. Für die vielen Wohngebäude- und Nichtwohngebäudetypen werden daher die synthetischen Gasprofile des BDEW sowie

¹⁵ Stündlicher Verlauf des Wärmebedarfs pro Tag, Woche bzw. Jahr.

meteorologische Daten des DWD zugrunde gelegt. Für die einzelnen Fallbeispiele von Industrie- und Wärmenetz-KWK werden die zur Verfügung gestellten individuellen Profile genutzt. Diese werden daher in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 zusammen mit der Auslegung dargestellt.

5.2.2 Meteorologische Datenbasis

Höhe und Verlauf des Wärmebedarfs eines Gebäudes sind neben technischen und nutzerspezifischen Faktoren maßgeblich von verschiedenen meteorologischen Faktoren abhängig. Dazu gehören Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Das hier genutzte Vorgehen zur Generierung von Wärmebedarfsprofilen (siehe Kapitel 5.2.3) benötigt Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (Außentemperatur), welche die für die Auslegung von Heizungsanlagen wichtigste meteorologische Größe ist.

Da das Potenzial der Regelleistungsbereitstellung aus BHKW ex-post anhand des Anlageneinsatzes in ausgewählten Jahren bestimmt wird, sind meteorologische Datensätze in geeigneter zeitlicher und räumlicher Auflösung für ein gesamtes Jahr notwendig. Als geeignete meteorologische Datenbasis wurden die Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (Christoffer et al. 2004) gewählt. Dabei handelt es sich um zusammengesetzte Datensätze, die einen mittleren, aber für eine bestimmte Region typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Die Datensätze beruhen auf Messungen aus den Jahren 1988 bis 2007. Für die Bestimmung typischer Jahresganglinien werden diese Messwerte nicht gemittelt, sondern die Daten einzelner Zeitabschnitte so zusammengefügt, dass die Charakteristik des Witterungsverlaufs erhalten bleibt. Der Mittelwert dieser synthetischen Zeitreihen entspricht dem langjährigen Mittel.

Zusätzlich zu diesen typischen (mittleren) Jahresverläufen werden Datensätze für jeweils ein Jahr mit einem überdurchschnittlich warmen Sommer und einem kalten Winter bereitgestellt. Bei diesen Messreihen handelt es sich um reale Jahreszeiträume. Durch diese Varianten werden Aussagen zur Sensitivität der Modellierung bezüglich der meteorologischen Datenbasis möglich.

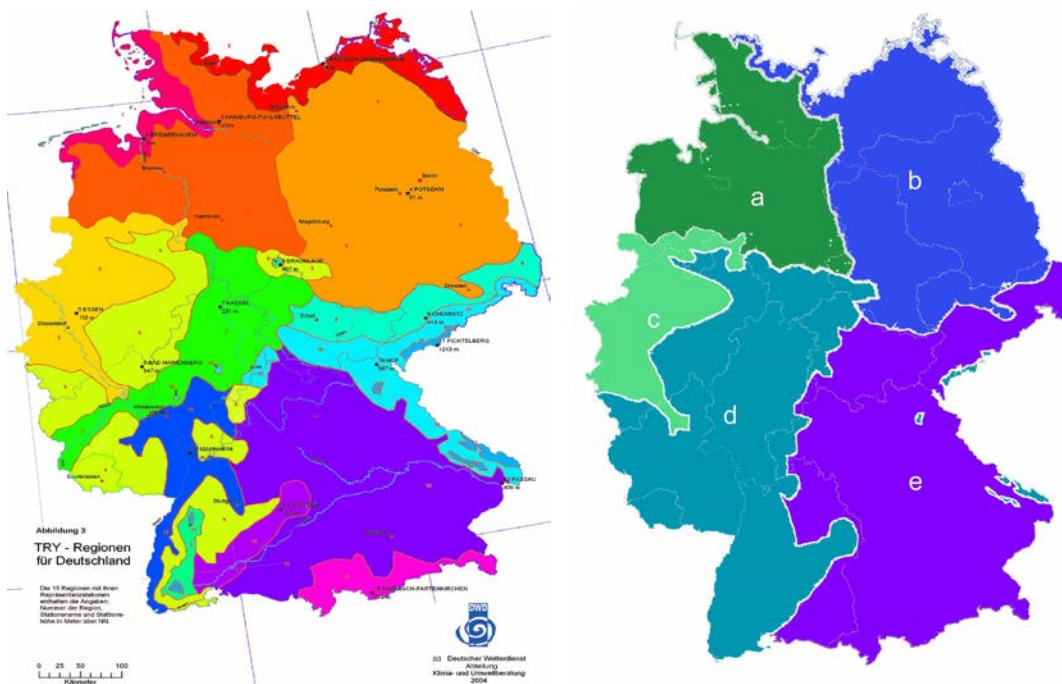
Die TRY sind in 15 Klimazonen aufgeschlüsselt. Die Struktur der Modellierung erfordert ein Teilmodell für jeden der zehn Gebäudetypen in jeder Klimazone. Daraus ergeben sich 150 Teilmodelle. Um handhabbare Rechenzeiten und eine bessere Übersichtlichkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde im Rahmen dieses Projektes die Anzahl der verwendeten Klimazonen verringert.

Im ersten Schritt erfolgte eine Reduzierung der Anzahl der Klimazonen von 15 auf fünf, indem die zehn Klimazonen (1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14 und 15) mit den wenigsten Einwohnern jeweils den fünf stärker besiedelten Klimazonen (3, 4, 5, 6 und 13), die ihnen in ihrer Temperatur-Charakteristik am besten ähneln, zugeordnet werden. Zur Beurteilung dieser Übereinstimmungen werden die Korrelation der Temperaturverläufe, der Unterschied der Temperaturjahresmittelwerte und die geografische Lage der Zonen herangezogen. Dabei werden die Ähnlichkeit der Temperaturverläufe und die mittlere Temperatur stärker gewichtet als die räumliche Nähe.

Mit diesem Vorgehen werden die 15 Klimazonen (1 bis 15) der TRY zu fünf zusammengefassten Klimazonen (a bis e) aggregiert. Anschließend werden die Temperaturzeitreihen für die aggregierten Klimazonen berechnet. Dafür wird zunächst die mittlere Jahrestemperatur der

zusammengefassten Klimazonen bestimmt, indem der Mittelwert der Durchschnittstemperaturen der beteiligten Klimazonen mit den Bevölkerungszahlen dieser Klimazonen gewichtet wird. Diese Gewichtung wird vorgenommen, da für die Verteilung der KWK-Anlagen nicht die Fläche, sondern die Anzahl der Gebäude in der betrachteten Klimazone relevant ist. Anschließend wird die Temperaturreihe der als Basis genutzten TRY-Klimazone so skaliert, dass die resultierende Jahresmitteltemperatur der in der aggregierten Klimazone entspricht. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Zusammenfassung der Klimazonen mit einem möglichst minimalen Verlust an Differenzierungsgrad. Die Abb. 5-4 zeigt die Zuordnung der 15 Klimazonen der TRY zu den fünf in der Modellierung verwendeten Klimazonen.

Abb. 5-4: Klimazonen der TRY (links) und Zusammenfassung zu 5 Klimazonen (rechts)



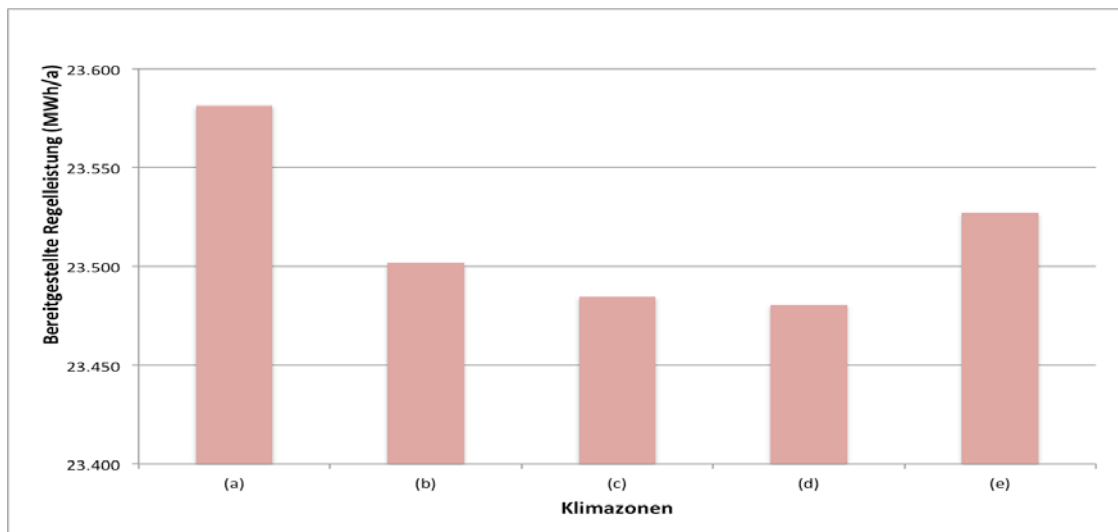
Quelle: eigene Darstellung nach (Christoffer et al. 2004)

Um zu prüfen, ob eine weitere Zusammenfassung der Klimazonen möglich ist, wurden im nächsten Schritt erste Testrechnungen zum Regelleistungspotenzial mit einer vorläufigen Modellversion durchgeführt. Dafür wurde das Teilmodell des Wohngebäudetyps 1 (Altbau Einfamilienhaus, siehe Kapitel 5.2.3) genutzt, da dieser Gebäudetyp die höchste Sensitivität gegenüber Temperaturänderungen zeigt. Es wurden Rechnungen zur potenziellen Regelleistungsbereitstellung in den fünf Klimazonen durchgeführt und in allen Rechnungen die gleiche Anlagenkonfiguration und der gleiche Jahresenergiebedarf genutzt.

Die Abb. 5-5 zeigt die Ergebnisse dieser Testrechnung.¹⁶ Die errechnete Regelleistungsbereitstellung unterscheidet sich nur sehr geringfügig zwischen den Klimazonen, der maximale Unterschied beträgt weniger als 0,5 %.

¹⁶ Die Achsenskalierung wurde dabei so groß gewählt, dass diese Unterschiede sichtbar werden.

Abb. 5-5: Vergleich der potenziellen Regelleistungsbereitstellung aus einem Pool von Altbau Einfamilienhäusern in den fünf Klimazonen



Quelle: Eigene Berechnungen

Aufgrund der geringen Unterschiede der Ergebnisse zwischen den unterschiedlichen Klimazonen scheint es gerechtfertigt, die Klimazonen noch weiter zusammenzufassen und im Folgenden statt mit fünf verschiedenen lediglich mit einer aggregierten Klimazone zu arbeiten.

Die Aggregation von fünf zu einer Klimazone wird analog zu der von 15 zu fünf Klimazonen vorgenommen: Als Basis wird der Temperaturverlauf der bevölkerungsstärksten Klimazone (Zone 5) genutzt. Die Jahresmitteltemperatur dieser Klimazone liegt mit 9,44 °C um 0,86 °C über der mittleren Temperatur für ganz Deutschland.¹⁷ Deswegen wird die Temperatur jeder Stunde um diesen Betrag reduziert, um den Temperaturverlauf für die aggregierte Klimazone zu erhalten.

5.3.2 Wärmebedarfsprofile für Wohngebäude

Für die Modellierung der Regelleistungsbereitstellung aus KWK wird der Wärmebedarf jedes Versorgungsobjektes in zeitlicher Auflösung benötigt. Dieser unterscheidet sich je nach Gebäudetyp und Standort. Deswegen wird das Gesamtmodell auf Teilmodelle aufgeteilt, die jeweils einen Gebäudetyp in einer Klimazone abbilden. Da in jedem Teilmodell eine Vielzahl von Anlagen als Schwarm zusammenwirkt, werden keine gemessenen Wärmebedarfsverläufe von Einzelobjekten genutzt, sondern synthetische Profile, die Ausgleichseffekte durch zeitlich versetzte Wärmenachfrage abbilden können. Dafür werden die im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) entwickelten Standardlastprofile für die Gasbelieferung von Kunden ohne Leistungsmessung verwendet (BGW 2006).

¹⁷ Zur Berechnung der Jahresmitteltemperatur von ganz Deutschland wird der mit den Bevölkerungszahlen gewichtete Mittelwert über alle Klimazonen gebildet

Zunächst werden aus den Jahreswärmeenergiemengen der verschiedenen Gebäudetypen die Tagesenergiemengen berechnet. Der Wärmebedarf Q_D eines Tages D lässt sich mit der folgenden Formel bestimmen:

$$Q_D = h(\vartheta_D) \cdot KW$$

Formel 1: Wärmebedarf eines Tages

KW bezeichnet den Kundenwert. Die Berechnung dieses Wertes ist abhängig vom Jahresenergiebedarf Q_a eines Gebäudes.

$$KW = \frac{Q_a}{\sum_i h(\vartheta_i)}$$

Formel 2: Kundenwert

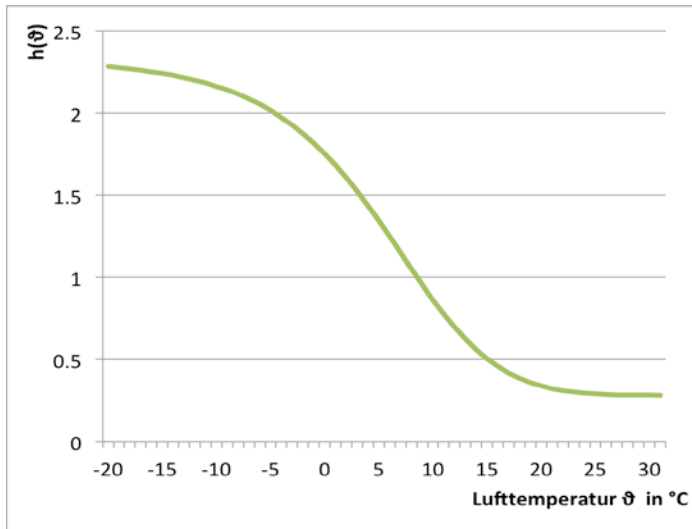
Dabei ist $h(\vartheta_D)$ die Auswertung der sogenannten Sigmoid-Funktion für die Tagesmitteltemperatur ϑ_D . Die Parameter A, B, C und D beeinflussen die Form der Sigmoid-Funktion und unterscheiden sich je nach Gebäudetyp und Baualtersklasse (siehe Tab. 5-2). A, C und D sind dimensionslos, die Einheit von B ist Grad Celsius.

$$h(\vartheta) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta - 40^\circ C} \right)^C} + D$$

Formel 3: Auswertung der Sigmoid-Funktion

Die Abb. 5-6 zeigt einen möglichen Verlauf der Sigmoid-Funktion am Beispiel eines neuen Mehrfamilienhauses. Der Parameter D bestimmt die Höhe der Funktion bei hohen Temperaturen, A beeinflusst die Höhe bei niedrigen Temperaturen. B und C haben Einfluss auf die Position und die Steilheit der Krümmung. Eine steil abfallende Sigmoid-Funktion bedeutet, dass der Wärmebedarf des Gebäudes stark von der Außentemperatur abhängt. Wird der Gasbezug nicht zur Warmwasserbereitung genutzt, ist der Parameter D gleich null (keine Heizung, also kein Gasbezug bei hohen Außentemperaturen). Durch die Variation der Parameter lassen sich verschiedene Gebäudecharakteristiken abbilden.

Abb. 5-6: Sigmoid-Funktion, Beispiel: Neues Mehrfamilienhaus



Quelle: Eigene Berechnungen

Innerhalb der Standardlastprofile für Gas wird nach neuen und alten Ein- und Mehrfamilienhäusern differenziert (BGW 2006). Kleine Mehrfamilienhäuser werden dabei den Einfamilienhäusern zugerechnet, große Mehrfamilienhäuser, Reihenhäuser und Hochhäuser den Mehrfamilienhäusern. Im Rahmen dieses Projektes wird zwischen Altbauten, Gebäuden mit EnEV2007-Standard (Neubau oder saniert) und Passivhäusern (Neubau oder saniert) unterschieden werden. Dafür werden für Altbauten die Sigmoid-Koeffizienten für alte Gebäude genutzt, für EnEV2007-Gebäude die Koeffizienten für neue Gebäude. Für Passivhäuser liegen keine Koeffizienten vor. Diese werden generiert, indem die Sigmoid-Funktion so angepasst wird, dass sich ein gleichmäßigerer Verlauf für unterschiedliche Temperaturen ergibt (siehe Tab. 5-2 und Abb. 5-7).

Tab. 5-2: Sigmoid-Faktoren der betrachteten Gebäudetypen

Wohngebäudetyp	A	B	C	D	Quelle
EFH alt	3,089	-37,185	5,714	0,107	(BGW 2006)
EFH neu	2,938	-37,180	5,561	0,140	(BGW 2006)
EFH passiv	2,712	-37,173	5,332	0,190	Eigene Berechnungen
MFH alt	2,443	-37,732	5,735	0,124	(BGW 2006)
MFH neu	2,245	-34,695	6,052	0,204	(BGW 2006)
MFH passiv	1,948	-34,640	6,528	0,324	Eigene Berechnungen

Quelle: siehe letzte Spalte

Abb. 5-7: Sigmoid-Funktionen für Einfamilienhäuser

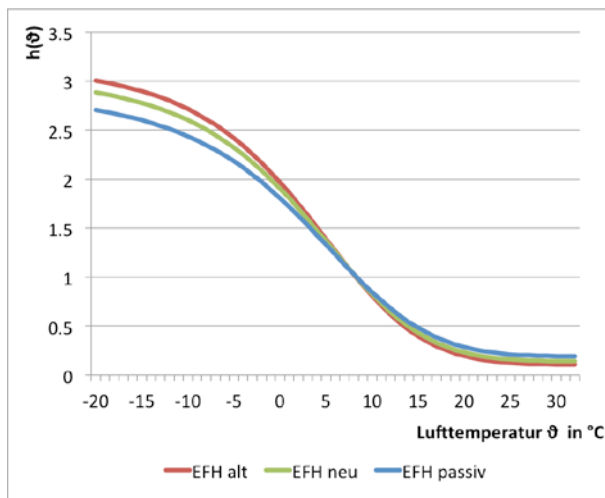
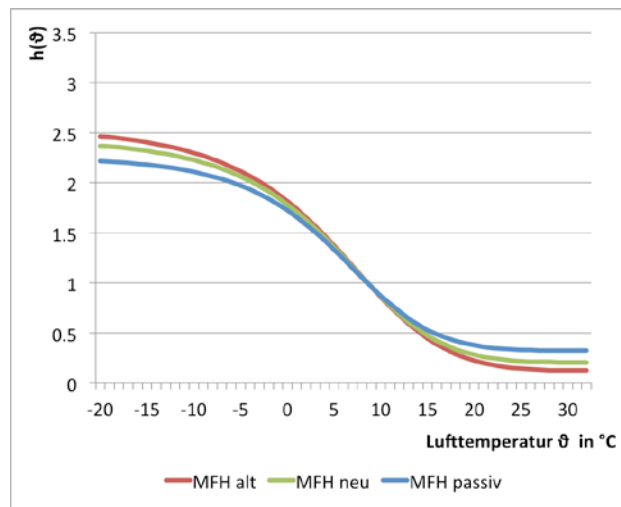


Abb. 5-8: Sigmoid-Funktionen für Mehrfamilienhäuser



Quelle: Eigene Berechnungen

Die zehn hier betrachteten Gebäudetypen (siehe Kapitel 5.3) werden den sechs Kategorien (EFH oder MFH, alt, neu oder passiv) entsprechend Tab. 5-3 zugeordnet.

Tab. 5-3: Jahresenergieverbräuche und Zuordnung der Gebäudetypen für die Ermittlung der Wärmebedarfsprofile

Nr.	Gebäudetyp	Jahreswärmebedarf* [kWh _{th} /(qm·a)]	Gebäudekategorie
1	Altbau EFH	22.700	EFH alt
2	Altbau MFH (klein)	76.700	
3	Altbau MFH (groß)	127.000	MFH alt
4	Altbau HH	883.900	
5	EnEV 2007 MFH (klein)	27.400	EFH neu
6	EnEV 2007 MFH (groß)	49.300	MFH neu
7	EnEV 2007 HH	404.000	
8	Passivhaus MFH (groß)	23.600	MFH passiv
9	Passivhaus HH	193.200	
10	Passivhaus RH-Siedlung	85.100	

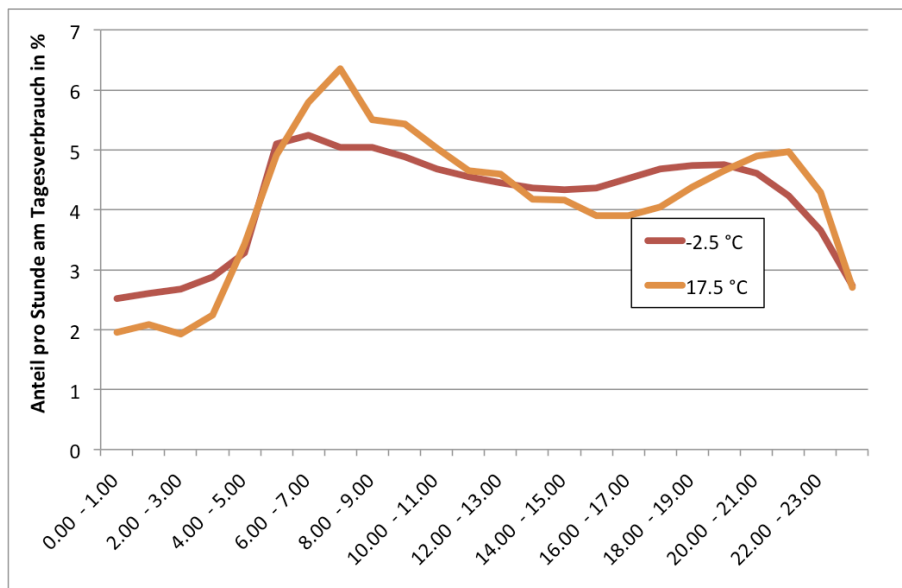
Bemerkung: *Raumwärme und Warmwasser

Quelle: Eigene Berechnungen

Im nächsten Schritt werden die Tagesenergieverbrauchsmengen auf die Stunden des Tages aufgeteilt, auch dieses Vorgehen erfolgt analog zu (BGW 2006). Dafür werden Profile genutzt, welche die Verteilung der Tagesenergiemenge über die Stunden des Tages angeben. Dabei werden für verschiedene Tagesmittelwerte der Außentemperatur (Differenzierung in 5°C-Schritten) verschiedene Verläufe vorgegeben.

Die Abb. 5-10 verdeutlicht diese Tagesprofile für ein neues Mehrfamilienhaus für einen Tag mit einer mittleren Außentemperatur von $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem Tag mit $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Summe über einen Tag ist dabei stets 100 %. Der Wärmebedarf bei niedrigen Tagesmitteltemperaturen ist in der Nacht nur geringfügig niedriger als tagsüber. Bei höheren Temperaturen wird kaum Heizwärme benötigt und der größte Anteil der Wärme für die Warmwasserbereitung verwendet. Dies führt zu einer deutlich ausgeprägten Morgen- und einer leichten Abend-Spitze.

Abb. 5-9: Verlauf des Tagesprofils für neue MFH für verschiedene Tagesmitteltemperaturen



Quelle: Eigene Berechnungen

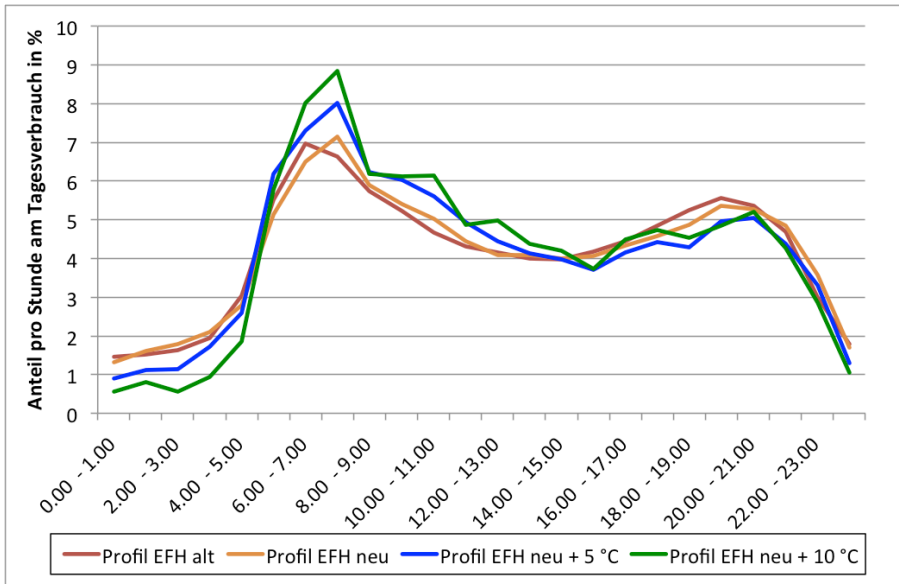
In (BGW 2006) werden Tagesprofile für verschiedene Siedlungstypen mit unterschiedlich hohen Altbauanteilen von Klasse 1 (90 %) bis Klasse 10 (40 %) differenziert. Eine Unterscheidung in die hier genutzten Baualterklassen auf Einzelobjektebene ist damit nicht möglich. Doch da sich mit dem Effizienzstandard auch die Tagescharakteristik ändert, wird eine Differenzierung zwischen Passivhäusern und EnEV 2007-Gebäuden notwendig.

Dafür wird hier für Altbauten das Profil der Klasse 1 gewählt, für EnEV 2007-Gebäude das der Klasse 10. Für die Bestimmung der Tagesprofile für Passivhäuser wird die Annahme getroffen, dass die Charakteristik des Tagesverlaufes ähnlich zu der eines EnEV2007-Gebäudes ist und somit basierend auf den Profilen der Klasse 10 aufgebaut werden kann. Um der verbesserten Wärmedämmung Rechnung zu tragen, wird dieses Profil so verschoben, dass auch bei geringeren Außentemperaturen der Anteil der Heizwärme geringer ist als bei EnEV2007-Gebäuden. Dazu wird das Profil auf eine höhere Stütztemperatur verschoben.

Die Abb. 5-10 zeigt beispielhaft die Tagesverteilung für eine Außentemperatur von $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ für alte und neue (EnEV2007) Einfamilienhäuser sowie das um fünf und das um zehn Grad Celsius verschobene Profil für neue Häuser. Man erkennt, dass die Verschiebung um $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bereits eine deutlicher ausgeprägte warmwasserbedingte Morgenspitze zur Folge hat, wohingegen bei einer Anhebung um $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ diese Morgenspitze sehr dominant ist und in den frühen Morgenstunden nahezu keine Heizenergie benötigt wird. Deswegen werden für die Modellierung der Wärmebedarfsganglinien von Passivhäusern die um $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ verschobenen Ganglinien der EnEV2007-Gebäude (Klasse 10) genutzt. Das Profil eines Passivhauses zeigt also beispielsweise bei $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ die gleiche Charakteristik wie ein EnEV2007-Haus bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies bezieht

sich nur auf die Aufteilung des Tagesenergiebedarfs auf die Stunden des Tages, der Tagesbedarf selbst wird mit Hilfe der Sigmoid-Funktion für Passiv- und EnEV2007-Gebäude getrennt bestimmt (siehe oben).

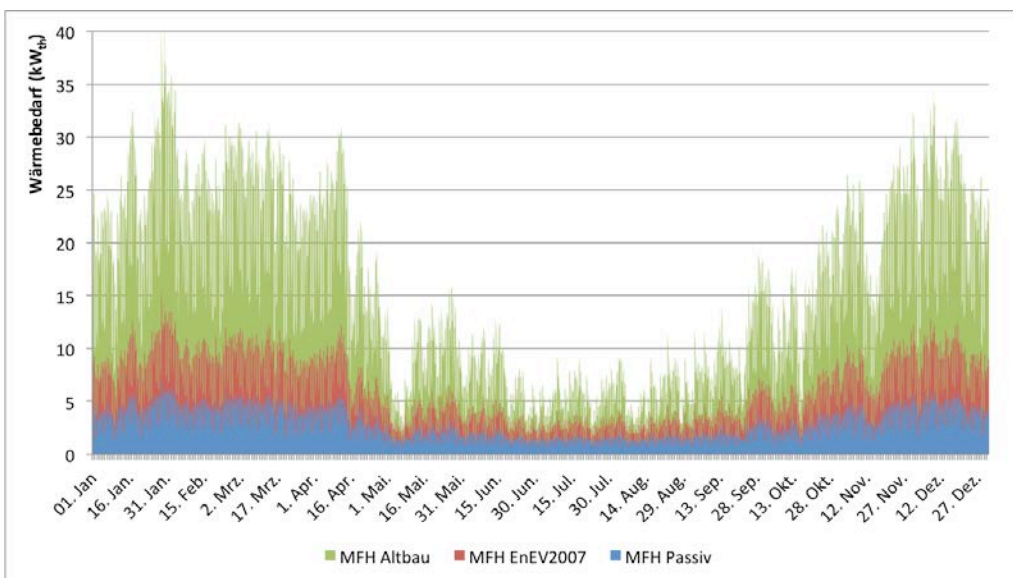
Abb. 5-10: Temperaturverschiebung der Tagesprofile



Quelle: Eigene Berechnungen

Mit Hilfe des oben beschriebenen Vorgehens werden Ganglinien des Jahreswärmebedarfs für jeden Gebäudetyp generiert. Abb. 5-11 zeigt diese Jahresganglinie beispielhaft für drei große Mehrfamilienhäuser unterschiedlicher Effizienzstandards (Altbau, EnEV2007, Passivhaus).

Abb. 5-11: Jahresganglinie des Wärmebedarfs für Mehrfamilienhäuser



Quelle: Eigene Berechnungen

5.2.4 Wärmebedarfsprofile für Nichtwohngebäude

Für die Nichtwohngebäude werden analog zur Vorgehensweise bei den Wohngebäuden synthetische Profile verwendet. Die Standardlastprofile des BDEW, die für die

Wärmebedarfsprofile der Wohngebäude genutzt werden, können auch für Kleinverbraucher und Gewerbebetriebe eingesetzt werden (BGW 2006). Für die zusammen mit dem Auftraggeber ausgewählten NWG-Typen liegen konkret die in Tab. 5-4 zugeordneten BDEW Profile inklusive ihrer Sigmoid-Koeffizienten vor. Diese Profile lassen sich häufig einer Vielzahl verschiedener Gewerbebetriebe zuordnen, die dafür genutzte Tabelle findet sich im Anhang von (BGW 2006). Da Schwimmbäder nicht durch die BDEW-Profile abgedeckt werden können, wird der zugehörige NWG-Typ (Nr. 4) aus Konsistenzgründen nicht weiter analysiert. Ferner ist zu beachten, dass die Profile für Krankenhäuser, Altenheime und Hotels sowie für Bürogebäude und Schulen jeweils auf dem gleichen Standardlastprofiltyp beruhen, obwohl es in der Realität zumindest leichte Unterschiede geben wird. Die objektspezifischen Ergebnisse zu Potenzialen und CO₂-Emissionen werden daher allein durch unterschiedliche Anlagenauslegungen und Annahmen zum eigenen Nutzungsgrad des BHKW-Stroms bestimmt. Der damit verbundene Fehler lässt sich ohne Vergleichsrechnungen mit individuellen Profilen nicht abschätzen, er dürfte aber eher klein ausfallen, sofern die Unterschiede nicht zu einer anderen Auslegung der Anlage führen würden.

Tab. 5-4: Zuordnung von BDEW-Standardlastprofilen für den Gasbezug zu ausgewählten Nichtwohngebäudetypen

Bezeichnung	Nichtwohngebäudetyp	BDEW-Typ
NWG 1	Krankenhäuser	GBH - Beherbergung
NWG 2	Altenheime	GBH - Beherbergung
NWG 3	Hotels	GBH - Beherbergung
NWG 4	Bürogebäude	GKO - Gebietskörperschaften, Kreditinstitute und Versicherungen, Organisationen ohne Erwerbszweck & öffentliche Einrichtungen
NWG 5	Schulen	GKO - Gebietskörperschaften, Kreditinstitute und Versicherungen, Organisationen ohne Erwerbszweck & öffentliche Einrichtungen
NWG 6	Einkaufszentren (Handel)	GHA - Handel

Quelle: (BGW 2006); eigene Zuordnung

5.3 Auslegung der BHKW

Für die Auslegung der BHKW in den beiden Anwendungsfeldern Wohn- und Nichtwohngebäude werden zunächst geeignete Gebäudetypen identifiziert und deren Wärmebedarf (absolut und als Jahresdauerlinie) bestimmt. Auf dieser Basis und unter Beachtung der folgenden Randbedingungen bzw. Grundannahmen erfolgt dann die Auslegung durch BHKW-Consult:

- Auslegung auf die thermische Grundlast (ca. 1/3)
- Abdeckung des Wärmebedarfs durch KWK mit mindestens 50 %
- Auslegung Wärmespeicher-Volumen: etwa eine KWK-Volllaststunde
- Speicher-Verluste: 0,1 % pro 15 min.
- Spitzenlastkessel auf maximale Heizleistung ausgelegt bzw. den Spitzenlastkessel eingesetzt, der nach Herstellerprogramm verfügbar ist
- Alle Anlagen und Komponenten sind kommerziell erhältlich.

5.3.1 Wohngebäude

Um die KWK-Potenziale im Wohngebäudebereich möglichst realitätsnah abbilden zu können, ist eine geeignete Auswahl an zu modellierenden Gebäudetypen unterschiedlicher energetischer Standards erforderlich. Dabei sollen einerseits die Anzahl der Varianten begrenzt werden, um den Modellierungsaufwand nicht unnötig zu erhöhen, andererseits sollen folgende Anforderungen erfüllt sein:

1. Ausreichende Spreizung der Gebäudeenergiestandards bzw. des spezifischen Heizwärmebedarfs in kWh/(m²·a)
2. Ausreichende Abdeckung der Gebäudetypen
3. Ausreichende resultierende Spreizung der Wärmelast pro Gebäude (zur Erfassung der KWK- Potenziale).

Die erste Forderung wird durch drei stark abweichende Energiestandards gewährleistet:

- unsanierter Altbau (ca. 90 W/m² max. Heizlast¹⁸)
- EnEV 2007-Neubaustandard, Neubau oder saniert (ca. 40 W/m² max. Heizlast)
- Passivhaus-Standard, Neubau oder saniert (ca. 10 W/m² max. Heizlast).

¹⁸ Heizlasten vgl. Tab. 2 auf S.22 in (Schnieders 2005)

Folgende Gebäudetypen werden betrachtet:

- Einfamilienhaus (EFH)
- kleines Mehrfamilienhaus (MFH klein)
- großes Mehrfamilienhaus (MFH groß)
- Hochhaus (HH)
- Reihenhaussiedlung (RH-Siedlung).

Damit sind sämtliche Gebäudetypen gemäß deutscher Gebäudetypologie nach (Diefenbach und Born 2007) erfasst (siehe Abb. 5-12).

Abb. 5-12: Ausschnitt aus der Deutschen Gebäudetypologie nach Baualtersklassen

Deutsche Gebäudetypologie – Häufigkeit von Gebäudetypen unterschiedlichen Baualters													
	Baualtersklassen										Summe	Anteil	
	vor 1918	vor 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2006			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J			
Gebäudetypen*	EFH												
	Wohnfläche in Tsd. m²	81.503	148.776	168.937	174.251	235.409	223.135	112.631	236.441	255.280	103.208	1.739.571	52%
	Anz. Wohneinh. in Tsd.	916	1.707	2.010	1.915	2.274	1.867	936	2.055	1.994	671	16.345	42%
	RH												
	Wohnfläche in Tsd. m²		14.543	31.450	21.993	35.996	61.478	24.503	32.951	33.366	11.675	267.955	8%
	Anz. Wohneinh. in Tsd.		145	326	231	348	517	202	281	285	83	2.418	6%
	MFH												
	Wohnfläche in Tsd. m²	31.974	109.337	135.827	117.051	149.881	122.930	61.044	118.019	154.740	24.267	1.025.070	31%
	Anz. Wohneinh. in Tsd.	462	1.501	2.034	1.912	2.210	1.677	821	1.712	2.240	296	14.865	38%
	GMH												
	Wohnfläche in Tsd. m²		31.549	10.160	38.936	47.501	46.124					174.270	5%
	Anz. Wohneinh. in Tsd.		448	169	703	784	697					2.801	7%
	HH												
	Wohnfläche in Tsd. m²					12.617	12.988					25.605	1%
	Anz. Wohneinh. in Tsd.					198	198					396	1%

Quelle: (Diefenbach und Born 2007)

Einzelne Reihenhäuser werden nicht gesondert betrachtet, da deren Heizlast ähnlich zu bewerten ist wie die von Einfamilienhäuser bzw. – als Reihenhausriegel – ähnlich wie ein kleines Mehrfamilienhaus. Reihenhausriegel im Bestand sind zudem eigentumsrechtlich schwieriger erschließbar für BHKW. Ferner beträgt der Anteil der Reihenhäuser am gesamten Gebäudebestand Deutschlands nur 8 % bezogen auf die Wohnfläche bzw. 6 % bezogen auf die Wohneinheiten. RH-Neubausiedlungen werden hingegen mit betrachtet, da hier selbst bei Gebäuden mit hohem energetischen Standard eine für BHKW-Anwendungen geeignete Wärmelast vorhanden ist. Die Betrachtung beschränkt sich jedoch auf den Neubau, da nur hier von einer kostengünstigen und eigentumsrechtlich praktikablen Nahwärmeerschließung ausgegangen werden kann.

Hochhäuser repräsentieren zwar nur 1 % der Wohnfläche und 2 % der Wohneinheiten, sie werden aber dennoch mit in die Modellierung aufgenommen, da dies aufgrund ihrer hohen

Gesamtwärmelast und aufgrund der i.d.R. vorhandenen zentralen Versorgungsstruktur ein interessanter BHKW-Anwendungsfall ist.

Als jährlicher Mindestenergiebedarf (Summe aus Heizung und Warmwasser) für eine sinnvolle BHKW-Anwendung werden 20.000 kWh angenommen.¹⁹ Die grau gelisteten Fälle liegen entweder unterhalb der Mindestwärmemenge oder werden aus den zuvor angeführten Gründen nicht betrachtet. In Tab. 5-5 sind die zehn ausgewählten Referenzwohngebäude dokumentiert.

Als Altbau werden die Baualtersklasse A (vor 1818) bis G (bis 1983) betrachtet, d. h. alle Gebäude bis zum Wirksamwerden der 1. Wärmeschutzverordnung. Über diese Klassen wird jeweils die mittlere Wohnfläche pro Wohneinheit (Spalte 3) und der spezifische Heiznutzenergiebedarf pro Quadratmeter und Jahr (Spalte 6) für die untersuchten Gebäudetypen berechnet. Die Anzahl der Wohneinheit pro Gebäude wird mit 1 (EFH), 4 (RH), 6 (MFH klein), 12 (MFH groß), 100 (HH) und 24 (RH-Siedlung) angenommen. Daraus ergeben sich die absoluten Heiznutzenergiebedarfe in kWh pro Jahr für die Gesamtgebäude (Spalte 7). Zusammen mit dem Warmwasserbedarf (Spalte 8), der pauschal mit 17 kWh/(qm · a) angenommen wird²⁰, ergibt sich der Gesamtwärmebedarf der Gebäude (Spalte 9). Dieser Wärmebedarf liefert die Basis für die Auslegung der BHKW, wie sie nachfolgend beschrieben wird.

19 Für die Mikro-KWK-Anlage mit der derzeit kleinsten am Markt verfügbaren thermischen Leistung (Vaillant ecoPOWER 1.0 mit 2,5 kWth) gibt der Hersteller einen Mindestenergiebedarf von 15.000 bis 20.000 kWh/a an (s. ecoPOWER-Firmenprospekt unter: www.vaillant.de/stepone2/data/downloads/21/4b/00/Prospekt-KWK.pdf).

20 Für den Trinkwasser-Wärmebedarf wird nach DIN 4701-10V-Heizung+WW+Lüftung (S. 18 Punkt 4.2.2) ein definierter Nutzen q_{tw} von 12,5 kWh/(m²a) im Rahmen des öffentlich rechtlichen Nachweises zugrundegelegt. Dies entspricht etwa einem täglichen Warmwasserbedarf von 23 Liter pro Person bei 50° C Wassertemperatur und liegt damit eher am unteren Ende der Realität. Der Heizungsvergleich-Onlinerechner (www.vz-nrw.de/UNIQ131420621909843/heizsystemvergleich) der Verbraucherzentrale NRW weist z. B. drei Kategorien aus: Niedrig (20 l), mittel (40 l) und hoch (60 l). Der gewählte höhere Wert von 17 kWh/m²/a stammt von Planungsbüro Graw und ist somit fachplanerisch plausibel abgesichert. Eine unterschiedliche flächenspezifische Belegung wird nicht berücksichtigt, da ihre Ermittlung mit zu großen Unsicherheiten behaftet wäre und daher nicht zu erhöhter Aussagekraft beitragen kann.

Tab. 5-5: Auswahl und Energiebilanz für Raumwärme und Warmwasser der zu simulierenden Gebäude nach Typ und Energiestandard

Energiestandard	Gebäudetyp	Fläche pro WE	Anzahl WE	Gesamt - Fläche	Heiznutzenergiebedarf		Warmwasser pro Gebäude	Summe Heiz + WW
		[m ² /WE]	-	[m ²]	Spezifisch [kWh/(m ² ·a)]	Absolut [kWh/a]		
Altbau (unsaniert)	1 EFH	98	1	98	213,9	21.059	1.723	22.782
	RH	107	4	430	201,9	86.716	7.517	94.233
	2 MFH (klein)	68	6	405	172,4	69.849	7.091	76.940
	3 MFH (groß)	62	12	739	154,9	114.478	12.929	127.407
	4 HH	60	100	6.036	129,4	781.316	105.629	886.945
	RH-Siedlung	107	24	2.577	201,9	520.294	45.101	565.395
EnEV 2007 (Neubau oder saniert)	EFH	106	1	106	54,0	5.747	1.862	7.610
	RH	111	4	443	54,0	23.936	7.757	31.694
	5 MFH (klein)	68	6	409	50,0	20.455	7.159	27.615
	6 MFH (groß)	61	12	736	50,0	36.815	12.885	49.700
	7 HH	60	100	6.036	50,0	301.798	105.629	407.428
	RH-Siedlung	111	24	2.660	54,0	143.619	46.543	190.162
Passivhaus (Neubau oder saniert)	EFH	106	1	106	15,0	1.596	1.862	3.459
	RH	111	4	443	15,0	6.649	7.757	14.406
	MFH (klein)	68	6	409	15,0	6.137	7.159	13.296
	8 MFH (groß)	61	12	736	15,0	11.044	12.885	23.930
	9 HH	60	100	6.036	15,0	90.539	105.629	196.169
	10 RH-Siedlung	111	24	2.660	15,0	39.894	46.543	86.437

Quelle: Eigene Berechnungen

Für jeden der zehn Referenzgebäudetypen aus Tab. 5-5 wird mit Hilfe der Software BHKW-Plan eine in der Anlagengröße angepasste KWK-Anlage ausgelegt. Auslegungsparameter sind der jährliche Gesamtwärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser, die maximale thermische Last sowie (intern hinterlegt in der Auslegungssoftware) standardisierte thermische Jahresdauerlinien (JDL). Dabei führen z. B. bauchige JDL (d. h. relativ große Wärme-Grundlast) zur Wahl einer größeren KWK-Anlage, flache JDL zur Wahl einer kleineren Anlage.

Grundsätzlich kann eine KWK-Auslegung nach zwei unterschiedlichen Kriterien optimiert werden:

- ökonomische Optimierung, d. h. tendenziell höhere Volllaststundenzahl, oder
- ökologische Optimierung, d. h. hohe CO₂-Einsparung verbunden mit eher niedrige(re)n Volllaststunden.

Im Sinne einer praxisnahen ökonomischen Auslegung wurde akteursbezogen eine differenzierte Betrachtung mit folgenden Mindestlaufzeiten der KWK-Anlagen vorgenommen:

- 3.500 h/a für EFH (Selbstnutzer)
- 4.000 h/a für MFH und Siedlung (Anlagenbetrieb durch Wohnungsbaugesellschaft o. ä.)
- 5.000 h/a für Gewerbe- und Industriebetriebe.

Das heißt, es wurde diejenige Anlage ausgewählt, deren Volllaststundenzahl im betrachteten Gebäude so nah wie möglich an der beschriebenen Volllaststundenzahl liegt, wobei diese nicht unterschritten werden darf. Als weitere Randbedingung wird darauf geachtet, dass der BHKW-Lastanteil in einem planerisch vernünftigen Bereich von ca. 20 bis 40 % liegt sowie die BHKW-Wärmeanteil in einem Bereich zwischen ca. 50 und 80 %.

Durch besondere Berücksichtigung der möglichen Eigenstromdeckungsanteile wird in der Praxis das ökonomische „Feintuning“ bei der Auslegung der BHKW vorgenommen. Dazu ist jedoch die Kenntnis der individuellen Stromverbrauchsprofile und Stromtarife für den Einzelfall erforderlich. Die Berücksichtigung wäre daher mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden, aufgrund der notwendigen Abschätzungen wäre dennoch in der Summe nicht ein präziseres Ergebnis zu erwarten. Da diese Untersuchung außerdem nicht auf der Eigennutzung von BHKW-Strom zielt, wurde auf die Berücksichtigung von Eigenstromanteilen bei der Anlagenauslegung verzichtet.

In der Tab. 5-6 sind die wesentlichen Anlagenparameter der ausgewählten Anlagen inklusive angepasster Spitzenlastkessel²¹ und Speicher²² dokumentiert (Werte z.T. gerundet).

21 Die Spitzenlastkessel für die BHKW-Varianten unterliegen bei den Stirlingmotoren sowie dem Vaillant ecopower 1.0 den herstellerbedingten Angebotsgrößen. Beim ecopower 1.0 stehen zur Anpassung an die Begebenheiten des Versorgungsobjektes drei unterschiedliche Brennwärtekessel im Leistungsbereich von 14,4 kW bis 25,8 kW zur Verfügung. Alle Angaben der Kesselleistungen wurden für die tabellarische Darstellung auf Rücklaufftemperaturen von 50-60°C publiziert. Schlecht gedämmte Wohngebäude (Altbau) benötigen meist eine sehr hohe Spitzenlast, die jedoch nur wenige Stunden pro Jahr anfällt. Der Spitzenlastkessel der BHKW-Anlage wurde in diesem Fall, sofern keine produktbedingten Restriktionen vorhanden waren (s. o.), knapp unterhalb der errechneten Spitzenlast ausgelegt. Dabei wurde insbesondere die von dem Unternehmen Viessmann angebotenen Leistungsgrößen als Orientierung verwendet. Im Bereich der gut gedämmten Wohngebäude (EnEV 2007, Passivhaus) werden die Spitzenlastkessel in Höhe der benötigten maximalen Heizlast ausgelegt. Die Auswahl der Kesselgröße ist je nach Kessel- und Brennerhersteller auf bestimmte Leistungsgrößen beschränkt. Daher wird es in der Realität zu einer leichten Unter- oder Überschreitung der installierten Brenner- und Kesselleistung in Bezug auf die errechnete benötigte Spitzenlast kommen.

Insgesamt werden sieben verschiedene KWK-Module von sechs Herstellern mit einer thermischen Leistung zwischen 2,5 und 82 kW und einer elektrischen Leistung zwischen 1,0 und 50 kW betrachtet. Alle Module sind kommerziell am Markt verfügbar, werden mit Erdgas betrieben und sind von der Bauart her entweder Stirlingmotoren (eVita 25s von DeDietrich Remeha) oder Otto-Verbrennungsmotoren (alle übrigen).

22 Die Pufferspeichergößen für die BHKW-Anlagen unterliegen bei den Kombi-Systemen, bei denen der Verbrennungs- bzw. Stirlingmotor nur in Verbindung mit Speicher und Kessel angeboten wird, den Restriktionen des Herstellerangebotes. Beim ecopower 1.0 besteht dabei die Wahl zwischen zwei unterschiedlichen Pufferspeichergößen. Um einen möglichst hohen Anteil des Energiebedarfes für die Trinkwarmwasser-Versorgung mit dem BHKW abdecken zu können, werden bei einem geringen Verhältnis zwischen BHKW- und Spitzenlastleistung Pufferspeichergößen gewählt, die über die übliche Auslegungsgröße von einer Betriebsstunde hinaus reichen.

Tab. 5-6: Auslegungsdaten der BHKW-Module, Spitzenlastkessel und Speicher für die zehn betrachteten Wohngebäude-Versorgungsfälle

	Gebäude- typ	Wärme- bedarf	Wärme- last	Ausgewählte KWK-Module			Leistung		SKZ	Volllast- stunden	KWK- Modul	KWK-Anteile		Spitzenkessel		Speicher
				Hersteller	Typ	Prinzip	therm.	elektr.				Last	Wärme	Last	Wärme	
	-	[kWh _{th} /a]	[kW _{th}]	-	-	-	[kW _{th}]	[kW _{el}]	-	[h/a]	[kWh _{th}]	[%]	[%]	[kW _{th}]	[kWh _{th}]	[Liter]
Altbau	1 EFH	22.700	14	DeDietrich Remeha	eVita 25 s	Stirling	5,6	1,0	0,18	3.570	20.000	40	88	20	2.700	300
	2 MFH (klein)	76.700	44	Senertec	Dachs G5.5	Otto	12,5	5,5	0,44	4.470	55.900	28	73	40	20.800	750
	3 MFH (groß)	127.000	62	Senertec	Dachs G5.5	Otto	12,5	5,5	0,44	5.650	70.600	20	56	55	56.400	1.000
	4 HH	883.900	466	Sokratherm	GG 50	Otto	82,0	50,0	0,61	5.670	464.900	18	53	440	419.000	3.000
EnEV 2007	5 MFH (klein)	27.400	16	DeDietrich Remeha	eVita 25 s	Stirling	5,6	1,0	0,18	4.050	22.700	35	83	20	4.700	300
	6 MFH (groß)	49.300	26	Vaillant	ecopower 3.0	Otto	8,0	3,0	0,38	4.810	38.500	31	78	26	10.800	500
	7 HH	404.400	206	Kraftwerk	G 34	Otto	66,0	34,0	0,52	4.680	308.900	32	76	206	95.500	3.000
Passivhaus	8 MFH (groß)	23.600	20	Vaillant	ecopower 1.0	Otto	2,5	1,0	0,40	5.940	14.900	13	63	20	8.700	500
	9 HH	193.200	89	EC Power	XRGI 15G-T0	Otto	30,0	15,2	0,51	5.390	161.700	34	84	90	31.500	2.000
	10 Siedlung	85.100	75	Senertec	Dachs G5.5	Otto	12,5	5,5	0,44	5.140	64.300	17	76	75	20.800	1.000

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

Für die zuvor abgeleiteten zehn verschiedenen WG-Typen werden die Regelleistungspotenziale der ihnen zugeordneten KWK-Anlagen durch das Modell auf der Anlagen- bzw. Objektebene ermittelt. Um diese Einzelpotenziale auf den Bestand gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 hochrechnen zu können, ist eine Verknüpfung zwischen Anlagen- und Wohngebäudebestand erforderlich. Da der Wohngebäudebestand in der Leitstudie nur in aggregierter Form enthalten ist, wird eine solche Verknüpfung auf der Grundlage externer Bestandsdaten und eigener Annahmen zur Verteilung der BHKW von den Autoren vorgenommen. Dazu wird für jeden WG-Typ zunächst die gesamte Wohnfläche und über die abgeleiteten spezifische Wohnflächen (siehe Tab. 5-7) die jeweilige Anzahl der Gebäude bestimmt.

Dabei basieren die Daten zu den Wohnflächen für die Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 7 auf den eigenen Arbeiten zum Forschungsprojekt „Deutsches Energie- und Emissionsszenario-System (DEESY 2010)“ (Szenario/ Hypothese MMS) im Auftrag des Umweltbundesamts (Hanke 2011). Da hierin keine Angaben zu den Wohnflächen in Passivhäusern für das Jahr 2010 enthalten sind²³, werden diese aus der Datenbank des Passivhaus-Instituts (Passivhaus Dienstleistung GmbH o. J.) zusammen mit den eigenen Annahmen zu den mittleren Wohnflächen (siehe Tab. 5-5) abgeschätzt. Die Tab. 5-7 fasst die ermittelten Daten zur Entwicklung der Wohnflächen für die zehn Gebäude- bzw. Modelltypen und der daraus berechneten Anzahl der Wohngebäude für die Jahre 2010, 2020 und 2030 zusammen.

Demnach stimmt die extern ermittelte Gesamtwohnfläche für den gesamten betrachteten Zeitraum sehr gut mit den Annahmen der EE-Langfristszenarien 2011 überein und weicht maximal um drei Prozent (2020) nach oben ab. Da sich die Wohngebäudestruktur kurz- und mittelfristig nur wenig ändern wird und die Daten für das Jahr 2010 (und folgende) auf einer Fortschreibung der amtlichen Statistik mit Stand Ende 2006 beruhen, kann von einer hohen Passgenauigkeit der differenzierten Daten (WG-Typen) zu der implizit zugrunde liegenden strukturellen Entwicklung in den Leitstudien ausgegangen werden. Die betrachteten Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10 decken somit etwa 76 % (2010) bis 65 % (2030) der gesamten Wohnflächen ab. Der Rückgang resultiert aus dem Anstieg des Anteils von Einfamilienhäusern der Kategorie EnEV 2007 von 24 % im Jahr 2010 auf rd. 34 % im Jahr 2030, die aber nicht als KWK-geeignet angesehen (siehe Tab. 5-7) und daher nicht modelliert werden.

23 In den zugrunde liegenden amtlichen Statistiken (z. B. Fachserie 5, Stand Ende 2006) werden bislang keine Passivhäuser aufgeführt.

Tab. 5-7: Entwicklung der Wohnflächen und Gebäudeanzahl nach Wohngebäudetypen im Zeitraum 2010 bis 2030

Wohngebäudetyp	Wohnflächen			Anzahl Wohngebäude [Mio.]		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Altbau (Typ G bis 83)						
WG 1 / Einfamilienhaus	1.225,2	1.080,4	923,6	12,502	10,397	8,639
WG 2/ kl. Mehrfamilienhaus	733,6	647,4	541,0	1,811	1,508	1,225
WG 3/ gr. Mehrfamilienhaus	207,9	183,9	157,0	0,281	0,235	0,195
WG 4 / Hochhaus	42,9	31,3	23,1	0,007	0,005	0,004
EnEV 2007 (BAK H-J, KfW100, KfW70 und KfW55)						
- / Einfamilienhaus	837,5	1.075,8	1.230,0	7,901	9,572	10,637
WG 5 / kl. Mehrfamilienhaus	405,7	557,0	649,2	0,992	1,285	1,455
WG 6 / gr. Mehrfamilienhaus	25,6	30,6	54,1	0,035	0,039	0,067
WG 7 / Hochhaus	1,6	6,1	10,7	0,000	0,001	0,002
Passivhäuser (Neubau / Saniert)						
- / Einfamilienhaus	0,1	4,7	31,8	0,001	0,042	0,275
- / kl. Mehrfamilienhaus	0,0	4,6	29,3	0,000	0,011	0,066
WG 8 / gr. Mehrfamilienhaus	0,1	0,0	1,2	0,000	0,000	0,001
WG 9 / Hochhaus	0,2	0,7	1,6	0,000	0,000	0,000
WG 10 / Reihenhaus-Siedlung	0,3	2,0	13,6	0,000	0,001	0,005
Summe	3.480,0	3.624,4	3.666,2	23,531	23,095	22,570
WG 1-10	2.642,5	2.539,2	2.375,1	15,629	13,470	11,593
Anteil WG 1-10 an gesamt	76 %	70 %	65 %	66 %	58 %	51 %

Quellen: (Hanke 2011), (Passivhaus Dienstleistung GmbH o. J.); eigene Darstellung

Im nächsten Schritt erfolgt die Zuordnung der Wohngebäude-KWK zum Mengengerüst der EE-Langfristszenarien 2011 (Kategorien und installierte Leistungen) und auf dieser Basis dann die Verteilung der ermittelten Gesamtleistung auf die einzelnen Wohngebäudetypen. Da die 10 Wohngebäude-KWK alle eine Leistung $\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ haben, werden sie vollständig der Kategorie Objektversorgung ($< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$) zugeordnet²⁴. In diese Kategorie fallen jedoch auch Nichtwohngebäude (vgl. Kapitel 5.3.2), so dass Annahmen zu den jeweiligen „Marktanteilen“ getroffen werden müssen, da entsprechende Informationen nicht vorliegen. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde dazu folgende Grundannahme getroffen: Die Nichtwohngebäude

²⁴ Der Fehler der durch die Zuordnung von der 50 kW_{el} Anlage (WG4) zur Anlagenkategorie $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ entsteht, wird als vernachlässigbar gering angenommen.

dominieren 2010 diesen KWK-Sektor schätzungsweise im Verhältnis von 4:1 bezogen auf die installierte Leistung; im Wohngebäudebereich gibt es aber die größeren unerschlossenen Potenziale, so dass deren Anteil im betrachteten Zeitraum deutlich gesteigert werden kann: von 25 % in 2010 auf 33 % in 2020 und auf 40 % in 2030.

Um die gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) in den Jahren 2010, 2020 und 2030 installierte elektrische BHKW-Leistung für die Objektversorgung konsistent, nachvollziehbar und plausibel auf die Wohngebäude zu verteilen, werden die sechs verschiedenen WG-Anlagen in folgende drei Gruppen zusammengefasst: < 1 kW_{el}, 1-10 kW_{el} und 10-50 kW_{el}. Für diese Gruppen wurden dann in Abstimmung mit dem Auftraggeber die in Tab. 5-8 aufgeführten Anteile für die Jahre 2010, 2020 und 2030 angenommen. Bei den kleinsten Anlagen (Stirling-Maschinen) wurde geschätzt, dass sie im Jahr 2010 noch nicht in relevanter Zahl installiert waren, in den Folgejahren aber zunehmend in den Markt kommen und Anteile von 0,5 % in 2020 und 1,5 % in 2030 bezogen auf den zahlenmäßig stärksten WG-Typ – das Einfamilienhaus – erreichen werden.²⁵ Dagegen wurde für die größten Anlagen in diesem Bereich unterstellt, dass sie aktuell aufgrund ökonomischer Vorteile den größten Marktanteil innehaben, dieser dann aber nur noch bis zum Jahr 2020 gesteigert werden kann und dann stagniert. Die Marktanteile für die mittlere Gruppe resultieren dann aus der vorgegebenen Randbedingung der insgesamt zu verteilenden elektrischen Leistung.

Tab. 5-8: Entwicklung von Marktanteilen und Anlagenzahlen von Wohngebäude-KWK nach Leistungsklassen (2010, 2020, 2030)

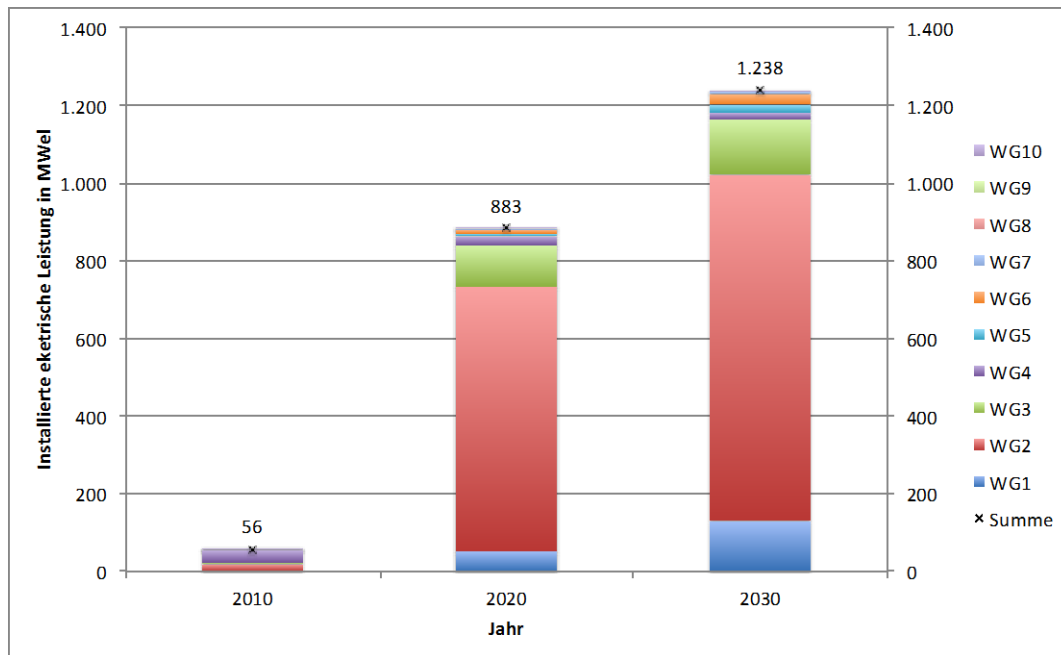
WG-KWK	Marktanteile bezogen auf die installierte elektrische Gesamtleistung			Installierte Anlagenzahl		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
bis 1 kW _{el}	0,0 %	0,5 %	1,5 %	0	58.410	151.438
1 bis 10 kW _{el}	0,3 %	8,2 %	13,2 %	6.923	146.254	197.393
10 bis 50 kW _{el}	5,0 %	10,0 %	10,0 %	370	594	538

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

Die aus den zuvor geschilderten Annahmen (inkl. KWK-Entwicklungspfad nach den EE-Langfristszenarien 2011) resultierende BHKW-Struktur (≤ 50 kW_{el}) im Wohngebäudebereich aufgelöst nach WG-Typen ist für die Jahre 2010, 2020 und 2030 in der folgenden Abb. 5-13 dargestellt. Die KWK-Anlagen für kleine Mehrfamilienhäuser im Altbaubestand dominieren demnach deutlich die Bestandsentwicklung im Wohngebäudebereich, in weitem Abstand gefolgt von Hochhäusern mit Passivhausstandard und den unsanierten Einfamilienhäusern. Der KWK-Zubau findet überwiegend (≥ 80 %) im Altbaubereich statt, wie es aufgrund der höheren Wärmebedarfe und -lasten und der großen Gebäudeanzahl auch zu erwarten war.

²⁵ Dem entspricht eine mittlere jährliche Zubau von knapp 6.000 Anlagen bis 2020 und anschließend von etwa 10.000 Anlagen bis 2030.

Abb. 5-13: Entwicklung der Struktur der installierten KWK-Leistung nach den Wohngebäudetypen für den betrachteten Zeitraum (2010, 2020, 2030)



Quelle: Eigene Berechnungen

5.3.2 Nichtwohngebäude (ohne Industrie)

Nichtwohngebäude, d. h. kommunale Einrichtungen bzw. weitere im Sektor „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“, lassen sich aufgrund ihrer heterogenen Gebäude- und Nutzerstrukturen nicht analog zu den Wohngebäuden klassifizieren. Daher erfolgte aufgrund eigener Erfahrungswerte und in Abstimmung mit dem Auftraggeber eine Auswahl von Nichtwohngebäuden, die als besonders geeignet für den BHKW-Einsatz anzusehen sind. (siehe Tab. 5-9). Diese Auswahl wird zudem durch hohe Potenziale nach (Gailfuß, Markus 1998) gestützt.

Tab. 5-9: Auswahl von Nichtwohngebäuden als besonders geeignete, untersuchungsrelevante Anwendungsfälle für BHKW

Bezeichnung	Nichtwohngebäudetyp	Potenzial für 2010 [MWel]
NWG 1	Krankenhäuser	650
NWG 2	Altenheime	150
NWG 3	Hotels	k.A.
NWG 5	Bürogebäude	217
NWG 6	Schulen	106

Quelle: (Gailfuß, Markus 1998)

Für die Auslegung von KWK-Anlagen für diese Gebäude werden als Nächstes – in Ergänzung zu den vorliegenden spezifischen Gas- bzw. Wärmebedarfsprofilen (siehe Kapitel 0) – noch die jeweiligen Jahreswärmeverbräuche ermittelt. Dazu wird auf den Forschungsbericht

„Verbrauchskennwerte 2005“ der ages GmbH (Münster) zurückgegriffen (Ages GmbH 2007). Dieser Bericht verfügt über Kennwerte für den jährlichen Verbrauch von Heizenergie²⁶, Strom und Wasser für Nichtwohngebäude aufgeschlüsselt nach 48 Gebäudegruppen und 180 Gebäudearten. Die Datengrundlage bilden insgesamt 25.000 Nichtwohngebäude und bezieht sich auf die Jahre 2003 bis 2005. Die daraus entnommenen Daten (mit Ausnahme von Einkaufszentren²⁷) für die hier ausgewählten Nichtwohngebäude sind in der Tab. 5-10 dargestellt. Demnach weisen Krankenhäuser mit ca. 12.400 MWh_{th}/a den mit Abstand höchsten durchschnittlichen objektbezogenen Heizenergiebedarf auf, Hotels mit gut 400 MWh_{th}/a dagegen den geringsten.

Tab. 5-10: Verbrauchsrelevante Kennwerte und resultierender Jahresheizenergiebedarf für die ausgewählten Nichtwohngebäude

Modelltyp	Nichtwohngebäudetyp	Mittlere Größe [qm]	Spez. HEV [kWh _{th} /(m ² ·a)]	Jahres-HEV [kWh _{th} /a]
NWG 1	Krankenhäuser	447a)	27.629a)	12.350.163
NWG 2	Altenheime	8.126	154	1.251.404
NWG 3	Hotels	2.873	151	433.823
NWG 5	Bürogebäude (Verwaltungsgebäude)	3.649	95	346.655
NWG 6	Schulen	5.164	108	557.712

Bemerkungen: HEV=Heizenergieverbrauch; a) abweichend mittlere Anzahl Betten

Quellen: (Ages GmbH 2007), (MWEBWV NRW 2011)

Für die Auslegung von passenden BHKW zu den betrachteten Nichtwohngebäude wird aus den o.g. Jahreswärmbedarfen und den zugeordneten synthetischen (normierten) Profilen (siehe Tab. 5-4) die jeweilige Jahresdauerlinie und Wärmelast bestimmt. Diese dienen als Grundlage für die Auslegung der Anlagen für den Nichtwohngebäudebereich, deren Parameter in der Tab. 5-11 zusammengefasst sind. Die Leistung der Anlagen reicht demnach von 41 kW_{th} (20 kW_{el}) für Hotels bis 1.187 kW_{th} (1.189 kW_{el}) und die Lastanteile der BHKW von 26 % (Altenheime und Hotels) bis 39 % (Schulen).

26 Nach persönlicher Auskunft von ages ist hierin der Warmwasserbedarf enthalten

27 Für diese gibt es keine Angaben im ages-Bericht. Daher wird auf andere Quellen zurückgegriffen (siehe Quellennachweis zur Tabelle)

Tab. 5-11: Auslegungsdaten der BHKW, Spitzenlastkessel und Speicher für die fünf betrachteten Nichtwohngebäudetypen

Modell - Nr.	Nichtwohngebäudetyp	HEV* [GWh/a]	Wärme - Last [kW _{th}]	KWK- Leistung [kW _{th}]	KWK- Leistung [kW _{el}]	Last- Anteil [%]	SKZ* -	VLS* [h/a]	Spitzen - kessel [kW _{th}]	Wärmespeicher	
										Größe [Liter]	VL/RL* [°C]
NWG 1	Krankenhäuser	12,4	4.415	1.187	1.189	27 %	1,00	6.700	4.000	30.000	85/45
NWG 2	Altenheime	1,2	443	114	71	26 %	0,62	6.900	400	4.500	85/45
NWG 3	Hotels	0,4	155	41	20	26 %	0,49	6.700	140	1.500	80/40
NWG 5	Bürogebäude	0,3	106	36	18	34 %	0,50	7.300	100	1.500	80/40
NWG 6	Schulen	0,6	169	66	34	39 %	0,52	6.600	150	2.500	80/40

Bemerkungen: HEV=Heizenergieverbrauch; SKZ=Stromkennzahl; VLS=Volllaststunden; VL/RL=Vor- bzw. Rücklauftemperatur
 Quellen: Datenblätter zu den ausgewählten KWK-Anlagen; Eigene Annahmen und Berechnungen

Nachfolgend wird für den Nichtwohngebäudebereich analog zu den Wohngebäuden eine Zuordnung zum Mengengerüst der EE-Langfristszenarien 2011 vorgenommen, um die auf Anlagenebene ermittelten Potenziale hochrechnen zu können. Dafür werden die fünf Typen betrachtet, für die eine konsistente Anlagenauslegung ermittelt werden konnte (vgl. Tab. 5-11). Die drei kleineren Anlagen (für Hotels, Büros und Schulen) werden auf die Leitstudien-Kategorie „Objektversorgung ($\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$)“ bezogen und die zwei größeren Anlagen (für Altenheime und Krankenhäuser) aufgrund ihrer elektrischen Leistung von 71 bzw. 1.287 kW_{th} auf die Kategorie „Nah-/Fernwärmeversorgung ($> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$)“. Diese Zuteilung wird aufgrund der Größenklassen vorgenommen; die Anlagen sind nicht netzgebunden.

Für die kleinen Nichtwohngebäude wird unterstellt, dass sie einen großen, aber rückläufigen Anteil an der installierten elektrischen KWK-Leistung in der Kategorie Objektversorgung haben: von 75 % in 2010 über 67 % in 2020 auf 60 % in 2030. Für die beiden größeren NWG-Typen wird dagegen angenommen, dass sie heute (2010) eher einen kleinen Anteil in Höhe von schätzungsweise (maximal) 20 % an der netzgebundenen Versorgung aufweisen, der aber im betrachteten Zeitraum auf 30 % (25 %) im Jahr 2030 (2020) gesteigert wird.

Ergänzend wird die Anzahl der jeweiligen betrachteten Nichtwohngebäude im Jahr 2010 ermittelt, ihre weitere Entwicklung für die Jahre 2020 und 2030 abgeschätzt, sowie eigene Annahmen zu den erwarteten zugehörigen BHKW-Anteilen getroffen (siehe Tab. 5-12). Die Anzahl der NWG reicht demnach von 2.100 (Krankenhäuser) bis 85.000 (Büros). Dabei wird bei Krankenhäusern, Hotels und Bürogebäuden davon ausgegangen, dass ihre Anzahl im Zeitraum

konstant bleibt.²⁸ Bei Altenheimen wird aufgrund des demografischen Wandels von einem zunehmenden Bedarf und daher Ausbau ausgegangen, während Schulen aus dem gleichen Grund eher geschlossen und/oder zusammengelegt werden und ihr Bestand daher weiter abnimmt.²⁹

Tab. 5-12: Entwicklung der Anzahl von Nichtwohngebäuden und geschätzter Marktanteile der zugehörigen BHKW für den betrachteten Zeitraum 2010-2030

Modell-/Nichtwohngebäudetyp [el. KWK-Leistung]		Anzahl der Nichtwohngebäude			Anteil der Nichtwohngebäude mit BHKW			Installierte el. Leistung in den Nichtwohngebäuden [MW _{el}]		
		2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
NWG 1	Krankenhäuser (1.189 kW _{el})	2.100	2.100	2.100	11 %	21 %	35 %	274,7	524,3	873,9
NWG 2	Altenheime (71 kW _{el})	12.000	13.000	14.000	3 %	11 %	22 %	24,3	98,8	215,4
NWG 3	Hotels (20 kW _{el})	36.500	36.500	36.500	6 %	50 %	59 %	43,6	368,6	429,4
NWG 5	Bürogebäude (18 kW _{el})	85.000	85.000	85.000	3 %	36 %	36 %	45,9	550,8	550,8
NWG 6	Schulen (34 kW _{el})	34.500	33.500	32.500	3 %	36 %	36 %	35,2	410,0	397,8

Quellen: Eigene Annahmen und Abschätzungen

Bei den unterstellten Marktanteilen wird davon ausgegangen, dass die Krankenhäuser im Vergleich zu den anderen NWG-Typen aufgrund des hohen Wärme- als auch Strombedarfs und der einher gehenden guten Wirtschaftlichkeit bisher am besten erschlossen sind. Aufgrund des starken Ausbaus der BHKW gemäß der EE-Langfristszenarien 2011, werden die Marktanteile aber für alle Nichtwohngebäude deutlich ansteigen (müssen). Dies gilt im besonderen Maße für die kleineren Anlagen im Bereich der Objektversorgung, deren Marktanteil bis zum Jahr 2030 jeweils etwa um den Faktor zehn wächst.

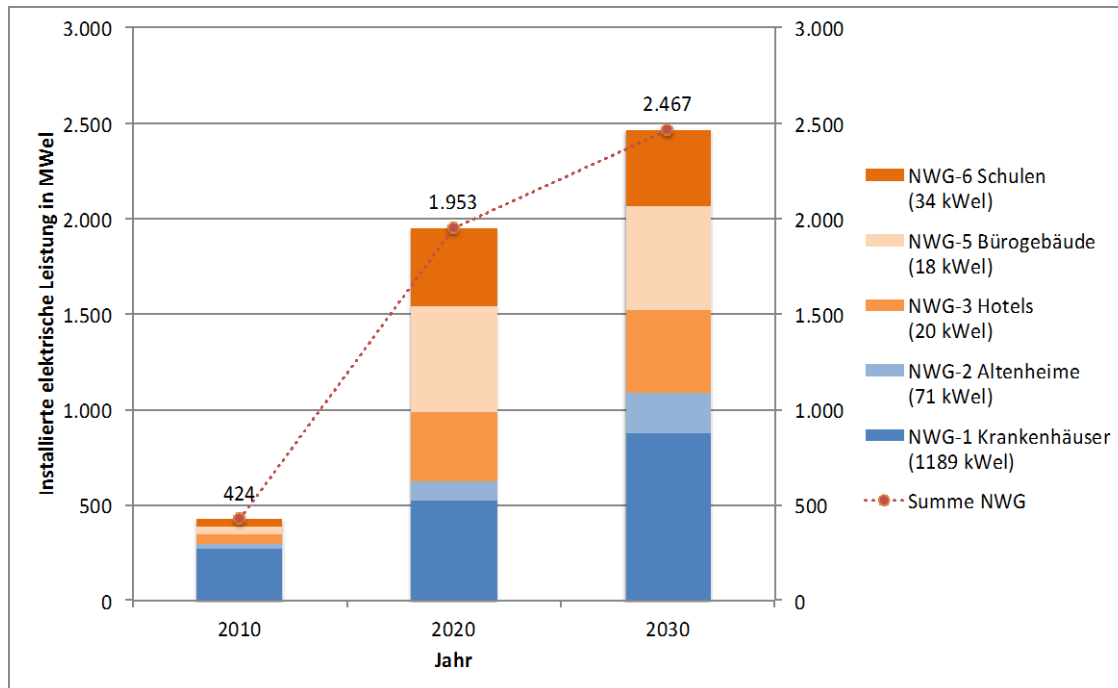
Aus den zuvor dargestellten Annahmen zur Entwicklung der NWG und der zugehörigen BHKW folgt unter Berücksichtigung der Entwicklung der installierten Leistungen gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 die in der Abb. 5-14 dargestellte Struktur der BHKW im Nichtwohngebäudebereich. Demnach wächst die installierte KWK-Leistung für alle NWG

28 Die Grundannahmen dahinter sind, dass der Bedarf an Krankenhäusern und Betten aufgrund von zunehmenden altersbedingten Krankheitsfällen eher steigt und dies den ökonomischen Druck für Schließungen kompensiert und dass bei Hotels und Bürogebäuden derzeit eher Überkapazitäten (im Falle von Büros viele Leerstände) vorhanden sind, so dass zu Gunsten von Bestandssicherung kein weiterer Ausbau stattfindet

29 Die Annahmen bedeuten, dass im Zeitraum in jeder Stadt etwa ein Altenheim neu errichtet und eine Schule geschlossen.

deutlich an und wird insgesamt bis zum Jahr 2030 um etwa den Faktor fünf auf ca. 2.500 MW_{el} gesteigert. Auf Krankenhäuser entfällt dann mit ca. 35 % Anteil weiterhin die größte installierte Leistung im betrachteten NWG-Bereich, alle anderen Anwendungsfälle (bis aus Altenheime) vergrößern ihre Anteile signifikant.

Abb. 5-14: Installierte KWK-Leistung nach NWG-Typen für den betrachteten Zeitraum (2010, 2020, 2030)



Quelle: Eigene Berechnungen

5.3.3 Wärmenetze

Die Wärmebereitstellung aus KWK über Wärmenetze dominiert heute sowohl die zentrale KWK als auch den hier im Fokus stehenden BHKW-Sektor (siehe Abb. 5-1 und Abb. 5-2). Daher kommt ihrer Betrachtung und Analyse aus (heutiger) Potenzialsicht eine besondere Bedeutung zu. Die Analysemöglichkeiten sind jedoch durch eine schlechte Datenlage stark eingeschränkt, da es für Wärmenetze im Unterschied zu den (Nicht-)Wohngebäuden keine synthetischen Bedarfsprofile gibt. Es bleibt daher nur die Option, dass geeignete Messdaten ermittelt und die zugehörigen Wärmenetze als Fallbeispiele analysiert werden. Dabei sollen hier, in Abgrenzung zu den vielen kleineren KWKs (< 100 kW_{el}) im WG und NWG-Bereich, Anlagen im Bereich bis 10 MW_{el} betrachtet werden. Diesbezüglich hat BHKW-Consult im August 2011 eine Abfrage bei einschlägigen Akteuren gestartet, die zu insgesamt sieben Antworten führte. Davon wurde mit zwei Akteuren, deren Angebot als besonders interessant bzw. geeignet für dieses Vorhaben eingestuft wurde, Kontakt aufgenommen und letztlich durch einen der beiden Daten zur Verfügung gestellt.

Die Analyse für die Minutenreservepotenziale von wärmenetzbezogenen BHKWs muss daher auf ein Fallbeispiel beschränkt bleiben. Die erforderlichen Daten für die Modellberechnungen wurden uns freundlicherweise von der Stadtwerke Schwäbisch Hall GmbH für eines ihrer Wärmenetze zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um das Heizkraftwerk Teurershof, welches den gleichnamigen Stadtteil mit Wärme versorgt und dafür aus insgesamt vier BHKW besteht: Eine große Anlage mit knapp 2 MW_{el} auf Erdgasbasis, zwei Biogas-BHKW mit jeweils

rd. 400 kW_{el} und ein Biogas-BHKW als Reserve mit 250 kW_{el}. Ferner gehören zwei Spitzen- und Reservekessel mit einer Gesamtleistung von ca. 10 MW_{th} sowie zwei große Wärmespeicher mit jeweils 200 m³ dazu. Das Wärmenetz ist zusätzlich über einen Wärmetauscher mit einer Leistung von 9.000 kW_{th} an das Fernwärme-Verbundnetz der Stadtwerke Schwäbisch Hall angeschlossen und kann von dort KWK-Wärme beziehen (Hinz, A.-J. 2012). Die Kenndaten sind in der Tab. 5-13 zusammengefasst. Für die Berechnungen wird die gesamte installierte Leistung ohne Reserve (d. h. rd. 2.800 kW_{el}) als verfügbare KWK-Leistung zu Grunde gelegt und unterstellt, dass keine Einspeisung durch das Fernwärmenetz erfolgt.

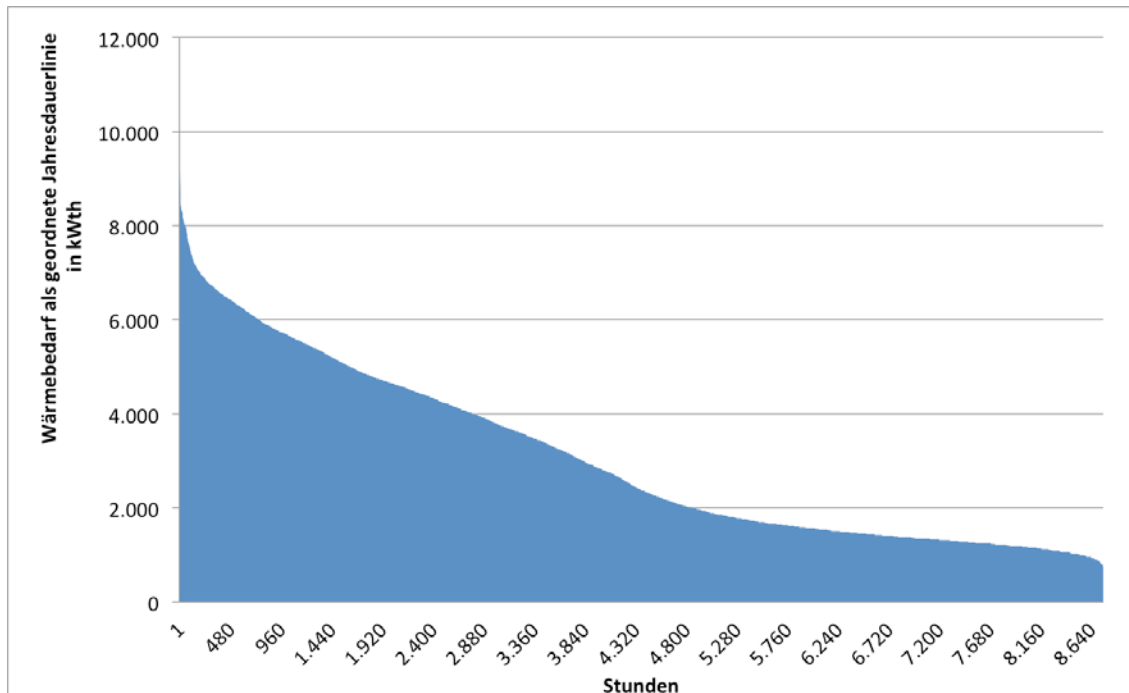
Tab. 5-13: Kennzahlen des betrachteten Wärmenetzes der Stadtwerke Schwäbisch Hall GmbH

Wärmebedarf pro Jahr [MWh _{th}]	26.770
Installierte KWK-Anlagenleistung [MW _{el}]	2,8
Installierte KWK-Anlagenleistung [MW _{th}]	2,9
Installierte thermische Kesselleistung [MW _{th}]	14,9
Maximaler Wärmebedarf [MW _{th}]	9,7
Minimaler Wärmebedarf [MW _{th}]	0,5

Quelle: (Hinz, A.-J. 2012)

Die Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs für dieses Wärmenetz ist weniger „bauchig“ als die synthetischen Bedarfsprofile für Wohngebäude oder Nichtwohngebäude. Dies ist unter anderem damit zu begründen, dass für dieses Wärmenetz reale Messdaten vorlagen (vgl. Abb. 5-15).

Abb. 5-15: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes im betrachteten Wärmenetz



Quelle: Eigene Berechnungen

Bei dem Fernwärmegebiet handelt es sich um ein größeres Wohngebiet, das nahezu ausschließlich Wohngebäude enthält. Lediglich einige Altenheime und Kindergärten werden ebenfalls mit Fernwärme versorgt. Es existieren keine industriellen Abnehmer oder größere Wärmesenken, wie Schwimmbäder oder größere Schulen, in dem Versorgungsgebiet. Die gemessene Jahresdauerlinie des Fernwärmegebietes ist typisch für reine Wohngebiete und zeichnet sich durch eine eher moderate Spitze sowie eine sich innerhalb von 100-200 Stunden auf rund 75 % der Maximalleistung reduzierende Wärmeleistung aus. Aufgrund des Gleichzeitigkeitsfaktors erfolgt eine gegenüber Einzelobjektversorgungen deutlich flachere Absenkung des benötigten Wärmebedarfs in der Übergangszeit. Die minimale (Sommer-)Last wird zu einem großen Teil durch die Wärmeverlustleistung geprägt, die in diesem Beispiel zwischen 300 kW und 400 kW angesiedelt sein dürfte.

Eine Hochrechnung des Fallbeispiels auf den Bestand mit Hilfe des Mengengerüsts der EE-Langfristszenarien 2011 ist, wie bei den Wohn- und Nichtwohngebäuden, aufgrund der Individualität des Beispiels nicht möglich.

5.3.4 Industrie

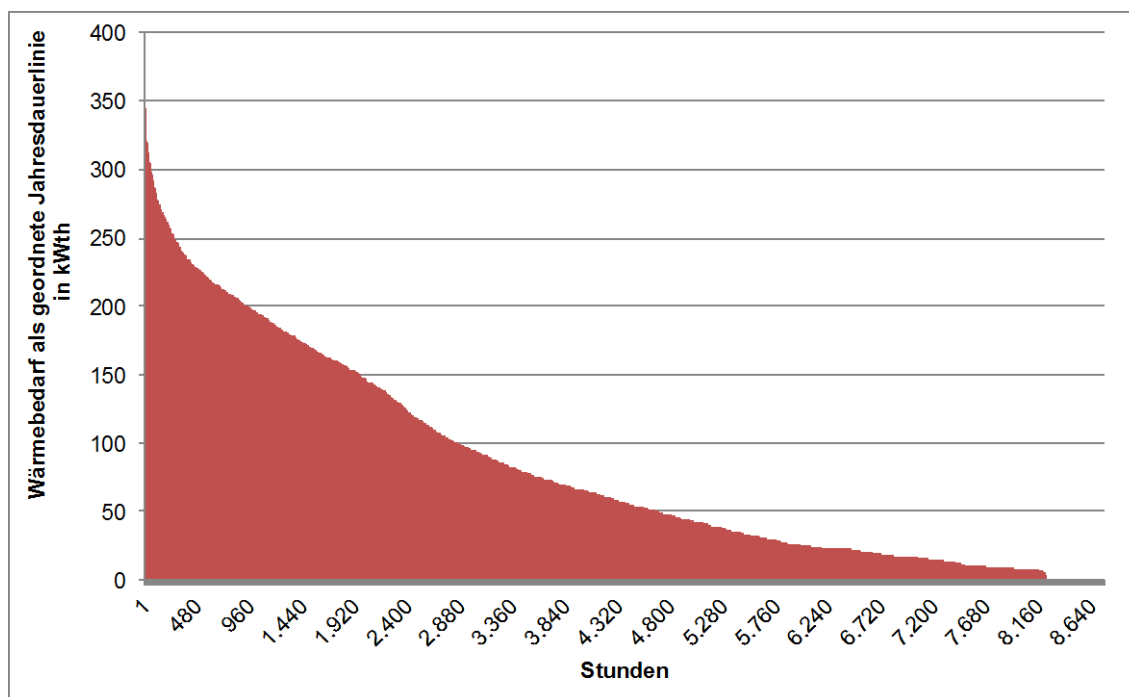
Der Industriebereich spielt bisher überwiegend für die zentrale KWK eine große Rolle, könnte aber gemäß der KWK-Entwicklungspfade der EE-Langfristszenarien 2011 auch für die BHKW künftig stärker an Bedeutung gewinnen. Die Ausgangslage auf der Datenseite ist im Vergleich zu den Wärmenetzen jedoch noch schlechter, da es auch hier keine geeigneten synthetischen Profile für den Wärmebedarf gibt und der Industriebereich zudem sehr heterogen ist. Selbst bei gleichem Jahreswärmebedarf werden die Lasten, Profile und Jahresdauerlinien und damit die Auslegung der Anlage von Branche zu Branche und ggf. bei unterschiedlichen Verfahrenstechniken bzw. Prozessabläufen sogar innerhalb einer Branche voneinander

abweichen. Daher sind zur Analyse des Industriebereichs geeignete Messdaten für Fallbeispiele notwendig.

Es konnten Daten für ein kleines mittelständisches Unternehmen im Lebensmittelgewerbe, eine Käserei, gewonnen werden. Der Jahreswärmebedarf wurde aus den vorliegenden Daten (Erdgaslastgang für gut 7.000 h/a³⁰) und der Annahme eines Kesselnutzungsgrades von 88 % auf rund 730.000 kWh abgeschätzt. Auf dieser Basis und der zugehörigen Jahresdauerlinie (siehe Abb. 5-16) wurde von BHKW-Consult dann ein BHKW mit folgenden Kennwerten ausgelegt:

- Thermische / elektrische Leistung: 82 kW_{th} / 50 kW_{el}
- Pufferspeichervolumen: 4 Kubikmeter (entsprechen rund einer Stunde Laufzeit als Standardauslegung); mit Vorlauf- / Rücklauftemperatur: 90 °C / 70 °C
- Abdeckungsgrad Wärme durch BHKW: rund 66 %
Volllaststunden: 5.900 h/a .

Abb. 5-16: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs für das betrachtete Industrie-Fallbeispiel (Käserei)



Quelle: (BHKW-Consult 2012a)

Die Jahresdauerlinie verläuft relativ steil und weist nur einen relativ geringen Anteil an Grundlast auf. Dies liegt am stark schwankenden Lastverlauf mit vielen Spitzen (siehe Abb. 7-11). Daher wird die Anlage im Unterschied zu einer weniger steilen Jahresdauerlinie kleiner ausgelegt, um im wärmegeführten Betrieb möglichst hohe Volllaststunden zu erreichen. Der Lastverlauf lässt einen Schichtbetrieb von Montag bis einschließlich Samstag erwarten, mit ruhender Produktion und deutlich verringerter Wärmenachfrage am Sonntag. Das zugehörige

30 Für die restlichen Stunden fehlten die Angaben; sie wurden durch eigene Interpolation ergänzt.

Minutenreserve-Potenzial dürfte im Vergleich zu Betrieben mit durchgängigem Schichtbetrieb und mit weniger stark schwankender Wärmenachfrage kleiner ausfallen. Eine weitergehende Abschätzung bzw. Einordnung in den Bereich der Lebensmittelproduktion ist jedoch ohne vergleichbare Datengrundlagen nicht möglich.

Eine Hochrechnung des Industrie-Fallbeispiels auf den BHKW-Bestand mit Hilfe des Mengengerüsts der EE-Langfristszenarien 2011, wie bei den Wohn- und Nichtwohngebäuden, wird daher aufgrund der Individualität des Beispiels, der Heterogenität des Sektors und der damit verbundenen großen Ungenauigkeiten nicht vorgenommen.

5.4 Zusammenfassung: Annahmen und Parameter

Für spätere Hochrechnungen der betrachteten Anwendungsfälle auf den gesamten BHKW-Bestand wird für den Ausbau von BHKW in Deutschland bis zum Jahr 2030 der Entwicklungspfad des Szenarios A der EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) angenommen. Demnach steigt die installierte elektrische Leistung bis dahin um insgesamt 7.300 MW_{el} bzw. um 2.900 MW_{el} allein im Bereich der Objektversorgung (BHKW < 50 kW_{el}), dem hier gewählten Untersuchungsfokus. Hier entfällt der größte Teil des Zuwachses (plus 2.500 MW_{el}) bereits auf die Zeit bis zum Jahr 2020. Dieser Entwicklungspfad ist aus heutiger Sicht als sehr ambitioniert anzusehen, was bei der Interpretation der errechneten Potenziale (Kapitel 7.8) und der CO₂-Emissionen (Kapitel 8.2) zu berücksichtigen ist.

Im Rahmen dieser Studie werden vier Versorgungsfälle unterschieden:

1. Wohngebäude,
2. Nichtwohngebäude,
3. Wärmenetze und
4. Industrie.

Für jeden dieser Bereiche werden konkrete Versorgungsobjekte ausgewählt und jeweils passende BHKW-Anlagen (inkl. Spitzenkessel und Speicher) zugeordnet und ausgelegt. Die Dimensionierung erfolgt dabei wie bisher üblich auf die thermische Grundlast (ca. 30 % der Spitzenlast), möglichst hohe Vollbenutzungstunden und wärmegeführten Betrieb. Im Wohngebäudebereich werden zehn Objekte verschiedener Größe und unterschiedlicher Effizienzstandards ausgewählt, um die Bandbreite des Bestands abzubilden. Im Nichtwohngebäudebereich werden fünf verschiedene Gebäudetypen mit hohem KWK-Potenzial betrachtet, um einen großen und relevanten Anteil dieses Anwendungsbereichs abzudecken. Auf dieser Basis erfolgen dann die Hochrechnungen für BHKW in Wohn- und Nichtwohngebäuden auf den Bestand in den Jahren 2010, 2020 und 2030. Die Bereiche Wärmenetze und Industrie werden dagegen anhand von jeweils einem Fallbeispiel exemplarisch untersucht, da hier keine ausreichende Datenbasis für eine „repräsentative“ sektorale Abbildung und Hochrechnung vorliegt. Die gemäß Auslegung resultierenden Anlagengrößen liegen zwischen 1 und 50 kW_{el} (Wohngebäude), 20 und 1.200 kW_{el} (Nichtwohngebäude), bei 2.800 kW_{el} (Wärmenetz) und 50 kW_{el} (Industrie).

Ein weiterer notwendiger Eingangsparameter für die Modellierung ist der Verlauf des Wärmebedarfs der Versorgungsobjekte in stündlicher Auflösung. Für Wohn- und Nichtwohngebäude werden synthetische Wärmelastprofile auf der Basis der Standardlastprofile gemäß (BGW 2006) sowie historischer Tagesmitteltemperaturen bestimmt und verwendet. Die charakteristische Verläufe der Tagesmitteltemperaturen werden aus den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes (Christoffer et al. 2004) abgeleitet. Für die Fallbeispiele aus den Bereichen Industrie und Wärmenetz liegen keine synthetischen Profile vor, daher wurden hier individuelle, gemessene Wärmebedarfsverläufe zur BHKW-Auslegung genutzt.

6 Modell zur Bestimmung der Minutenreserve-Potenziale von BHKW

Für die Bestimmung des technischen Minutenreserve-Potenzials von BHKW wurde ein im Wesentlichen bottom-up orientiertes Optimierungsmodell auf der Basis der Programme MATLAB³¹ und EXCEL entwickelt. Das Modell besteht aus einer Vielzahl von Teilmodellen (Kapitel 6.1), die jeweils eine konkrete KWK-Versorgungsaufgabe simulieren und den Einsatz der Anlagenkomponenten optimieren kann. Die Versorgungsaufgabe besteht aus einem Objekttyp und dafür ausgelegten KWK-Anlagen - in Form von Pools -, für unterschiedliche Betriebsweisen (wärme- und minutenreservegeführter Betrieb). Dazu besteht jedes Teilmodell aus drei verschiedenen Modulen, die aber jeweils modelltechnisch für alle Teilmodelle identisch sind.

Modul 1 (Kapitel 6.2) ermittelt optimale Fahrpläne für maximale Angebote an positiver bzw. negativer Minutenreserve. Modul 2 (Kapitel 6.3) fällt für jede Angebots-Zeitscheibe zufallsgesteuert die Entscheidung, ob positive oder negative Minutenreserve angeboten wird. Modul 3 (Kapitel 6.4) vergleicht die Fahrpläne aus Modul 1 mit dem tatsächlich erfolgten Minutenreserveabruf im Jahr 2010 und passt die Fahrpläne und den Betrieb der KWK-Anlagen entsprechend an. Eine Zusammenführung der einzelnen Teilmodelle jedes Gebäudetyps ergibt letztlich den möglichen Gesamtbeitrag der BHKW zum Minutenreservemarkt.

6.1 Gesamtmodell

Die Gesamtheit der BHKW, die laut ausgewähltem Szenario in den Betrachtungsjahren 2010, 2020 und 2030 installiert sind, wird über einsatzspezifische Teilmodelle abgebildet. Die Teilmodelle werden nach der Art des Versorgungsobjektes (z. B. Wohngebäude) und der Art des Gebäudes (Altbau, EnEV2007 oder Passivhaus; Einfamilien-, Mehrfamilien-, Reihen- oder Hochhaus) unterschieden.

Die folgenden Erläuterungen zum Modell beziehen sich beispielhaft auf den Einsatzbereich Wohngebäude und die zugehörigen Teilmodelle. Die Modellierung der anderen Einsatzfelder (Nichtwohngebäude, Wärmenetz und Industrie) wurde weitgehend analog durchgeführt.

Im Bereich Wohngebäude werden zehn verschiedene Gebäudetypen mit jeweils einer dafür ausgelegten KWK-Anlage betrachtet. Dieser Bereich wird demnach über insgesamt 10 Teilmodelle abgebildet. Die Teilmodelle basieren dabei jeweils auf den konkreten Parametern für das betrachtete Wohngebäude, dessen Wärmebedarfsprofile und zugeordneter KWK-Anlage auf Objektebene. Sie bilden diese jedoch nicht als einzelne Objekte und Anlagen ab, sondern als Pool, dessen Größe aus dem Mengengerüst des entsprechenden Szenarios abgeleitet wird. Ein Teilmodell besteht also aus einem Pool von Objekten und KWK-Anlagen mit jeweils gleichem Wärmebedarf und -profil und gleicher Auslegung von KWK- und Spitzenkesselleistung sowie Speichergröße.

31 Matlab (Eigenbezeichnung ist MATLAB) ist ein kommerzielles Softwareprodukt der Firma MathWorks Inc. Es kann bei der Lösung komplexer mathematischer Probleme genutzt werden.

Wenn zum Beispiel aus dem Szenario eine Poolgröße von Tsd. KWK-Anlagen mit jeweils 15 kW elektrischer Leistung, einem 19 kW_{th} Spitzenkessel und einer Speichergröße von 20 kWh_{th} folgt, dann wird im Teilmodell eine gepoolte Anlage mit 15 MW_{el} Leistung³², 19 MW_{th} Spitzenkessel und 20 MWh_{th} Speicher simuliert, die den tausendfachen Wärmebedarf des zugehörigen Objekts gemäß seinem Wärmelastgang decken muss. Dabei wird unterstellt, dass nicht alle KWK-Anlagen synchron betrieben werden müssen (Gleichzeitigkeitsfaktor < 1), um die gesamte Wärmenachfrage des Gebäudepools zu jeder Zeit zu decken. Dies erscheint aufgrund der Vielzahl von Objekten und Anlagen sowie der verschiedenen Betriebsmöglichkeiten (KWK, Spitzenkessel oder Speicher) den jeweiligen Bedarf zu decken, gerechtfertigt.

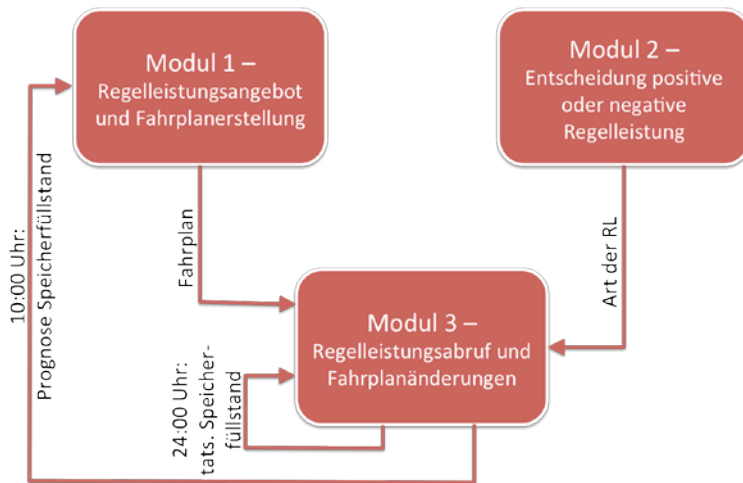
Betrachtungen zu Taktung sowie An- und Abfahrverhalten der Einzelanlagen in einem Pool erfolgen nicht. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass ein ideales Poolmanagement in der Lage ist, alle Einzelanlagen so zu koordinieren, dass keine technischen Restriktionen verletzt werden. Zudem zeigen die diesbezüglich bekannten technischen Parameter der ausgewählten KWK-Anlagen, dass die mögliche Taktung in der Regel deutlich unterhalb der zeitlichen Auflösung des Modells liegt und das An-/Abfahrverhalten generell die Anforderungen des Minutenreservemarktes erfüllt.

Wenn in der folgenden Modellbeschreibung die Begriffe „KWK-Anlage“, „Speicher“, „Wärmebedarf“ etc. genutzt werden, meint dies stets den Pool von KWK-Anlagen, die Summe der Speicher, den kumulierten Wärmebedarf etc. Demnach bedeutet „Teillast“ hier nicht, dass alle beteiligten Anlagen in Teillast fahren, sondern dass (aufgrund des idealen Poolmanagements) ein Teil der Anlagen in Volllast gefahren wird, während die restlichen Anlagen nicht in Betrieb sind.

Jedes Teilmodell besteht aus drei Modulen, deren Hauptaufgabe und Zusammenspiel innerhalb des Teilmodells in Abb. 6-1 dargestellt wird. Sie bilden den Kern der Modellierung und sind so aufgebaut, dass beide Betriebsweisen (wärmegeführt oder netzgeführt) und beide Szenarien (Basis- und Flexibilisierungsszenario) mit dem gleichen Modell berechnet werden können. Dazu werden jeweils nicht beteiligte Modellkomponenten (siehe Kapitel 6.2) deaktiviert. So wird z. B. der Notkühler nur im Flexibilisierungsszenario genutzt und bei wärmegeführter Betriebsweise keine Regelleistung angeboten.

32 Dies stellt den Idealfall dar. Begrenzte Verfügbarkeiten und Anlagenausfälle werden in den Berechnungen durch pauschale Abschläge (z. B. minus 20 %) bei der Pool-Leistung berücksichtigt werden.

Abb. 6-1: Iteratives Zusammenspiel der drei Module innerhalb eines Teilmodells



Quelle: Eigene Darstellung

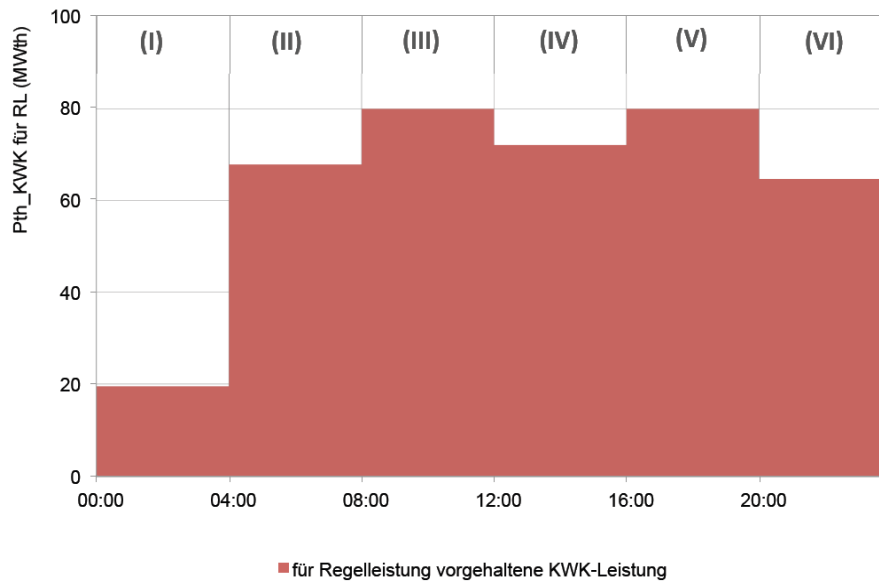
Für jeden Angebotszeitraum (ein bzw. drei Tage) wird zunächst durch Modul 1 ein Fahrplan für die Wärmebedarfsdeckung und die Regelleistungsbereitstellung erstellt. Dieser Fahrplan wird an Modul 3 übergeben. Modul 2 liefert die Information, welche Art der Regelleistung in welcher Zeitscheibe des Angebotszeitraumes bereitgestellt werden soll. Anschließend wird in Modul 3 der Angebotszeitraum „durchgespielt“ und der Abruf von Regelenergie modelliert.

Das Angebot für den nächsten Zeitraum muss bereits am Vormittag des Vortages abgegeben werden. Zu diesem Zeitpunkt ist der genaue Systemzustand, also der Speicherfüllstand, der zu Beginn des Angebotszeitraumes vorhanden sein wird, noch nicht bekannt. Deswegen gibt Modul 3 zum Zeitpunkt der Angebotsabgabe unter der Annahme, dass bis zum nächsten Tag keine Korrekturen durch Regelleistungsabruf mehr erfolgen müssen, eine Prognose des Speicherfüllstandes aus. Damit berechnet dann Modul 1 wiederum den Fahrplan für den nächsten Tag. Wenn dieser Tag dann in Modul 3 durchgespielt wird, wird der tatsächliche Speicherfüllstand zu Beginn des Tages aus der Modellierung des Vortages übernommen. Sollte der Fahrplan nicht erfüllt werden können, weil der Speicher aufgrund einer falschen Prognose leer wird, wird wie zuvor beschrieben der Spitzenkessel eingesetzt.

Im Folgenden wird exemplarisch für einen Tag dargestellt, wie die Bereitstellung und Lieferung von Regelleistung mit Hilfe der Module 1 bis 3 berechnet wird. Innerhalb der Module wird dazu neben dem Einsatz der KWK auch der Einsatz der anderen Systemkomponenten (Spitzenkessel, Speicher, ggf. Notkühler) modelliert. Für eine bessere Verständlichkeit werden diese Komponenten hier aber zunächst nicht mit dargestellt. Dies erfolgt anschließend im Rahmen detaillierterer Modulbeschreibungen, wobei auch auf den Einsatz der Anlagenkomponenten zur Deckung des Wärmebedarfs eingegangen wird.

In Modul 1 wird mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmuses die maximale Kapazität bestimmt, die in jeder Zeitscheibe eines Angebotszeitraumes für Regelleistung bereitgestellt werden kann (siehe Abb. 6-2). Dabei ist noch nicht festgelegt, ob die bereitgestellte Regelleistung positiv oder negativ ist (zur Erläuterung siehe Kapitel 6.2).

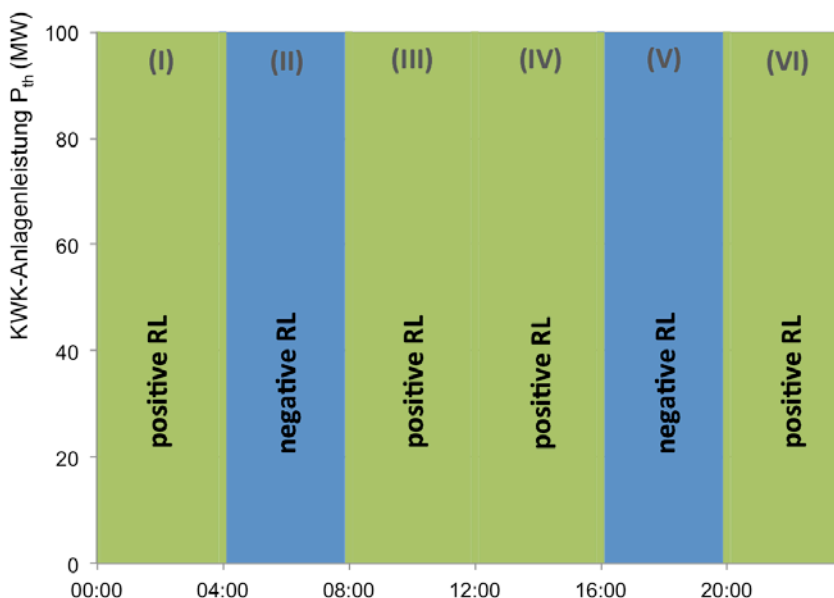
Abb. 6-2: Exemplarische Darstellung der Leistung der KWK, die am Beispieltag für die Bereitstellung von Regelleistung maximal freigehalten werden kann.



Quelle: Eigene Darstellung

In Modul 2 wird für jede Zeitscheibe des Folgetages bestimmt, ob die vorzuhaltende Regelleistung positiv oder negativ ist (siehe Abb. 6-3)

Abb. 6-3: Exemplarische Darstellung eines Entscheidungsergebnis für jede Zeitscheibe des Beispieltags, ob positive oder negative Regelleistung angeboten wird

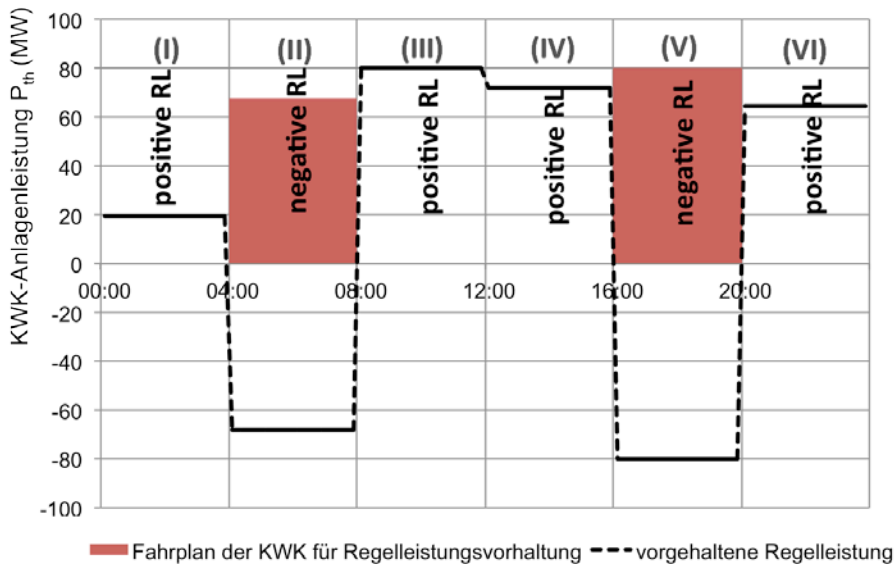


Quelle: Eigene Darstellung

Anhand der Ergebnisse aus Modul 1 und 2 wird das mögliche Angebot für die Regelleistungsbereitstellung im nächsten Angebotszeitraum berechnet und der entsprechende Fahrplan der KWK-Anlage erstellt. Da der Abruf von Regelenergie nicht prognostiziert werden kann, wird dabei zunächst davon ausgegangen, dass kein Abruf stattfindet. Soll in einer Zeitscheibe positive Regelleistung bereitgestellt werden, wird die entsprechende Kapazität freigehalten (siehe Abb. 6-4 - Zeitscheiben I, III, IV, VI). Für die Vorhaltung von negativer

Regelleistung wird die KWK dagegen mit der angebotenen Leistung gefahren, um im Falle eines Abrufes die Leistung entsprechend reduzieren zu können (Zeitscheiben II und V in Abb. 6-4).

Abb. 6-4: Exemplarische Darstellung des Fahrplans für die KWK als Resultat aus vorzuhaltender Leistung (Modul 1) und Art der bereitzustellenden Regelleistung (Modul 2)

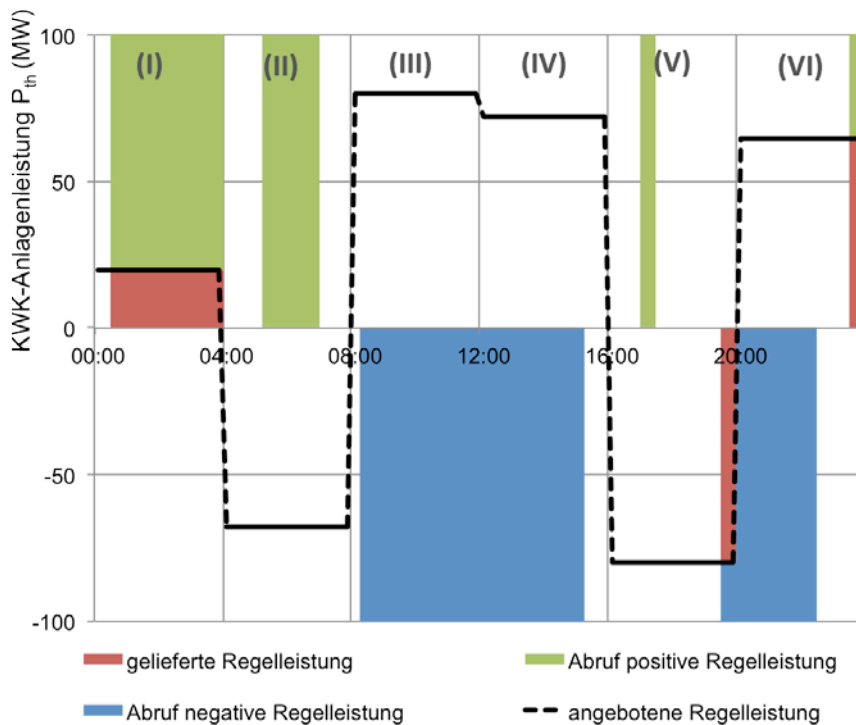


Quelle: Eigene Darstellung

In Modul 3 wird anschließend der Angebotszeitraum durchgespielt und der tatsächliche Abruf von Regelleistung im ausgewählten Referenz-Jahr 2010 berücksichtigt (ex-post Analyse). Da bei der Fahrplanerstellung davon ausgegangen wurde, dass kein Abruf stattfindet, werden Korrekturen des Fahrplans notwendig.

Zunächst wird die Zeitreihe der abgerufenen Regelleistung eingelesen und mit der Art und Höhe der angebotenen Leistung verglichen (Abb. 6-5). Wenn die entsprechende Regelleistung während der Angebotszeit angefordert wird, dann wird sie in der angebotenen Höhe geliefert.

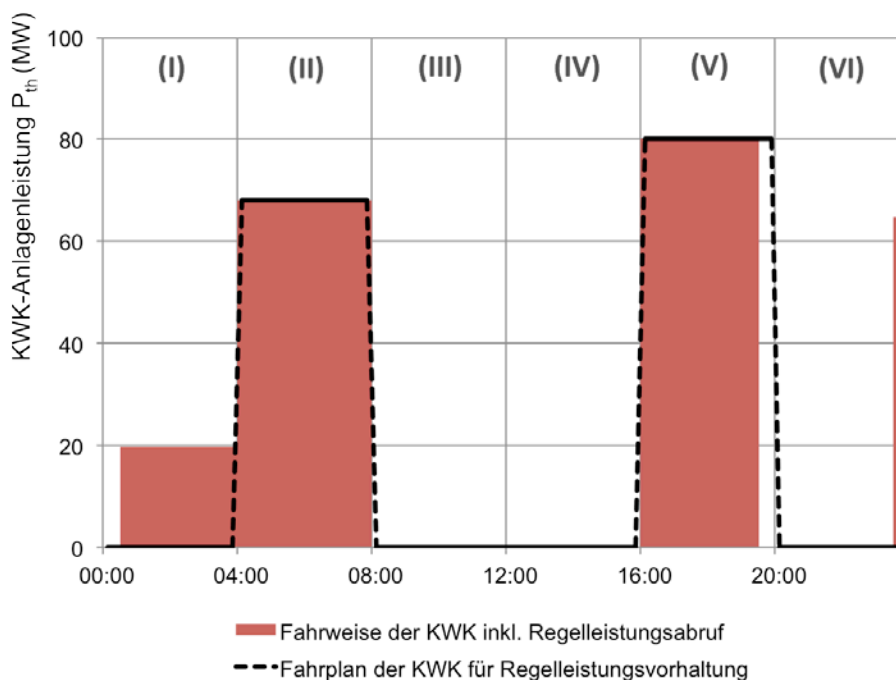
Abb. 6-5: Exemplarische Darstellung von angebotener, abgerufener und gelieferter Regelleistung am Beispieltag



Quelle: Eigene Darstellung

Durch den Abruf von Regelleistung muss der Fahrplan um die in Abb. 6-5 rot dargestellten Flächen korrigiert werden. In Abb. 6-6 erkennt man die Abweichungen gegenüber dem zuvor aufgestellten Fahrplan (siehe Abb. 6-4) für die bereitzuhaltende Regelleistung.

Abb. 6-6: Exemplarische Darstellung von Fahrplan und tatsächlicher Fahrweise bei Regelleistungsabruf am Beispieltag



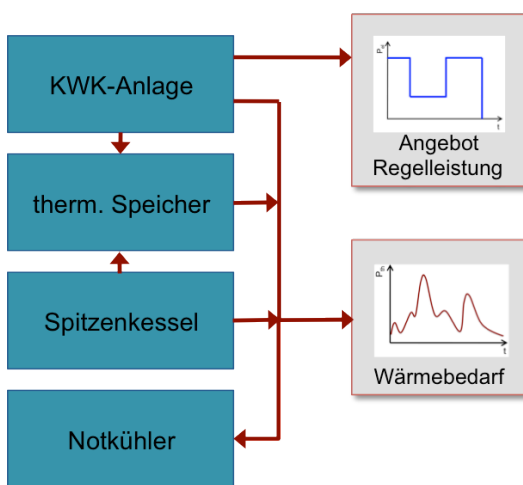
Quelle: Eigene Darstellung

6.2 Modul 1 – Regelleistungsangebot und Fahrplanerstellung

Die Aufgabe des Moduls 1 ist es, den prognostizierten Wärmebedarf des Versorgungsobjektes zu decken und dabei zugleich möglichst viel Regelleistung am Minutenreservemarkt bereitzustellen. Dafür wird ein Optimierungsalgorithmus (siehe unten) genutzt. Das Ergebnis des Moduls ist ein Fahrplan für den nächsten Angebotszeitraum (ein Tag oder drei Tage am Wochenende) für die Bereitstellung von Regelleistung und die Deckung des Wärmebedarfes in Viertelstundenschritten. Auf Basis dieses Fahrplans wird das Regelleistungsangebot der KWK-Anlage für den nächsten Tag erstellt.

Die Komponenten, mit denen das Modell arbeitet, sind die KWK-Anlage, der Spitzenkessel, der Speicher und der Notkühler (siehe Abb. 6-7).

Abb. 6-7: Technische Komponenten innerhalb des Modul 1



Quelle: Eigene Darstellung

Das Modell kann entscheiden, einen Teil der Leistung der KWK-Anlage für die Bereitstellung von Regelleistung zu nutzen. Dabei muss die angebotene Leistung in jeder vier-Stunden-Zeitscheibe konstant sein. Die darüber hinaus verbleibende KWK-Leistung (nicht angebotene Leistung) kann flexibel zur Wärmebedarfsdeckung eingesetzt werden.

Es ist zu beachten, dass bei der Entscheidung, in welcher Höhe Regelleistung bereitgestellt wird, die Frage, ob diese positiv oder negativ ist, aus folgenden Gründen grundsätzlich keine Rolle spielt:

- Die Bereitstellung von positiver Regelleistung bedeutet, einen Teil der Anlagenleistung nicht zu nutzen. Nur im Falle des Abrufs von Regelenergie wird die Anlagenleistung entsprechend erhöht. Positive Regelleistung kann nur angeboten werden, wenn es möglich ist, den Wärmebedarf während des Gebotszeitraumes auch dann zu decken, wenn keine Regelleistung abgerufen wird. Dies ist nur möglich, wenn die Wärmeproduktion der verbleibenden Kapazität der KWK-Anlage, des Spitzenkessels und die gespeicherte Wärme ausreichen, den Wärmebedarf zu jedem Zeitpunkt zu decken.
- Regelleistung darf nur angeboten werden, wenn sie auch während des gesamten Angebotszeitraumes in voller Höhe abgerufen werden könnte. Somit würde die KWK-Anlage während der gesamten Zeitscheibe Wärme proportional zur abgerufenen Regelleistung produzieren. Diese Wärme muss zur Deckung des Wärmebedarfs genutzt, in den Speicher geladen oder ggf. durch einen Notkühler abgeführt werden können.

- Für die negative Regelleistung können äquivalente Überlegungen angestellt werden: Es muss einerseits möglich sein, dass kein Abruf von Regelenergie stattfindet. Dann ist die Wärme, die durch den Betrieb der KWK-Anlage entsteht, zu nutzen oder abzuführen. Andererseits muss auch während der gesamten Zeitscheibe Regelenergie geliefert werden und die Anlage entsprechend gedrosselt werden können, wobei der Wärmebedarf trotzdem jederzeit zu decken ist.

Somit sind sowohl für die Bereitstellung positiver - als auch negativer Regelleistung die gleichen Bedingungen zu erfüllen. Deswegen wird bei der Bestimmung des maximal möglichen Regelleistungsangebotes zunächst nicht zwischen positiver und negativer Regelleistung unterschieden.

Der genutzte Optimierungsalgorithmus arbeitet mit Hilfe einer Gewichtungsfunktion, welche der Wärmelieferung aus den verschiedenen Anlagenkomponenten unterschiedliche Gewichtungsfaktoren zuweist. Diese Funktion dient nicht dazu, den wirtschaftlich optimalen Betrieb zu bestimmen, sondern dazu, die Einsatzreihenfolge der Komponenten zu gewichten, also beispielsweise die Wärmenutzung aus dem BHKW dem Einsatz des Spitzenkessels vorzuziehen. Es gilt die Formel 4:

$$G_{RL} > G_{KWK} > G_{SF} > G_{SK} > G_{NK}$$

Formel 4: Einsatzreihenfolge der Komponenten

(G: Gewichtung pro kW_{th}, RL: Regelleistung, KWK: Nicht Regelleistungsbetrieb der KWK-Anlage, SF: Speicherfüllstand, SK: Spitzenkessel, NK: Notkühler)

Dabei sind die Gewichtungen so gewählt, dass der Betrieb des Anlagenpools realitätsnah abgebildet wird. Das Verhältnis der ersten vier Gewichtungen zueinander hat keinen Einfluss auf das Ergebnis, so lange die Bedingung in Formel 4 erfüllt ist. Die Gewichtung des Angebots der Regelleistung wird positiv gewählt, um einen Anreiz für das Modell zu schaffen, diese bevorzugt einzusetzen. Die Gewichtung des KWK-Betriebs ohne Angebot von Regelleistung wird neutral gewichtet, die des Speicherfüllstandes leicht negativ. Die minimal negative Gewichtung des Speicherfüllstandes beschreibt die Tatsache, dass die Speicherverluste, welche innerhalb dieses Modells als eine lineare Funktion des Speicherinhaltes implementiert werden, nicht erwünscht sind. Die Gewichtung des Spitzenkesselseinsatzes ist negativ gewählt. Diese Gewichtungen führen dazu, dass das Modell so viel Regelleistung einsetzt, wie möglich, da diese die einzige positive Gewichtung bietet. Nachfolgend wird die direkte Wärmenutzung aus der KWK-Anlage vor der Einspeicherung präferiert, der Spitzenkessel wird dem Speicher nachgeordnet eingesetzt.

Die Zielfunktion ist in Formel 5 dargestellt: Die Aufgabe der Optimierung ist es, die Komponenten so einzusetzen, dass der virtuelle „Gewinn“ maximiert wird.

$$\max \sum_t \left[G_{RL} \quad G_{KWK} \quad G_{SF} \quad G_{SK} \quad G_{NK} \right] * \begin{bmatrix} s * P_{RL}(t) \\ P_{KWK}(t) \\ E_{SF}(t) \\ P_{SK}(t) \\ P_{NK}(t) \end{bmatrix}$$

(s: Stromkennzahl, P: Leistung in kW_{th}, E: Energie in kWh_{th})

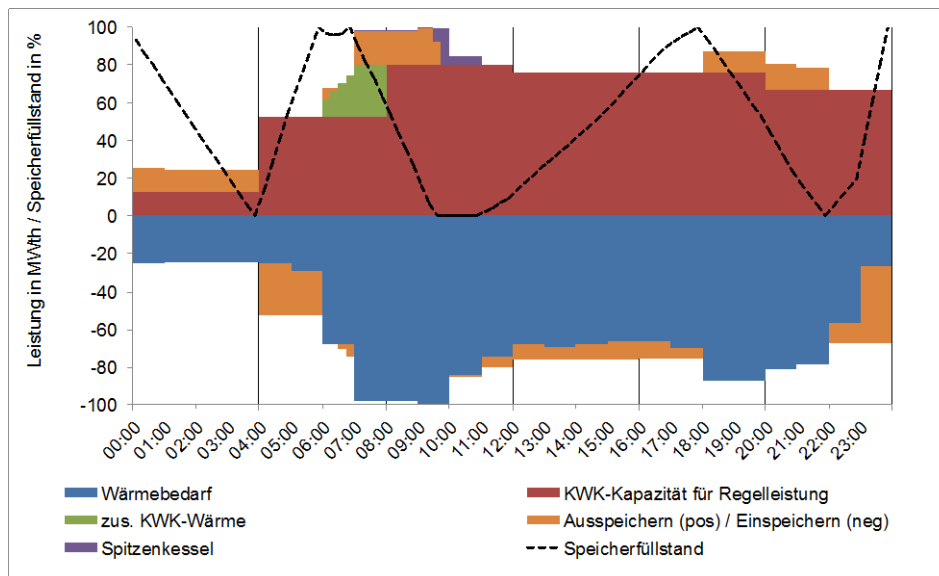
Formel 5: Gewinnmaximierung

Die Randbedingungen für die Optimierung sind die unbedingte Deckung des Wärmebedarfs, die begrenzten thermischen Leistungen von KWK-Anlage, Spitzenkessel, Speicher und Notkühler, thermische Verluste im Speicher sowie minimale und maximale Speicherfüllstände.

Die Flexibilisierungsstrategie mit Einsatz des Notkühlers muss nicht mit Hilfe der Optimierung berechnet werden, da der Notkühler auf die thermische Leistung der KWK-Anlage dimensioniert ist und so immer ein Angebot an Regelleistung ermöglicht, welche der elektrischen Leistung der Anlage entspricht. Die Wärmeabnahmefähigkeit ist mit einem Notkühler immer gegeben, aus diesem Grund kann die Betriebsweise des Flexibilisierungsfalls „Notkühler“ auch mit einer einfacheren Betriebsstrategie modelliert werden.

Die Abb. 6-8 zeigt beispielhaft für einen Tag und obige Gewichtungsfaktoren das Ergebnis der Optimierungsrechnungen. Man erkennt, dass der Speicher eingesetzt wird, um möglichst hohe Regelleistung bereitzustellen: Während der ersten Zeitscheibe wird etwas weniger Leistung angeboten (Reihe „KWK-Kapazität für Regelleistung“) als zur Deckung des Wärmebedarfs notwendig wäre. Die restliche Wärme wird aus dem Speicher bereitgestellt. Dadurch wird der Speicher entleert und kann in der zweiten Zeitscheibe soviel Wärme aufnehmen, dass trotz eines geringen Wärmebedarfs zu Beginn der Zeitscheibe über die gesamten vier Stunden eine höhere Leistung als Regelleistung bereitgestellt werden kann. Gegen Ende der zweiten Zeitscheibe übersteigt der Wärmebedarf dann die Wärme, die durch das regelleistungs anbietende BHKW erzeugt wird. Deswegen wird Wärme aus dem Speicher genutzt. Zusätzlich wird auch ein Teil der KWK-Kapazität, der nicht für die Bereitstellung von Regelleistung verwendet wird, eingesetzt, um den Wärmebedarf zu decken (Reihe „zus. KWK-Wärme“). Gegen neun Uhr (in der dritten Zeitscheibe) ist der Speicher bis zu seinem Mindestfüllstand entladen, der Wärmebedarf übersteigt immer noch die Wärme aus der anbietenden KWK. In diesem Fall muss der Spitzenkessel eingesetzt werden, um den Wärmebedarf zu decken.

Abb. 6-8: Exemplarische Darstellung eines Optimierungsergebnisses für einen Tag



Quelle: Eigene Berechnungen

6.3 Modul 2 – Angebotsentscheidung – positive oder negative Regelleistung

Wie zuvor gezeigt wurde, ist für die Entscheidung, in welcher Höhe Regelleistung angeboten werden soll, nicht relevant, ob es sich dabei um positive oder negative Regelleistung handelt. Im zweiten Modul wird dann über die Art des Angebots entschieden.

Es gibt verschiedene Optionen, auf deren Basis diese Entscheidung getroffen werden kann. So ist beispielsweise negative Regelleistung zu bevorzugen, wenn möglichst hohe Auslastungen der KWK-Anlage gewünscht sind.³³ Damit aber der Beitrag untersucht werden kann, den BHKW zum gesamten, nicht nur zum negativen Minutenreservemarkt bieten können, wird hier eine andere Entscheidungsgrundlage gewählt: Im Modell sollen die tatsächlichen Verhältnisse des Angebotes von positiver und negativer Minutenreserve abgebildet werden.

Dazu werden für jede 4-Stunden-Zeitscheibe der vergangenen Jahre (siehe Kapitel 4.3) die positive und negative Leistung analysiert, die vorgehalten wurden. In diesem Verhältnis sollen dann auch die Teilmodelle in der Modellierung anbieten.

Dafür werden zufällig generierte Zahlen zwischen Null und Eins genutzt. Beispielsweise liege das Verhältnis in einer bestimmten Zeitscheibe bei 40 % positiver zu 60 % negativer Minutenreserve. Dann wird, falls die zufällig generierte Zahl kleiner als 0,4 ist, positive Minutenreserve angeboten, andernfalls negative. Dadurch, dass in jedem Teilmodell $365 \cdot 6 = 2.190$ Zeitscheiben berechnet werden und in jeder Zeitscheibe 50 Teilmodelle Regelleistung anbieten, ist zu erwarten, dass die damit erzielten Verhältnisse von positiver und negativer Minutenreserve den tatsächlichen Verhältnissen ausreichend gut entsprechen.

³³ Dies gilt unter der Annahme, dass in der Summe weniger Regelleistung abgerufen als angeboten wird.

6.4 Modul 3 – Fahrplanänderungen durch Regelleistungsabruf

Die in Modul 1 durchgeführte Optimierung berechnet zunächst nur das Angebot an Regelleistung, das ein Teilmodell bereitstellt. Die dabei berechnete Wärmebedarfsdeckung bildet den Fahrplan für den Einsatz der KWK-Anlage, des Spitzenkessels, des Notkühlers und des thermischen Speichers. In Modul 3 wird ermittelt, wie die tatsächliche Wärmebedarfsdeckung unter Einbeziehung des Regelleistungsabrufes stattfindet. Dazu werden historische Zeitreihen der abgerufenen Regelennergie genutzt.

Es wird vereinfachend angenommen, dass der Wärmebedarf nicht von der Prognose abweicht. Der Abruf von Regelennergie hingegen kann nicht prognostiziert und deswegen bei der Erstellung des Fahrplanes nicht einbezogen werden. Die Optimierung des Regelleistungsangebotes, die in Modul 1 stattfindet, ist so ausgelegt, dass sowohl ein ständiger Abruf von Regelennergie möglich ist als auch der Fall, dass keinerlei Regelennergie angefordert wird, ohne dass die Randbedingungen verletzt werden.

Im dritten Modul wird der tatsächlich stattfindende Regelleistungsabruf simuliert. Aus historischen Daten für das Jahr 2010 wird zunächst ermittelt, welcher Anteil der bereitgestellten positiven und negativen Regelleistung abgerufen wurde. Dieser Anteil liegt für jeden Viertelstundenwert zwischen Null und Eins. Bei der jedem Teilmodell wird jeder Zeitscheibe, in welcher positive oder negative Regelleistung angeboten wird, eine zufällige Zahl zwischen Null und Eins zugewiesen. Diese Zahl repräsentiert die Position der jeweiligen KWK-Anlage in der Arbeitspreisliste. Wenn die zufällig gewählte Zahl kleiner als der Anteil der abgerufenen Regelleistung in einer Viertelstunde ist, wird die komplette angebotene Regelleistung der jeweiligen KWK-Anlage abgerufen; ist sie größer wird die Regelleistung nicht angefordert. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Berücksichtigung der historische Angebots- und Abrufstruktur des Regelenenergiemarktes in dem Modell, gleichzeitig kann sich so aber von den absoluten Werten der Regelleistungsbereitstellung gelöst werden. Damit wird der Umstand berücksichtigt, dass eine belastbare Aussage über die Höhe der zukünftig erforderlichen Regelleistung nicht getroffen werden kann. Es ist aber zulässig anzunehmen, dass auch ein zukünftiger Regelleistungsabruf von stochastisch verteilten Bündelabrufen dominiert wird.

Im dritten Modul werden auch die durch den Abruf notwendigen Fahrplanänderungen modelliert. Der innerhalb des Modells erstellte Fahrplan-Begriff unterscheidet sich jedoch von dem Fahrplan, der dem Netzbetreiber gemeldet wird, in dem die Anlage bei negativer Minutenreserve läuft und bei positiver die entsprechende Leistung freihält. Im modellinternen Fahrplan wird hingegen davon ausgegangen, dass die KWK-Anlage stets läuft, wenn Regelleistung angeboten wird, unabhängig davon, ob diese positiv oder negativ ist. Was dies insbesondere für die Bereitstellung und den Abruf positiver Minutenreserve bedeutet, wird im Folgenden beschrieben; zuvor jedoch wird das grundsätzliche Vorgehen zunächst anhand von Bereitstellung und Abruf von negativer Regelleistung erläutert.

In diesem Fall fährt die KWK-Anlage mit angemeldeter Leistung und deckt dabei den entsprechenden Anteil des Wärmebedarfs. Wird nun in einem Intervall Regelleistung abgerufen, wird die Leistung der KWK-Anlage entsprechend gesenkt. Der Wärmebedarf muss trotzdem weiterhin gedeckt werden. Dazu wird Wärme aus dem Speicher entnommen. Sollte nicht genügend Wärme im Speicher vorhanden sein, wird der Spitzenkessel zugeschaltet. Anschließend wird das nächste Intervall betrachtet. Falls in diesem Intervall wieder Regelleistung abgerufen wird, wird der Wärmebedarf wie zuvor beschrieben gedeckt. Wird

keine Regelleistung mehr abgerufen, kehrt das Modell zurück zum ursprünglichen KWK-Fahrplan. Durch die Korrektur in der vorangegangenen Viertelstunde hat sich jedoch der Speicherfüllstand geändert. Sollte er nun nicht mehr ausreichen, um den Wärmebedarf zu decken, wird zusätzlich der Spitzenkessel eingesetzt. Der Spitzenkessel wird nur zu den Zeitpunkten außerhalb des Fahrplanes zugeschaltet, wenn der Speicherfüllstand seine untere Grenze erreicht, nicht jedoch, um den Füllstand auf das im Fahrplan vorgesehene Niveau zu bringen.³⁴ So wird Schritt für Schritt für jedes Viertelstundenintervall geprüft, ob Regelleistung abgerufen wurde und ob der Speicherfüllstand für die Bedarfsdeckung noch ausreicht.

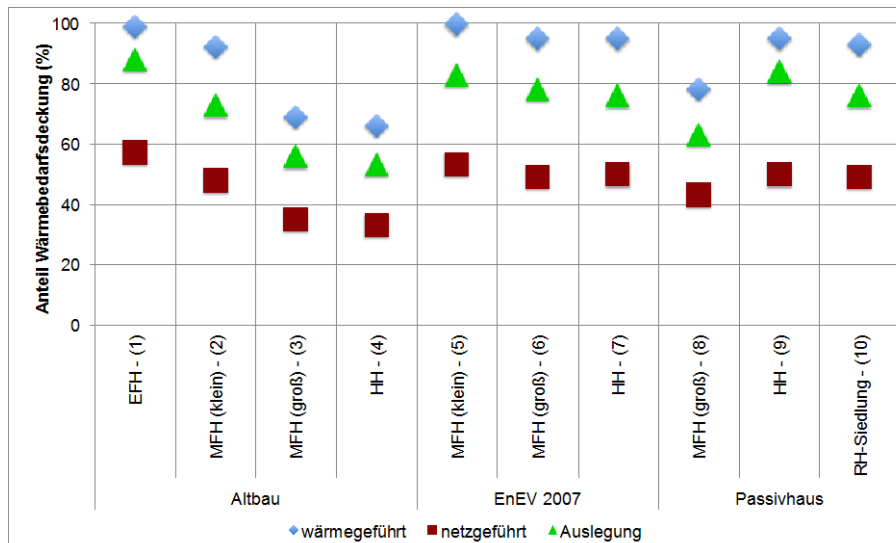
Das Vorgehen im Falle der positiven Regelleistung ist analog. Allerdings ist hierbei folgendes zu beachten: Bei der negativen Regelleistung muss der Fahrplan korrigiert werden, wenn Regelleistung abgerufen wird. Bei der positiven Regelleistung erfolgt die Fahrplanerstellung für den KWK-Betrieb (reduzierte Leistung für möglichen Abruf) genau umgekehrt, da der Fahrplan für den Fall eines vollständigen Abrufes (die angebotene Regelleistung wird vollumfänglich geliefert) ausgelegt ist. Korrekturen werden nur dann notwendig, wenn nicht die volle Leistung abgerufen wird. Dies ist allerdings in den meisten Intervallen der Fall.

6.5 Validierung und Grenzen des Modells

Um die Tauglichkeit und Aussagekraft des Modells zu testen, wurden die Ergebnisse der wärmegeführten Betriebsweisen mit den Erwartungswerten des Planers für die Auslegung der KWK-Anlagen im Wohngebäudebereich (siehe Tab. 5-6) miteinander verglichen. Die resultierenden Unterschiede sind in der folgenden Abb. 6-9 für die zehn betrachteten Wohngebäude dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass der Anteil an der Wärmebedarfsdeckung durch die KWK und die Volllaststunden im modellierten wärmegeführten Betrieb stets höher sind als in der Auslegung angenommen. Bei den Gebäudetypen 1 (Altbau EFH) und 2 (EnEv 2007 kleines MFH), die in der Auslegung bereits Wärmedeckungsanteile von über 80 % haben, werden dadurch Wärmedeckungsanteile von knapp 100 % erreicht.

³⁴ Dies wird gewählt, weil die Energie, die zusätzlich in den Speicher geladen werden muss, aus dem Spitzenkessel geliefert wird. Der Speicher verursacht aber Verluste proportional zum Speicherinhalt, ein höherer Füllstand bedeutet höhere Verluste. Deswegen ist es sinnvoller, bei Korrekturen nur die notwendige Wärmemenge einzuspeichern, statt den Speicherfüllstand wieder auf Fahrplanniveau anzuheben.

Abb. 6-9: Unterschiede in den Anteilen der KWK an der Wärmebedarfsdeckung



Quelle: Eigene Berechnungen

Die verbesserte Ausnutzung der KWK-Anlage gegenüber der Auslegung kann durch das optimale Poolmanagement (und die damit einhergehende unbeschränkte Teillastfähigkeit) und die perfekte Prognose des Wärmebedarfs erklärt werden. Die Tatsache, dass synthetische, vergleichsmäßigte Schwarmprofile für den Wärmebedarf genutzt wurden, wohingegen die realen Bedarfsprofile einzelner Versorgungsobjekte stark schwanken und deutlich höhere Gradienten haben, trägt dagegen nicht zur verbesserten KWK-Ausnutzung bei. Um dies zu überprüfen wurden Testrechnungen mit Einzelprofilen nach VDI-Richtlinie 4655 (VDI Gesellschaft Energie und Umwelt 2008) für den Wohngebäudetyp 1 durchgeführt. Auch hier wurden durch den geschickten Einsatz des Speichers Anteile an der Wärmebedarfsdeckung von über 99 % errechnet.

Im netzgeführten Regelleistungsbetrieb liegen die Volllaststunden und der Wärmedeckungsanteil durchgängig deutlich niedriger. Dies war aufgrund der Vorhaltung positiver bzw. des Abrufs negativer Regelleistung zu erwarten.

Die erhöhte Ausnutzung der KWK-Anlage im modellierten wärmegeführten Betrieb gegenüber den Erfahrungswerten für den realen Betrieb macht deutlich, dass das Modell den tatsächlichen Anlagenbetrieb mit einer systematischen Abweichung abbildet. Die Ergebnisse hinsichtlich der Regelleistungsbereitstellung im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb sind davon aber nicht beeinträchtigt. Die genannten Faktoren sorgen aber dafür, dass das ermittelte technische Potenzial als eher optimistisch einzuschätzen ist. Allerdings hätte durch eine geschickte Poolung von unterschiedlichen Anlagen und Gebäudetypen auch ein noch größeres Potenzial ermittelt werden können. In dieser Hinsicht sind die nachfolgenden Ergebnisse als pessimistisch einzustufen. Inwiefern sich diese beiden Effekte aufheben oder in die ein oder andere Richtung überwiegen kann allerdings nicht ausgesagt werden.

Um ferner alle Modellierungsergebnisse richtig einordnen zu können, ist es notwendig, die folgenden Fakten und Grenzen des Modells zu beachten:

- Primär- und Sekundärregelleistung werden mit diesem Modell nicht abgebildet.
- Das Modell dient der Bestimmung des maximalen Beitrags, den BHKW zur Bereitstellung von Minutenreserve gemäß der heutigen Anforderungen liefern können. Das Ergebnis der

Modellierung sind Zeitreihen des Regelleistungsangebots und der Wärmebedarfsdeckung für jedes Teilmodell. Die Summe der Regelleistungsangebote aller Teilmodelle bildet das technische Potenzial der BHKW.

- Die Gewichtungsfunktion, mit der die Optimierung arbeitet, ist keine Kostenfunktion. Das Ziel der Optimierung ist die maximale Bereitstellung von Regelleistung, nicht die Gewinnmaximierung.
- Es werden Pools von Anlagen modelliert. Dabei sind keine Aussagen über das genaue Betriebsverhalten der Einzelanlagen innerhalb eines Pools möglich.
- Die Flexibilisierungsmaßnahmen wie z. B. größere KWK, größerer Speicher oder Notkühlereinsatz, die im so benannten Szenario angenommen werden, sind kein Ergebnis der Optimierung, sondern basieren auf eigenen Annahmen, welche aus der Auswertung des Basisszenarios hergeleitet werden.
- Die Teilmodelle können unabhängig voneinander modelliert werden. Sie sind nicht aneinander gekoppelt.

6.6 Zusammenfassung: Modell

Um das technische Potenzial von BHKW zur Bereitstellung von Minutenreserve zu bestimmen, wurde ein Modell auf der Basis von MATLAB[®] entwickelt und damit entsprechende Simulationsanalysen durchgeführt. Für jeden betrachteten Versorgungstyp (Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Wärmenetze und Industrie) wurde ein eigenes Modell aufgebaut. Innerhalb jedes Modells wurden Einzelmodelle implementiert, die jeweils einem Gebäudetyp entsprechen. Da für Wärmenetze und Industrie jeweils nur exemplarisch ein Objekt betrachtet wurde, sind die Modelle hier entsprechend nicht weiter unterteilt.

Jedes Teilmodell besteht aus drei Modulen. Im ersten Modul wird mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus berechnet, wie viel Regelleistung maximal bereitgestellt werden kann. Dabei muss der Wärmebedarf des Versorgungsobjektes immer gedeckt werden. Im zweiten Modul wird entschieden, ob positive oder negative Regelleistung angeboten werden soll. Das dritte Modul schließlich berechnet die daraus resultierende Anlagenfahrweise und passt diese bei Abruf von Regelleistung entsprechend an.

Das Modell kann eine wärme- und eine netzgeführte Betriebsweise abbilden. Im wärmegeführten Betrieb besteht die Optimierungsaufgabe des Modells darin, den Wärmebedarf so effizient wie möglich zu decken, also den Einsatz des Speichers so zu optimieren, dass die KWK-Anlage möglichst viel und der Spitzenkessel möglichst wenig genutzt wird. Im netzgeführten Betrieb ist das primäre Optimierungsziel die Bereitstellung von Regelleistung. Hier werden Anlagen- und Speichereinsatz so optimiert, dass zu möglichst vielen Stunden möglichst hohe Regelleistungsangebote abgegeben werden können. Die effiziente Wärmebedarfsdeckung ist hier nur sekundäres Optimierungsziel.

Bedingt dadurch, dass ein ideales Zusammenspiel der Anlagen eines Pools angenommen wird, errechnet das Modell im wärmegeführten Betrieb höhere Volllaststundenzahlen als anhand von Erfahrungswerten in der Realität zu erwarten sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass analog auch im netzgeführten Betrieb höhere Volllaststunden errechnet werden, als bei Einzelanlagen ohne ideales Poolmanagement zu erreichen sind.

Für die Interpretation der Ergebnisse sind folgende Besonderheiten und Grenzen des Modells zu berücksichtigen:

- Primär- und Sekundärregelleistung werden nicht abgebildet.
- Die Potenzialergebnisse für die Jahre 2020 und 2030 beruhen ebenfalls auf den Marktdaten des Minutenreservemarkts im Jahr 2010.
- Das Ziel der Optimierung ist die maximale Bereitstellung von Regelleistung, nicht die Gewinnmaximierung.
- Es werden Anlagen-Pools modelliert, so dass keine Aussagen über das genaue Betriebsverhalten der Einzelanlagen innerhalb eines Pools möglich sind.
- Die betrachteten Flexibilisierungsmaßnahmen sind kein Ergebnis der Optimierung, sondern basieren auf eigenen Annahmen, die aus der Analyse des Basisszenarios hergeleitet wurden.
- Die Teilmodelle werden unabhängig voneinander modelliert und untersucht.

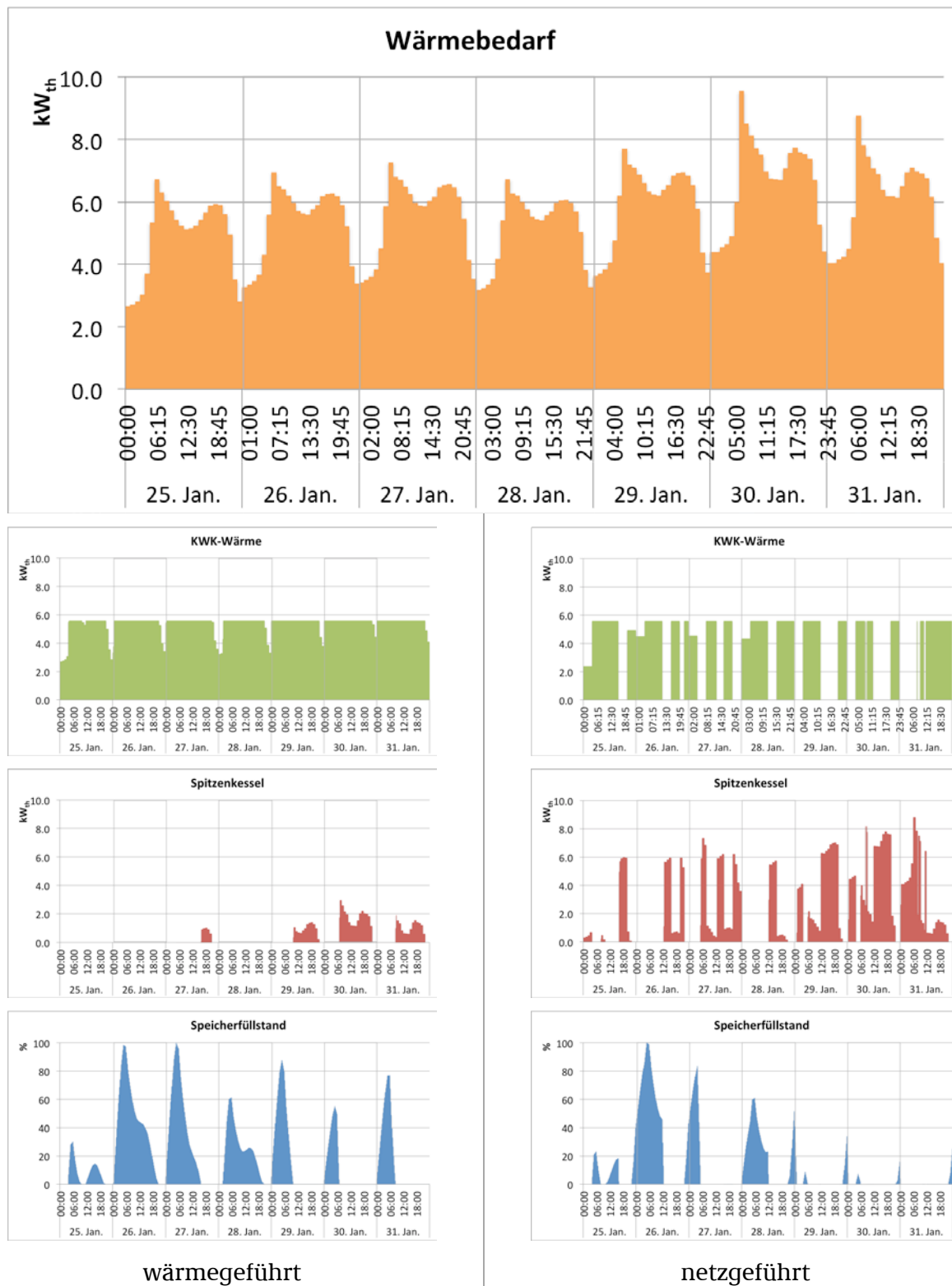
7 Technische Potenziale der BHKW am Minutenreservemarkt

Mit Hilfe des zuvor beschriebenen Modells und auf der Basis der Annahmen und Eingangsparameter werden die technischen Potenziale für den netzgeführten Betrieb auf Anlagenebene berechnet. Dabei stehen die ermittelten Charakteristika für die unterschiedlichen Betriebsweisen (Kapitel 7.1) und die Auswertungen für Wohngebäude (Kapitel 7.2), Nichtwohngebäude (Kapitel 7.3), Wärmenetze (Kapitel 7.4) und Industrieanlagen (Kapitel 7.5) im Mittelpunkt. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der Kosten und des Nutzens einer flexibilisierten Anlagenauslegung (Kapitel 7.6) und einer Extrapolation der Ergebnisse für die Jahre 2020 und 2030 (Kapitel 7.8).

7.1 Vergleich der unterschiedlichen Betriebsweisen

Die Abb. 7-1 zeigt die aus den verschiedenen Betriebsweisen resultierenden Unterschiede zur Deckung des Wärmebedarfs. Dargestellt ist die Wärmebedarfsdeckung exemplarisch für den Wohngebäudetyp 1 (Altbau EFH) in der kältesten betrachteten Woche (25.01-31.01). Oben ist der zu deckende Wärmebedarf im Viertelstundenraster dargestellt. Dieser muss sowohl in der wärmegeführten als auch in der netzgeführten Betriebsweise gedeckt werden. Auf der linken Seite sind der Einsatz der KWK-Anlage und des Spitzenkessels sowie der Speicherfüllstand im wärmegeführten Betrieb dargestellt, die rechte Seite zeigt den Einsatz der Anlagenkomponenten im netzgeführten Betriebsfall.

Abb. 7-1: Wärmebedarf eines EFH-Altbaus in der Woche vom 25.01. bis 31.01.2010 und Bedarfsdeckung im wärme- und netzgeführten Betrieb



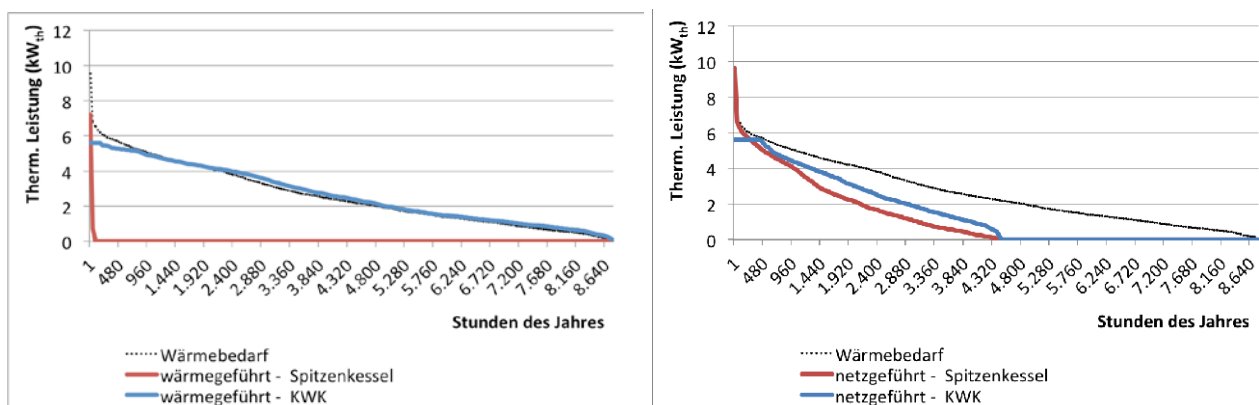
Quelle: Eigene Berechnungen

Im wärmegeführten Betrieb wird ein möglichst hoher KWK-Deckungsanteil erreicht, indem der Speicher in den frühen Morgenstunden, wenn der Wärmebedarf gering ist, geladen und bei höherem Wärmebedarf entladen wird. Erst wenn der Speicher leer ist und die KWK-Leistung nicht reicht, um den Wärmebedarf zu decken, wird der Spitzenkessel eingesetzt. Dies ist nur in relativ geringem Umfang der Fall (27. Januar abends, 29., 30. und 31. Januar).

Im netzgeführten Regelleistungsbetrieb kann das BHKW in den Viertelstunden, in denen positive Regelleistung angeboten (und nicht abgerufen) oder negative Regelleistung abgerufen wird, nicht zur Wärmelieferung genutzt werden (siehe BHKW-Wärme netzgeführt in Abb. 7-1). Wenn möglich wird der Speicher entladen, um in diesen Fällen den Wärmebedarf zu decken (siehe Speicherfüllstand netzgeführt in Abb. 7-1). Er wird geladen, wenn die nutzbare KWK-Wärme den Wärmebedarf übersteigt. Der Spitzenkessel wird deutlich häufiger eingesetzt als im wärmegeführten Betrieb.

Deutlich wird dies auch in den Jahresbilanzen des KWK-Anlagen- und Spitzenkesseleinsatzes. Während die KWK-Anlagen im wärmegeführten Betriebsfall je nach Gebäudetyp zwischen 4.150 und 7.350 Vollaststunden resultieren, sinken diese Werte im netzgeführten Betrieb auf 2.300 bis 4.050. Die restliche Wärmemenge wird aus den Spitzenkesseln bereitgestellt. Die Abb. 7-2 verdeutlicht anhand der Jahresdauerlinien des Anlageneinsatzes im Anlagenpool des Wohngebäudetyps 1 die veränderte Charakteristik der Wärmebedarfsdeckung. Während die KWK im wärmegeführten Betriebsfall nahezu die gesamte erforderliche Wärme bereitstellt ($> 99\%$) und die Spitzenkessel nur wenige Stunden in Betrieb sind, übernehmen die Spitzenkessel im netzgeführten Betrieb mit ca. 43 % einen deutlich größeren Anteil an der Wärmedeckung. Die Jahresdauerlinie des KWK-Einsatzes zeigt im netzgeführten Fall ein Plateau: In mehr als 400 Stunden werden alle KWK-Anlagen des Pools mit ihrer vollen Leistung gefahren. Der wärmegeführte Betrieb zeigt diese Charakteristik nicht, da dort nur selten alle Anlagen des Pools mit voller Leistung betrieben werden, während durch Regelleistungsbereitstellung und -abruf häufiger die volle Poolleistung genutzt werden muss.

Abb. 7-2: Jahresdauerlinien des KWK- und des Spitzenkesseleinsatzes im wärmegeführten Betrieb (links) im Vergleich zum netzgeführten Betrieb (rechts) am Beispiel eines EFH-Altbaus



Quelle: Eigene Berechnungen

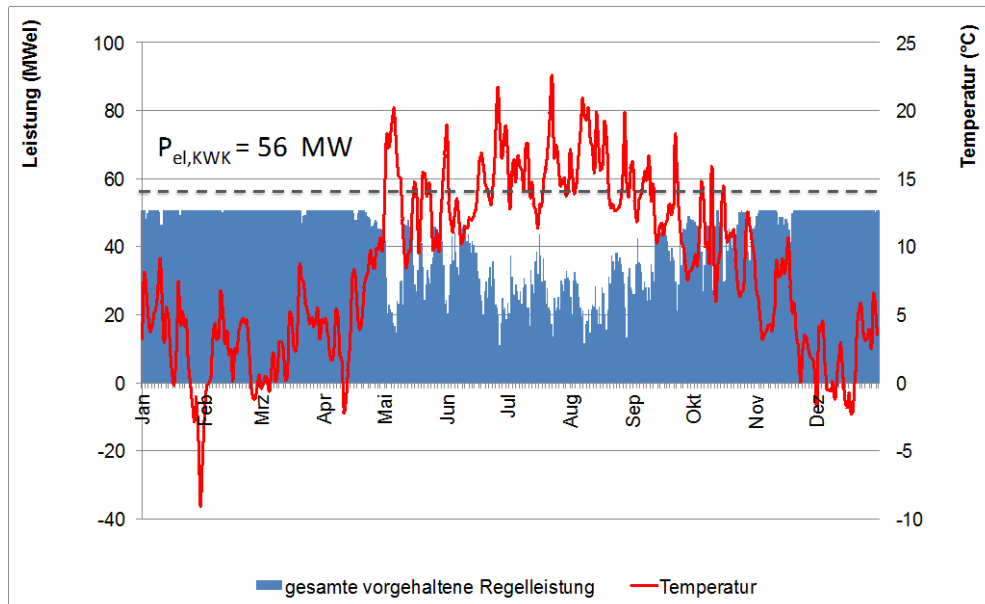
Die Höhe der Regelleistung, die angeboten werden kann, ist durch den Speicherfüllstand beschränkt. Falls positive Regelleistung vorgehalten und abgerufen wird oder negative vorgehalten und nicht abgerufen wird, die KWK-Anlage also läuft, muss die gesamte anfallende Wärmemenge genutzt oder eingespeichert werden können. Der umgekehrte Fall, dass die KWK-Anlage nicht läuft, da negativ angeboten und abgerufen wird oder positiv

angeboten und nicht abgerufen wird, stellt hingegen keine Beschränkung dar, da der Wärmebedarf auch allein über den Spitzenkessel gedeckt werden kann. Es wird also so viel Regelleistung angeboten „wie der Speicher fassen kann“. Jede Viertelstunde, in der negative Regelleistung abgerufen oder positive vorgehalten wird, reduziert also den Speicherfüllstand im netzgeführten Betrieb. Dadurch wird der Speicher häufiger leergefahren als gefüllt.

1.2 Minutenreserve-Regelleistungspotenziale für Wohngebäude-KWK

Die Abb. 7-3 zeigt den Verlauf der Minutenreserve, die aus BHKW in allen Wohngebäuden bereitgestellt werden kann. Dabei wird zunächst nicht zwischen negativer und positiver Minutenreserve unterschieden, sondern die gesamte Kapazität, die für Regelleistung vorgehalten werden kann, betrachtet. Die gesamte elektrische Leistung der in Wohngebäuden installierten KWK beträgt im Jahr 2010 schätzungsweise 56 MW (siehe Kapitel 5.1). In den Wintermonaten, wenn eine hohe Wärmenachfrage besteht, kann diese verfügbare KWK-Leistung nahezu vollständig für die Regelleistungsbereitstellung genutzt werden. Im Sommer, wenn der Wärmebedarf aufgrund höherer Außentemperaturen sinkt, gehen die möglichen Einsatzzeiten der KWK und damit auch die Möglichkeiten zur Regelleistungsbereitstellung deutlich zurück. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch in dem Zeitabschnitt Anfang Mai, in dem die Temperaturen zeitweise bis zu 20 °C erreichen und die Regelleistungskapazität stark absinkt.

Abb. 7-3: Jahresverlauf der potenziell bereitstellbaren Regelleistung in KWK-Anlagen aus Wohngebäuden im Jahr 2010 und der Lufttemperatur

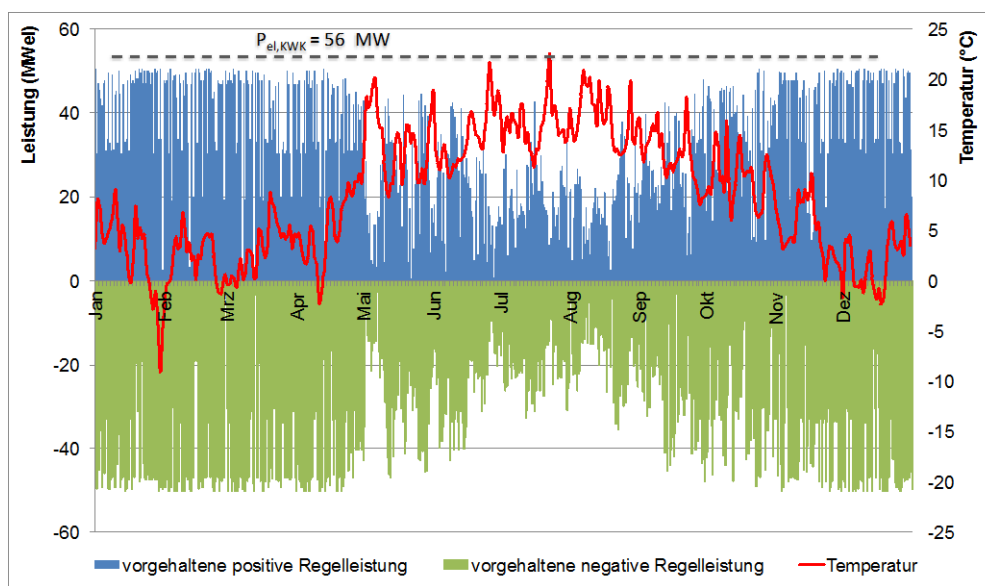


Quelle: Eigene Berechnungen

Die historischen Marktdaten des Minutenreservemarktes von 2010 wurden unter anderem genutzt, um für jede Zeitscheibe das Verhältnis von vorgehaltener positiver zu negativer Minutenreserve zu analysieren. Dieses Verhältnis wird in der Modellierung mittels Zufallszahlen abgebildet (siehe Kapitel 6.3). Die Abb. 7-4 und Abb. 7-5 zeigen den zeitlichen Verlauf und die Jahresdauerlinie der Regelleistungsbereitstellung differenziert nach positiver und negativer Minutenreserve bzw. als kumulierte Größe. Während im realen Markt des Jahres 2010 die Verhältnisse in allen Zeitscheiben ähnlich waren (Fluktuation lediglich zwischen 45 %

und 53 % positiver Minutenreserve), zeigen die meisten Zeitscheiben im Modell ein dominierend positives oder negatives Angebot. Dies lässt sich damit begründen, dass die Charakteristik des Gesamtangebotes stark von den Teilmodellen (siehe Kapitel 5.2.3) geprägt wird, die den größten Anteil der elektrischen Leistung beinhalten. Ein Einzelmodell kann stets nur positiv oder negativ anbieten. Somit weicht die Modellierung innerhalb der einzelnen Zeitscheiben vom realen Markt ab. Im Jahresmittel stellt es jedoch eine hinreichend genaue Annäherung an die realen Marktverhältnisse dar: Im realen Markt von 2010 lag das Verhältnis von positiver zu negativer Minutenreserve im Jahresmittel bei 49,5 % zu 50,5 %. In der Modellierung ergibt sich dieses Verhältnis im Mittel zu 48,9 % positiver und 51,1 % negativer Minutenreserve.

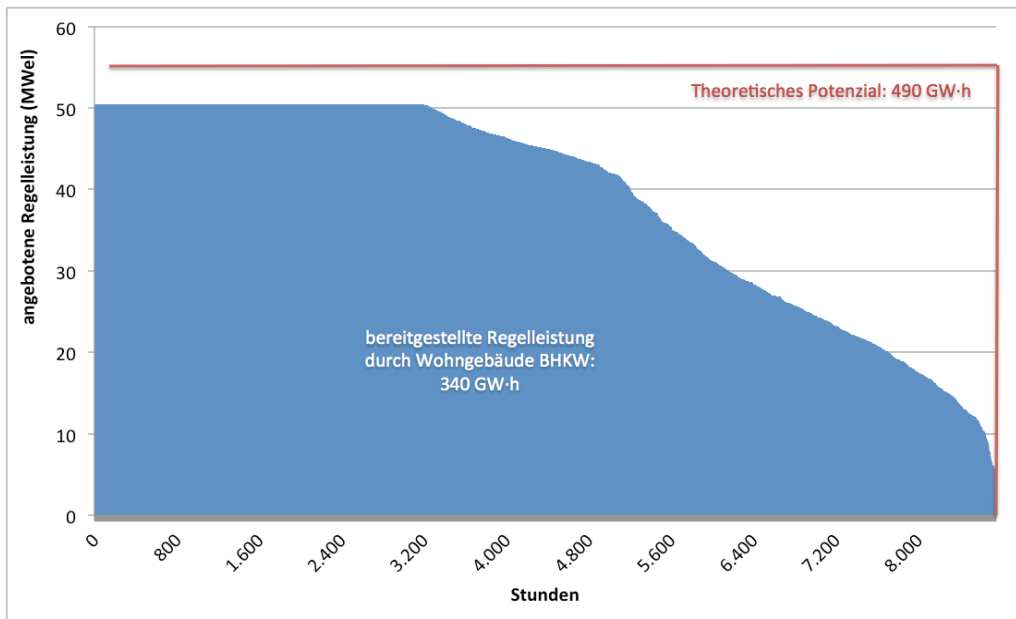
Abb. 7-4: Jahresverlauf der in der Modellierung bereitgestellten positiven und negativen Regelleistung in KWK-Anlagen aus Wohngebäuden im Jahr 2010 und der Lufttemperatur



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Durchschnitt kann aus den betrachteten BHKW in Wohngebäuden rund 69 % der rechnerisch möglichen Minutenreserve (volle Anlagenleistung für 8.760 Stunden im Jahr, in Abb. 7-5 als „theoretisches Potenzial“ bezeichnet) und über 3.300 Stunden sogar 90 % der insgesamt installierten Anlagenleistung bereitgestellt werden, dieser Wert sinkt nie unter 10 %. Da die technische Verfügbarkeit allerdings bei 90 % liegt, ist die technisch erreichbare Größenordnung von 90 % der Nennleistung für 8.760 Stunden sogar zu 77 % erreicht.

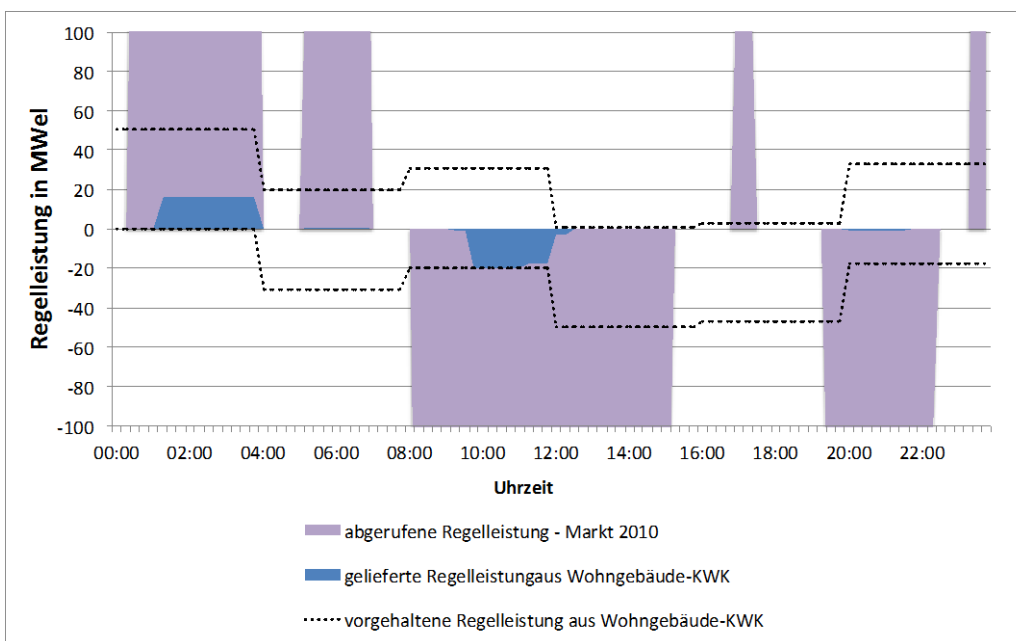
Abb. 7-5: Jahresdauerlinie der potenziell bereitstellbaren und theoretisch möglichen Minutenreserve aus KWK-Anlagen in Wohngebäuden für das Jahr 2010



Quelle: Eigene Berechnungen

Wie in der Realität wird auch im Modell deutlich weniger Regelleistung abgerufen als angeboten. Die Abb. 7-6 zeigt die Zusammenhänge zwischen Regelleistungsabruf am realen Markt und der aus KWK vorgehaltenen und bereitgestellten Regelleistung exemplarisch für den 01. Januar 2010.

Abb. 7-6: Regelleistungsabruf und durch KWK-Anlagen in Wohngebäuden vorgehaltene und gelieferte Regelleistung am 01.01.2010 (dabei wurden an diesem Tag Abrufe bis zu einer Höhe von 2.400 MW erreicht)



Quelle: Eigene Berechnungen

In der Abbildung wird deutlich, dass die KWK nur zu den Zeitpunkten Regelleistung liefert, an denen auch im realen Markt Abrufe stattfanden. Dabei kann maximal so viel Regelleistung geliefert werden wie auch vorgehalten wurde. Innerhalb jedes Teilmodells wird im Falle eines Abrufs immer die volle angebotene Leistung geliefert. Die Teilmodelle bzw. Gebäudetypen werden unabhängig voneinander gezogen, so dass die gesamte gelieferte Leistung aller Gebäudetypen nicht der kumulierten vorgehaltenen Leistung entsprechen muss (siehe beispielsweise 02:00 bis 04:00 Uhr in der Abb. 7-6).

Die Tab. 7-1 gibt die wichtigsten Kennzahlen für die KWK-Anlagen der betrachteten Wohngebäudetypen wieder. Dabei fällt auf, dass sich die Speicherwärmeverluste in beiden Fällen kaum voneinander unterscheiden. Die Ursache für dieses Verhalten ist eine ähnliche Speicherausnutzung. In beiden Betriebsweisen (wärme- und netzgeführt) wird der Speicher selten genutzt, die Wärmeverluste sind hauptsächlich durch die Grundwärmeverluste (über 90 %), welche durch die Rücklauftemperatur bedingt werden, bestimmt. Dieses Verhalten ist bei allen KWK-Auslegungen in den Wohngebäuden zu beobachten.

Durch den Wechsel der Betriebsweisen kann z. B. durch die BHKW für den Wohngebäudetyp 2 im Jahresdurchschnitt etwa $6.710 \text{ kW}_{\text{el}} \cdot \text{h}^{35}$ an Minutenreserve pro installierter kW_{el} bereitgestellt werden. Dieser Wert ist jedoch stark von der Anlagenauslegung abhängig und schwankt zwischen 4.460 (Einfamilienhaus Altbau – Wohngebäudetyp 1) und 7.820 (großes Mehrfamilienhaus Passivstandard – Wohngebäudetyp 8). Der Wert der BHKW-Anlage für den Wohngebäudetyp 1 ist dabei besonders niedrig. Dies ist mit der relativ großen Anlagenleistung in Bezug auf die Wärmenachfrage zu erklären.

Die BHKW im Wohngebäudebereich sind prinzipiell geeignet um Minutenreserve anzubieten, doch haben sie alleine auf Grund ihrer geringen Größe einen Nachteil gegenüber den Nichtwohngebäuden. Um die Mindestangebotsgröße (derzeit 5 MW_{el}) zu erreichen, müssen bei einer größeren Anlage weniger Einheiten kommunikationstechnisch miteinander verbunden und gesteuert werden. Bei einer großen Anzahl von BHKW-Anlagen in Wohneinheiten wirkt eine Vergleichmäßigung der Gesamtwärmenachfrage allerdings positiv auf die Bedingungen zur Minutenreservebereitstellung.

³⁵ Diese Einheit bezeichnet die vorgehaltene positive und negative Minutenreserve. Die Minutenreserve bezeichnet eine Leistung (kW_{el}). Diese Leistung wird über mehrere Stunden vorgehalten, deswegen wird die Einheit mit der Zeit multipliziert ($\text{kW}_{\text{el}} \cdot \text{h}$). Der Malpunkt soll verdeutlichen, dass es sich dabei nicht um die Einheit „kWh“ der elektrischen Arbeit handelt. Diese bezeichnet verrichtete Arbeit, während die Minutenreserve Leistung ist, die über einen Zeitraum vorgehalten wird.

Tab. 7-1: Kennzahlen des wärmegeführten (W) und netzgeführten (N) Betriebes aller BHKW-Anlagen in den Wohngebäudetypen für ein Jahr

	Altbau								EnEv2007						Passivhaus					
	WG 1 (EFH)		WG 2 (kl. MFH)		WG 3 (gr. MFH)		WG 4 (Hochhaus)		WG 5 (kl. MFH)		WG 6 (gr. MFH)		WG 7 (Hochhaus)		WG 8 (gr. MFH)		WG 9 (kl MFH)		WG 10 (RHS)	
	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N
Wärmebedarf [Tsd. kWhth]	22,7	22,7	76,7	76,7	127,0	127,0	883,8	883,8	27,4	27,4	49,3	49,3	404,0	404,0	23,6	23,6	193,2	193,2	85,1	85,1
BHKW-Strom [Tsd. kWhel]	4,2	2,2	30,7	16,1	38,4	19,8	354,4	176,0	4,9	2,7	17,7	9,0	198,9	104,1	7,3	3,9	93,1	49,2	34,5	18,8
BHKW-Wärme [Tsd. kWhth]	23,1	12,3	69,8	36,5	87,4	45,0	581,2	288,7	27,2	14,9	46,7	24,1	382,6	202,1	18,1	9,8	182,6	97,1	78,4	42,7
Wärme aus dem Spitzenkessel [Tsd. kWhth]	0,1	10,9	8,2	41,6	41,3	83,7	307,7	600,3	0,5	12,9	3,2	25,8	24,8	205,5	5,8	14,1	12,9	98,5	7,8	43,6
Speicherwärme- verluste [Tsd. kWhth]	0,5	0,5	1,3	1,3	1,7	1,7	5,1	5,2	0,3	0,4	0,5	0,6	3,4	3,7	0,3	0,3	2,2	2,4	1,1	1,2
Angebote pos. MR [Tsd. kWel·h]		2,2		15,99		19,9		181,4		2,6		9,8		106,1		3,9		49,6		18,3
Angebote neg. MR [Tsd. kWel·h]		2,2		16,2		20,0		178,9		2,7		9,4		104,8		4,0		50,2		19,1
Abgerufene pos. MR [Tsd. kWhel]		0,05		0,4		0,5		3,9		0,07		0,2		2,4		0,1		0,9		0,4
Abgerufene neg. MR [Tsd. kWhel]		0,09		0,5		0,6		6,8		0,08		0,3		3,0		0,1		1,9		0,7

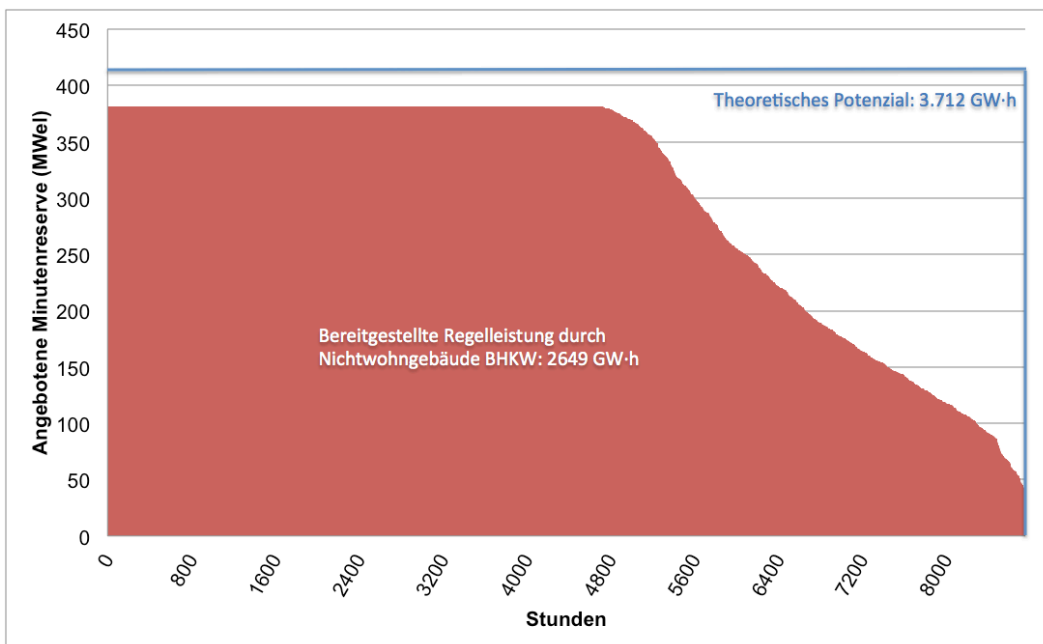
Bemerkungen: EFH: Einfamilienhaus; MFH: Mehrfamilienhaus; RHS: Reihenhaussiedlung; MR: Minutenreserve

Quelle: Eigene Berechnungen

7.3 Minutenreserve-Potenziale der Nichtwohngebäude-BHKW

Für die betrachteten Nichtwohngebäude-BHKW ist die Temperaturabhängigkeit und die Verteilung der positiven und negativen Regelleistungsangebote vergleichbar mit denen der Wohngebäude-BHKW. Aufgrund der hohen installierten Leistungen in diesem Segment sind die absoluten Beiträge jedoch signifikant höher. Abb. 7-7 zeigt dies im Vergleich zur Abb. 7-5 deutlich.

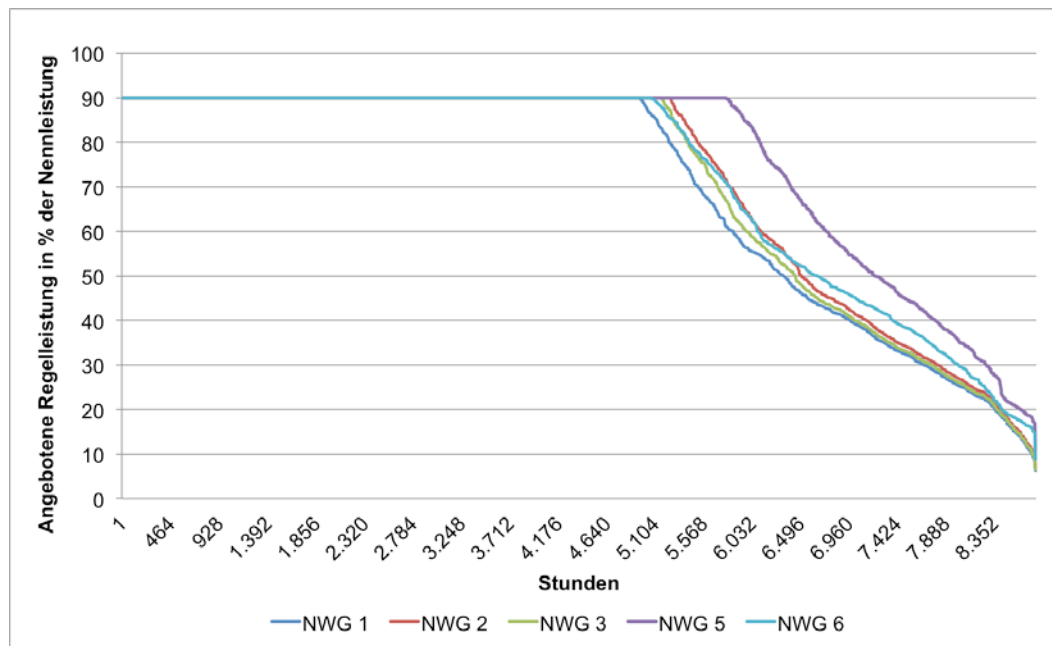
Abb. 7-7: Jahresdauerlinie der potenziell bereitstellbaren und theoretisch möglichen Minutenreserve aus BHKW in Nichtwohngebäuden für das Jahr 2010



Quelle: Eigene Berechnungen

Auch durch die NWG-KWK können im Durchschnitt 71 % der rechnerisch möglichen Minutenreserve angeboten werden. Für etwa 4.800 Stunden können alle verfügbaren BHKW mit voller Anlagenleistung Minutenreserve anbieten, gleichzeitig sinkt die Bereitstellung von Minutenreserve nie unter 7 % der Nennleistung.

Abb. 7-8: Jahresdauerlinie der potenziell bereitgestellten Minutenreserve aus BHKW in den jeweiligen Nichtwohngebäuden für das Jahr 2010³⁶



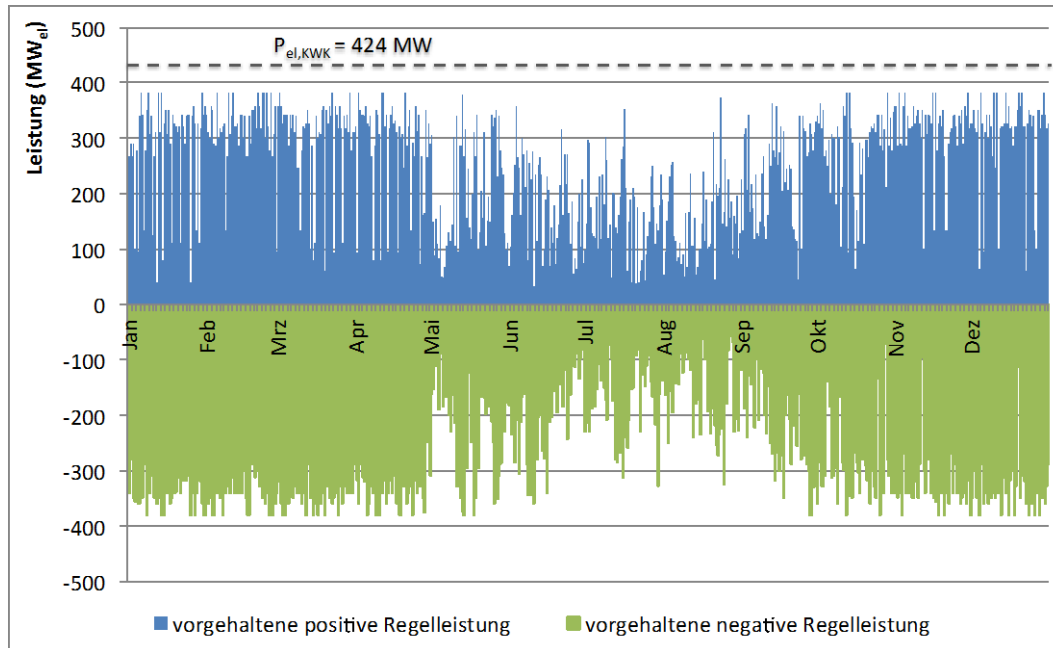
Quelle: Eigene Berechnungen

Zwischen den Jahresdauerlinien der jeweiligen KWK-Anlagentypen im Nichtwohngebäudebestand gibt es keine großen Unterschiede. Es zeigt sich allerdings, dass sich die Auslegung der KWK-Anlage für den NWG-Typ 5 (Büro und Verwaltungsgebäude) mit einer hohen Vollaststundenanzahl auch in der Jahresdauerlinie der bereitgestellten Regelleistung zu Gunsten eines höheren Angebotspotenzials bemerkbar macht.

In Abb. 7-9 ist der Jahresverlauf der vorgehaltenen positiven und negativen Minutenreserve für das Jahr 2010 dargestellt. Dabei wird – analog zu den Wohngebäude-KWKs – wieder die starke Abhängigkeit von der Jahreszeit deutlich. Ferner ist zu erkennen, dass sich die Vorhaltung von positiver und negativer Minutenreserve etwa die Waage hält.

³⁶ NWG 4 und 7 werden, wie in Kapitel 0 beschrieben, nicht weiter betrachtet

Abb. 7-9: Jahresverlauf der potenziell bereitstellbaren positiven und negativen Regelleistung in KWK-Anlagen aus Nichtwohngebäuden im Jahr 2010



Quelle: Eigene Berechnungen

In Tab. 7-2 werden die wichtigsten Kennzahlen für einen Vergleich von wärme- und netzgeführten Betrieb zusammengefasst dargestellt. Demnach ist zu erkennen, dass die Strom- und Wärmeerzeugung aus der KWK bei Wechsel zum netzgeführten Betrieb bei allen Anlagen um etwa die Hälfte zurückgeht, was auf der Wärmeseite durch eine knapp doppelt so hohe Auslastung des Spitzenkessels kompensiert wird. In etwa dem gleichen Umfang wie die Stromerzeugung zurückgeht kann dafür jeweils sowohl positive als auch negative Minutenreserve vorgehalten werden. Der tatsächliche Abruf liegt für alle NWG dagegen nur zwischen 2-3 % (negative Minutenreserve) und 3-4 % (positive Minutenreserve) bezogen auf die jeweilige Vorhaltung. Der größte Wärmebedarf und damit auch die größte KWK-Anlage ist in NWG-Typ 1, dem Krankenhaus zu finden. Dies bedeutet auch, dass ein Pool aus Krankenhaus-BHKW weniger Anlagen beinhalten müsste um an die Mindestgebotsgrenze zu kommen als alle anderen Nichtwohngebäude. Das Verhältnis von installierter elektrischer KWK-Leistung zu insgesamt vorgehaltener Minutenreserve (positiv und negativ) liegt zwischen 6.840 und 7.470 und ist in den Bürogebäuden am höchsten. Den niedrigsten Wert weisen hier die Krankenhäuser auf. Dieser Wert ist allerdings stark von der Anlagenauslegung und weniger stark von der Charakteristika der Wärmeverbräuche abhängig (vgl. Kapitel 7.2).

Tab. 7-2: Kennzahlen des wärmegeführten (W) und netzgeführten (N) Betriebes aller BHKW-Anlagen der NWG-Typen für ein Jahr

	NWG 1 (Krankenhaus)		NWG 2 (Altenheim)		NWG 3 (Hotel)		NWG 5 (Bürogebäude)		NWG 6 (Schule)	
	W	N	W	N	W	N	W	N	W	N
Wärmebedarf [Tsd. kWhth]	12,35	12,35	1,24	1,24	0,43	0,43	0,35	0,35	0,55	0,55
BHKW-Strom [Tsd. kWhel]	7,97	3,97	0,48	0,25	0,14	0,07	0,13	0,07	0,23	0,12
BHKW-Wärme [Tsd. kWhth]	7,95	3,97	0,78	0,40	0,28	0,15	0,26	0,13	0,45	0,23
Wärme aus dem Spitzenkessel [Tsd. kWhth]	4,43	8,42	0,47	0,85	0,16	0,29	0,09	0,21	0,10	0,32
Speicherwärmeverluste [Tsd. kWhth]	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Angebote pos. Minutenreserve [Tsd. kWel·h]		4,08		0,24		0,07		0,07		0,12
Angebote neg. Minutenreserve [Tsd. kWel·h]		4,04		0,25		0,07		0,07		0,12
Abgerufene pos. Minutenreserve [Tsd. kWhel]		0,08		0,00		0,00		0,00		0,00
Abgerufene ges. Minutenreserve [Tsd. kWhel]		0,15		0,01		0,00		0,00		0,00

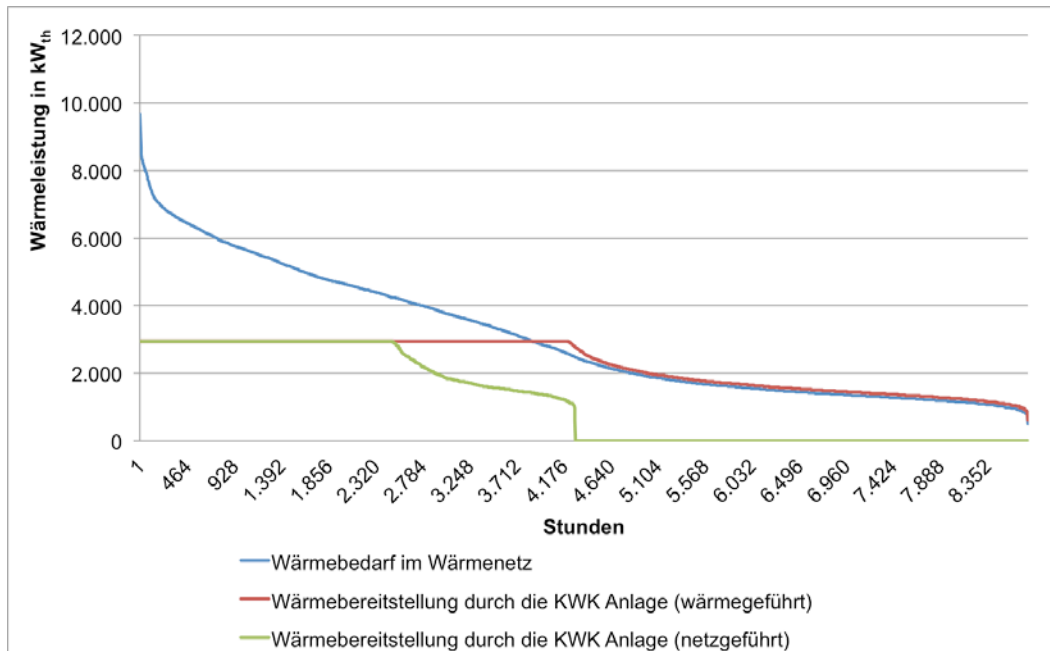
Quelle: Eigene Berechnungen

7.4 Beispiel 1 – Minutenreserve-Potenziale für Wärmenetze-KWK

Der Anwendungsfall Wärmenetz wird innerhalb dieses Forschungsprojekts an Hand eines Beispiels diskutiert (siehe Kapitel 5.3). Die Wärmeverbräuche basieren überwiegend auf Heizwärme und Warmwasser. Innerhalb des Wärmeverbrauchs sind auch die Wärmeverluste des Wärmenetzes abgebildet. Das Wärmespeichervermögen des Netzes ist nicht bekannt und wurde nicht modelliert.

Da das Modell keine Beschränkung der Teillastfähigkeit der KWK-Anlagen vorsieht, kann im wärmegeführten Betrieb eine Auslastung von über 6.700 Vollaststunden erreicht werden. In dieser Betriebsweise wird über 70 % der benötigten thermischen Energie mit der KWK-Anlage gedeckt, der Rest über die thermischen Kessel. Bei einem Wechsel auf eine netzgeführte Betriebsweise wird nur noch gut 40 % der Wärme durch das BHKW bereitgestellt (siehe Abb. 7-10).

Abb. 7-10: Jahresdauerlinie der verschiedenen KWK Betriebsweisen im betrachteten Wärmenetz



Quelle: Eigene Berechnungen

Durch den Wechsel der Betriebsweisen kann in dem betrachteten Wärmenetz sowohl eine positive als auch eine negative Minutenreserve von über 10.000 MW_{el}·h vorgehalten werden. Pro installiertem kW_{el} Leistung sind das im Jahr etwa 7.200 kW_{el}·h Minutenreserve. Insgesamt können etwa 20.100 kW_{el}·h Minutenreserve bereitgestellt werden (siehe Tab. 7-3)

Tab. 7-3: Kennzahlen für den wärmegeführten und netzgeführten Betrieb des BHKW im betrachteten Wärmenetz für ein Jahr

	Wärmegeführt	Netzgeführt
Wärmebedarf [MWhth]	26.770	26.770
BHKW-Strom [MWhel]	18.802	9.920
BHKW-Wärme [MWhth]	19.826	10.461
Wärme aus dem Spitzenkessel [MWhth]	7.756	17.141
Speicherwärmeverluste [MWhth]	811	831
Angebotene positive Minutenreserve [MWel·h]	-	10.112
Angebotene negative Minutenreserve [MWel·h]	-	10.006
Abgerufene positive Minutenreserve [MWhel]	-	250
Abgerufene negative Minutenreserve [MWhel]	-	336

Quelle: Eigene Berechnungen

Prinzipiell zeigt das Wärmenetz-BHKW, wie zu erwarten, ein ähnliches Verhalten wie ein Pool von kommunikationstechnisch verbundenen Anlagen in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die Vergleichmäßigung der Wärmebedarfscharakteristik muss hier nicht aufwendig durch eine kommunikations- und regeltechnische Verbindung geschaffen werden, sondern ist schon vom Aufbau des Wärmenetzes her gegeben. Gleichzeitig ist der Wärmebedarf in einem solchen

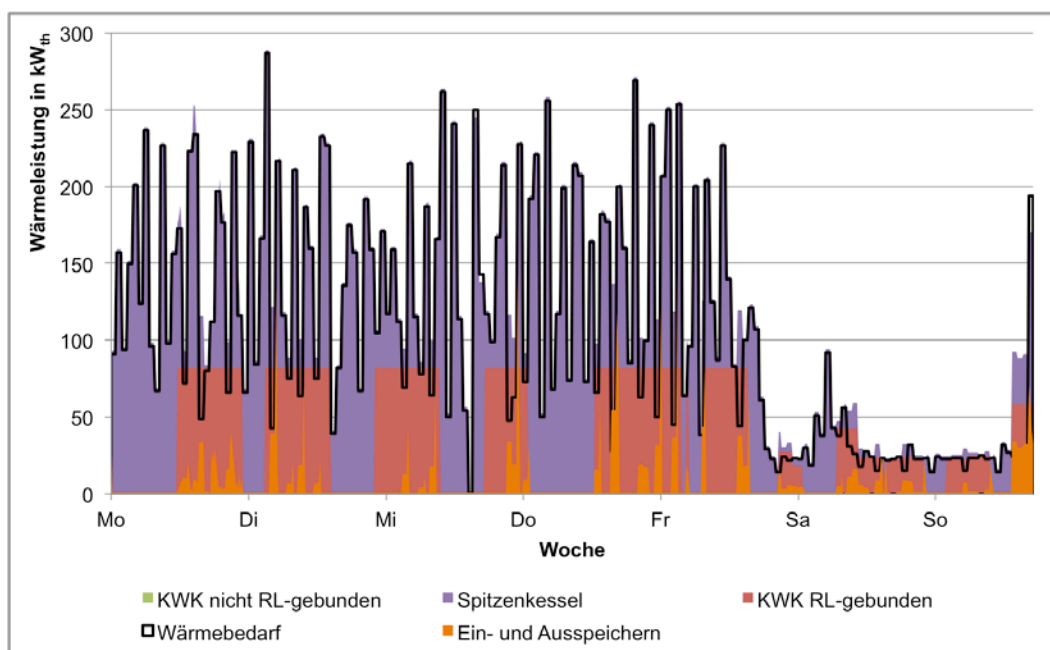
Netz relativ hoch, korrespondierend dazu auch die elektrische Leistung der KWK-Anlagen, was ein Poolen der Einheiten erleichtert. KWK-Anlagen im Kontext von Wärmenetzen sind daher für einen flexiblen netzgeführten Einsatz am Minutenreservemarkt besonders gut geeignet.

Eine Veränderung der Netzausprägung könnte das Potenzial für die Bereitstellung von Minutenreserve in einem Wärmenetz noch einmal erheblich verändern. Dabei ist eine Mischung von unterschiedlichen Nutzergruppen (Haushalte, Industrie und Gewerbe) prinzipiell gut geeignet die Gesamtwärmenachfrage zu vergleichmäßigen und auch saisonalen Effekten entgegenzuwirken. Eine solche Wärmebedarfskurve kann sich positiv auf die Fähigkeit auswirken, Minutenreserve bereitzustellen.

7.5 Beispiel 2 - Minutenreservepotenziale für Industrie-BHKW

Die Industrie-BHKW wird innerhalb dieses Forschungsprojekts an Hand eines ausgewählten Beispiels diskutiert. Betrachtet wird hier der gemessene Wärmebedarf einer Käserei. Dieser Betrieb weist einen stark schwankenden Wärmebedarf auf. Die Abb. 7-11 zeigt einen Wochenverlauf des Wärmebedarfs sowie die Bedarfsdeckung für diese Käserei bei netzgeführter Betriebsweise.

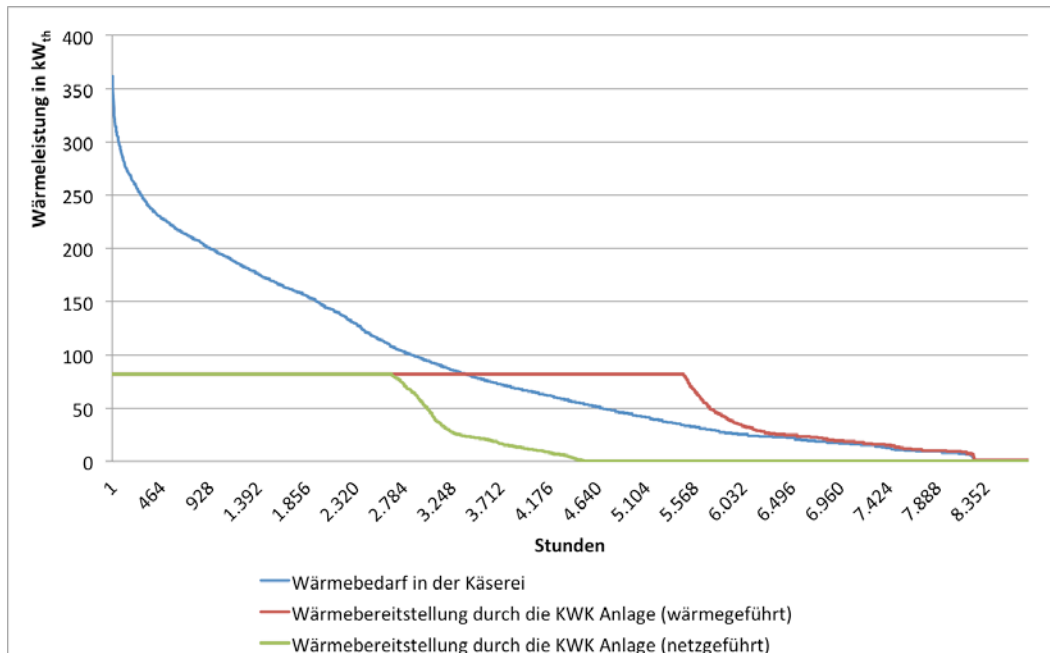
Abb. 7-11: Wärmebedarf und Wärmedeckung der Käserei während einer Winterwoche in der netzgeführten Betriebsweise



Quelle: Eigene Berechnungen

Deutlich wird hier der stark schwankende Wärmebedarf während der Woche und die geringe thermische Last während des Wochenendes. Dieser stark schwankende Wärmebedarf führt zu einer stärkeren Nutzung des Wärmespeichers, wie im Vergleich der Abb. 7-12 mit der Abb. 7-10 zu sehen ist. Hier zeigt sich zum einen, dass der stark schwankende Wärmebedarf in der Käserei zu einer viel steileren Jahresdauerlinie führt, zum anderen kann der Speicher viel häufiger eingesetzt werden. Das BHKW kann so über 5.500 Stunden ihre volle Leistung einspeisen. Es ergeben sich rechnerisch etwa 6.300 Vollaststunden, im netzgeführten Betrieb reduzieren sich diese auf etwa 3.250.

Abb. 7-12: Jahresdauerlinie der BHKW-Betriebsweisen bei der betrachteten Käserei



Quelle: Eigene Berechnungen

Die wichtigsten Kennzahlen dieser Käserei sind in der Tab. 7-4 zusammengefasst. Im netzgeführten Betrieb können hier pro installiertem kW_{el} etwa 6.300 kW_{el} · h Minutenreserve im Jahr bereitgestellt werden. Dieses Beispiel zeigt sehr gut, dass in einem industriellen Betrieb mit stark schwankendem Wärmebedarf nur eine im Verhältnis zur Spitzenlast relativ kleine BHKW-Anlage installiert werden kann. Gleichzeitig ist die Steuerung und Regelung solcher Anlagen aufgrund des heterogenen Wärmebedarfs schwierig.

Tab. 7-4: Kennzahlen des wärme- und netzgeführten Betriebes der BHKW-Anlage in der betrachteten Käserei für ein Jahr

	Wärmegeführt	Netzgeführt
Wärmebedarf [MWhth]	728	728
KWK-Strom [MWhel]	316	168
KWK-Wärme [MWhth]	517	268
Wärme aus dem Spitzenkessel [MWhth]	220	470
Speicherwärmeverluste [MWhth]	9	9
Angebotene positive Minutenreserve [MWel·h]	-	155
Angebotene negative Minutenreserve [MWel·h]	-	161
Abgerufene positive Minutenreserve [MWel]	-	4
Abgerufene negative Minutenreserve [MWel]	-	4

Quelle: Eigene Berechnungen

7.6 Vergleich der Regelleistungspotenziale der BHKW in unterschiedlichen Objekttypen

Die BHKW in Wohngebäuden haben auf Grund ihrer geringen Leistung einen Nachteil gegenüber den Nichtwohngebäuden. Um die Mindestangebotsgröße (derzeit 5 MW_{el}) zu erreichen, müssen bei einer größeren Anlage weniger Einheiten kommunikationstechnisch verbunden und gesteuert werden. Bei einer Vielzahl an KWK-Anlagen in Wohneinheiten wirkt eine Vergleichmäßigung der Gesamtwärmenachfrage allerdings positiv auf die Bedingungen zur Minutenreservebereitstellung.

Die Nichtwohngebäude zeichnen sich durch einen größeren Wärmebedarf pro Objekt als die Wohngebäude aus. Eine Auslegung mit relativ niedrigem Lastdeckungsgrad erlaubt in diesem Fall zusätzlich eine hohe Minutenreservebereitstellung pro installierter Anlagenleistung. Die Nichtwohngebäude können also gut in einen Pool von Anlagen integriert werden und eignen sich für eine flexible Betriebsstrategie. Abgesehen von diesen beiden Aspekten sind die KWK-Anlagen in Wohngebäuden und in Nichtwohngebäuden aber gleichermaßen gut geeignet, am Minutenreservemarkt teilzunehmen.

Prinzipiell zeigt das Wärmenetz-BHKW, wie zu erwarten, ein ähnliches Verhalten wie ein Pool von kommunikationstechnisch verbundenen KWK-Anlagen in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden. Die Vergleichmäßigung der Wärmebedarfscharakteristik muss hier nicht aufwendig durch eine kommunikations- und regeltechnische Verbindung geschaffen werden, sondern ist bereits durch das Wärmenetz gegeben. Zudem ist in der Regel der Wärmebedarf und die resultierende elektrische Anlagenleistung vergleichsweise hoch, was das Poolen der Einheiten erleichtert. BHKW-Anlagen für Wärmenetze kommen daher sehr gut für einen flexiblen netzgeführten Einsatz am Minutenreservemarkt in Frage. Dabei ist eine Mischung von unterschiedlichen Nutzergruppen (Haushalte, Industrie und Gewerbekunden) prinzipiell gut geeignet die Gesamtwärmenachfrage zu vergleichmäßigen und auch saisonalen Effekten entgegenzuwirken. Eine weniger schwankende Wärmebedarfskurve kann sich positiv auf die Fähigkeit auswirken, Minutenreserve bereitzustellen.

Das Industriebeispiel zeigt einen sehr volatilen Wärmebedarf. Dadurch unterscheidet es sich von den anderen betrachteten Versorgungsobjekten, die durch den Zusammenschluss vieler Einzelanlagen vergleichmäßigte Lastprofile aufweisen. Diese Effekte ergeben sich nicht, wenn eine industriell genutzte BHKW-Anlage eine genügend hohe elektrische Leistung hat, um ohne Poolung Minutenreserve anzubieten. Außerdem kann sich je nach Anwendungsfall neben dem Einbruch des Wärmebedarfs im Sommer auch eine typische Verringerung an Wochenenden und Feiertagen ergeben. Deswegen ist die Auslastung einer solchen Anlage geringer als bei den anderen Objekttypen bei gleichem Lastabdeckungsgrad. Somit ist auch das Regelleistungspotenzial beschränkt.

Diese Aussage ist jedoch nicht pauschal auf den gesamten Industriesektor übertragbar, da sie stark von der Charakteristik des Wärmeprofiles abhängt. So würde beispielsweise ein Betrieb aus der metallverarbeitenden- oder der Papier-Industrie, in dem ein Dreischichtbetrieb einen konstanten Wärmebedarf, unabhängig von Tages- oder Jahreszeit, zur Folge hat, deutlich höhere und konstantere Regelleistungspotenziale bieten.

7.7 Potenziale bei Flexibilisierung der netzgeführten BHKW

In diesem Kapitel werden die Potenziale einer flexibilisierten Anlagenauslegung auf die Bereitstellung von Minutenreserve betrachtet und prinzipiell drei verschiedene

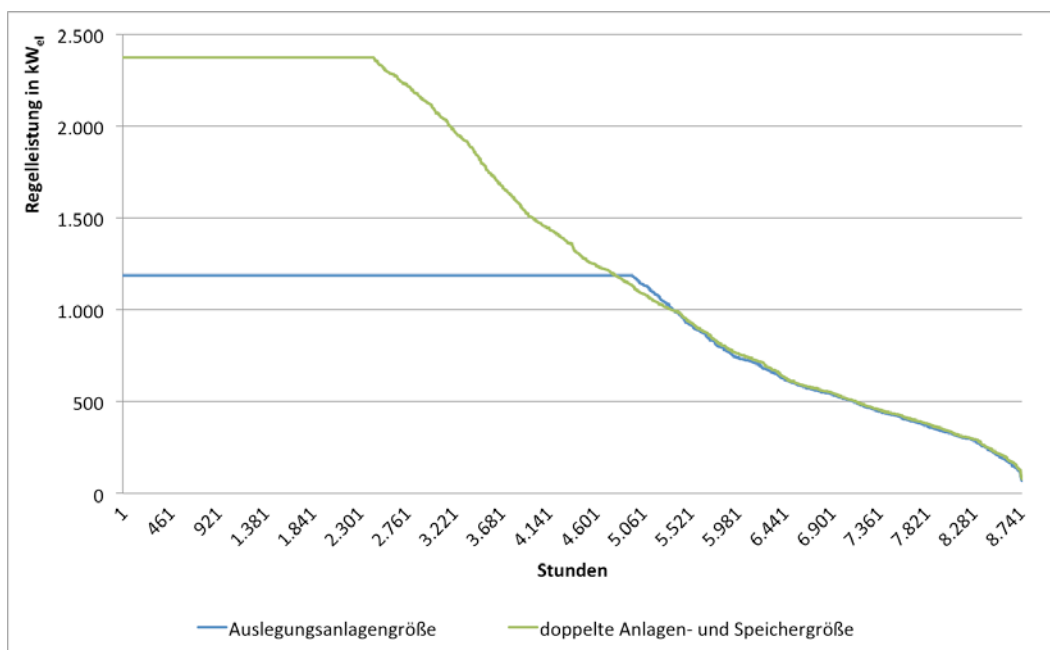
Flexibilisierungsstrategien unterschieden. Zum einen wird eine Verdopplung der Anlagenleistung und des zur Verfügung stehenden Speichers untersucht (Kapitel 7.7.1), zum anderen wird eine Vervielfachung des Speichervolumens bei sonst gleicher Anlagenauslegung modelliert (Kapitel 7.7.2). Schließlich wird auch die Auswirkung der Installation eines Notkühlers, welcher die Leistungsfähigkeit des BHKW besitzt, betrachtet (Kapitel 7.7.3). Abschließend werden die Flexibilisierungsoptionen untereinander verglichen (Kapitel 7.7.4).

7.7.1 Vergrößerung der Anlagen (Flex-1)

Die Flexibilisierungsoption 1 beinhaltet die Verdopplung der elektrischen Anlagenleistung und des zugehörige Speichervolumens im Vergleich zur wärmegeführten Auslegung.

Eine Vergrößerung der Anlage führt gerade in den Wintermonaten zu einem verstärkten Angebot an Regelleistung. Auch die Wärmespitzen können nun für die KWK-Anlage nutzbar gemacht werden. Dieser Zusammenhang zeigt sich beispielsweise in der Jahresdauerlinie des Nichtwohngebäudes 1 (Krankenhaus) in Abb. 7-13. Hier kann die KWK-Anlage im Winter eine höhere Leistung an den Minutenreservemarkt bringen, die Problematik eines geringen Wärmebedarfs im Sommer kann durch die Verdopplung des Speichervolumens in diesem Fall nicht entgegen gewirkt werden.

Abb. 7-13: Jahresdauerlinie der Bereitstellung von Minutenreserve für das NWG 1 (Krankenhaus) bei größerer Anlagenleistung



Quelle: Eigene Berechnungen

Das Minutenreservopotenzial erhöht sich mit dieser Flexibilisierungsstrategie bei den einzelnen Wohngebäude-BHKW zwischen 10 % und 52 %. Bei Nichtwohngebäuden beträgt der Zuwachs

zwischen 29 % und 56 % (Tab. 7-5). Die positive und negative Minutenreservebereitstellung wird hier zu einer Größe zusammengefasst.³⁷

Tab. 7-5: Vergleich des netzgeführten Betriebes der KWK-Anlage mit Auslegungsanlagengröße und flexiblisierter Anlagengröße für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie

Gebäudetyp	Minutenreservebereitstellung [kW _{el} ·h]		Steigerung auf
	mit Auslegungsgröße	mit Flexibilisierung 1	
WG 1 / EFH alt	4.447	4.900	110 %
WG 2 / kl. MFH alt	32.181	39.064	121 %
WG 3 / gr. MFH alt	39.833	60.533	152 %
WG 4 / HH alt	360.335	541.723	150 %
WG 5 / kl. MFH neu	5.213	5.827	112 %
WG 6 / gr. MFH neu	18.962	22.903	121 %
WG 7 / HH neu	210.855	247.950	118 %
WG 8 / gr. MFH passiv	7.818	11.968	153 %
WG 9 / HH passiv	99.823	120.735	121 %
WG 10 / RHS passiv	37.373	47.205	126 %
NWG 1 / Krankenhäuser	8.127.422	12.376.349	152 %
NWG 2 / Altenheime	497.765	777.612	156 %
NWG 3 / Hotels	138.622	214.358	155 %
NWG 5 / Bürogebäude	134.423	187.944	140 %
NWG 6 / Schulen	240.304	310.858	129 %
Fallbeispiel Wärmenetz	20.117.939	30.439.672	151 %
Fallbeispiel Industrie	315.966	454.954	144 %

Quelle: Eigene Berechnungen

Es fällt auf, dass der Effekt einer verdoppelten Anlagenleistung und einer verdoppelten Speichergröße auf die Minutenreservebereitstellung je nach Anlagenkonfiguration unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Bei einer Anlagenauslegung mit einem relativ geringem Lastdeckungsgrad (beispielsweise WG 4 und NWG 2) führt eine Verdoppelung der Anlagenleistung zu einem stärkeren Anstieg der angebotenen Minutenreserve. Dagegen kann

³⁷ In dieser Ergebnisdarstellung wird darauf verzichtet, die Bereitstellung positiver und negativer Minutenreserve getrennt auszuweisen. Dieses Verhältnis wird, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, durch die Struktur des Modells bestimmt und ist nicht sensitiv hinsichtlich der Flexibilisierungsstrategien.

bei einem hohen Lastdeckungsgrad auch eine verdoppelte Anlagenleistung keinen großen Effekt mehr erreichen (vgl. WG 1 oder WG 5).

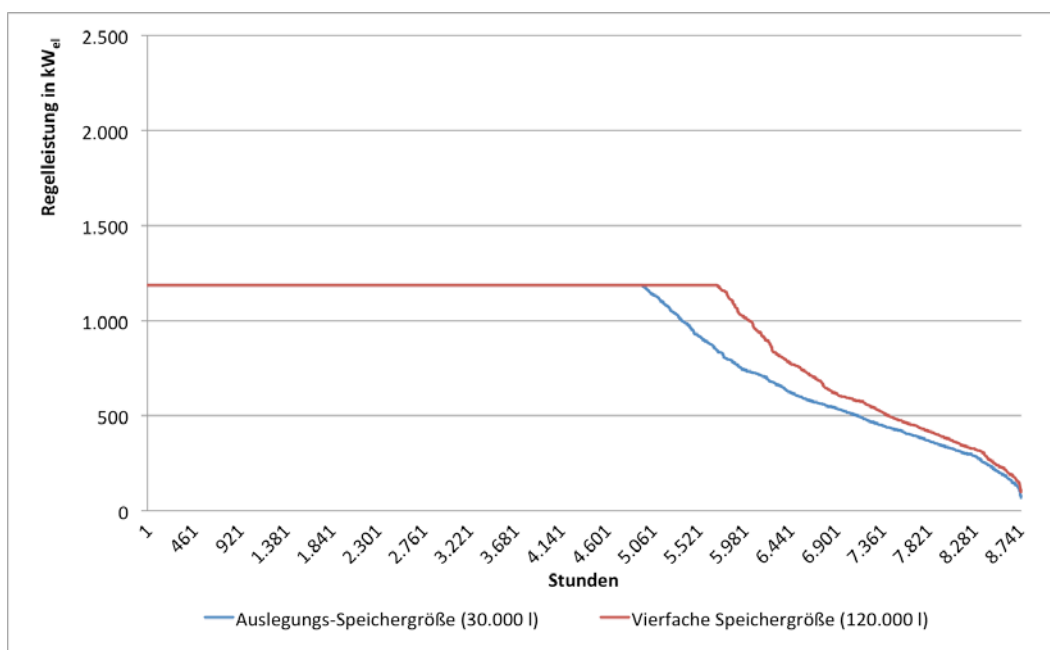
Gleichzeitig wird aber auch sichtbar, dass eine Verdopplung der Anlagenleistung für die gleichen Objekte maximal ein Plus von 56 % beim Minutenreserveangebot bedeutet, während durch einen entsprechenden Ausbau an BHKW-Leistung eine Steigerung um 100 % möglich wäre.

Die Wärmeverluste steigen bei einem Vergleich des Flexibilisierungsfalls 1 mit der netzgeführten Betriebsweise um 97 % bis 115 % an. Das zeigt, dass sich die Nutzung des doppelt so großen Wärmespeichers nicht wesentlich von der Nutzung des Speichers im netzgeführten Betrieb unterscheidet, auch hier dominieren ganz klar die Verluste auf Grund der minimal erforderlichen Speichertemperatur. Da der Speicher in dieser Variante zweimal so groß ist, verdoppeln sich auch die Speicherverluste.

7.7.2 Vergrößerung der Wärmespeicher (Flex-2)

Die Flexibilisierungsoption 2 beinhaltet die Vervierfachung der Speicher in jedem Versorgungsobjekt. Diese Maßnahme führt gerade in der Übergangszeit zu einem erhöhten Angebot von Regelleistung, da hier gut auf ein Pendeln der Wärmenachfrage um die thermische Nennleistung der Anlage reagiert werden kann. Je nach Gebäudetyp und Anlagenauslegung kann die angebotene Regelleistung damit um 6 % bis 24 % gegenüber der nicht-flexibilisierten Betriebsweise gesteigert werden (siehe Tab. 7-6).

Abb. 7-14: Jahresdauerlinie der Bereitstellung von Minutenreserve für das NWG 1 (Krankenhaus) bei einer Vervierfachung des Wärmespeichers



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Tab. 7-6 zeigt den Vergleich zwischen der netzgeführten Betriebsweise bei Anlagenauslegung und der Flexibilisierungsoption 2 bei allen betrachteten Gebäudetypen.

Tab. 7-6: Vergleich des netzgeführten Betriebes der KWK-Anlage mit Auslegungsanlagengröße und vierfachem Wärmespeicher für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie

Gebäudetyp	Minutenreservebereitstellung [$\text{kW}_{\text{el}} \cdot \text{h}$]		Steigerung auf
	mit Auslegungsgröße	mit Flexibilisierung 2	
WG 1 / EFH alt	4.447	5.524	124 %
WG 2 / kl. MFH alt	32.181	36.839	114 %
WG 3 / gr. MFH alt	39.833	43.636	110 %
WG 4 / HH alt	360.335	382.680	106 %
WG 5 / kl. MFH neu	5.213	6.226	119 %
WG 6 / gr. MFH neu	18.962	21.826	115 %
WG 7 / HH neu	210.855	239.620	114 %
WG 8 / gr. MFH passiv	7.818	8.607	110 %
WG 9 / HH passiv	99.823	114.762	115 %
WG 10 / RHS passiv	37.373	42.901	115 %
NWG 1 / Krankenhäuser	8.127.422	8.590.017	106 %
NWG 2 / Altenheime	497.765	534.674	107 %
NWG 3 / Hotels	138.622	148.344	107 %
NWG 5 / Bürogebäude	134.423	143.727	107 %
NWG 6 / Schulen	240.304	259.865	108 %
Fallbeispiel Wärmenetz	20.117.939	23.325.396	116 %
Fallbeispiel Industrie	315.966	342.032	108 %

Quelle: Eigene Berechnungen

Es zeigt sich auch bei dieser Flexibilisierungsoption, dass die erzielbaren Effekte stark von der Anlagenauslegung abhängen. Bei einer Dimensionierung mit einem hohem Lastdeckungsgrad kann ein signifikant größerer Speicher gerade in der Übergangszeit die Bereitstellung von Regelleistung ermöglichen. Dagegen stellt die KWK-Anlage bei einem geringen Lastdeckungsgrad schon so häufig Regelleistung in Höhe ihrer Nennleistung bereit, dass ein größerer Speicher nur in wenigen Situationen zu einer signifikanten Erhöhung des Minutenreserveangebots beitragen kann.

Verglichen mit der Auslegungsanlagengröße steigen die Wärmeverluste in diesem Flexibilisierungsfall bei allen Objekten auf zwischen 390 % und 421 % an. Die Speicherverluste wachsen auch hier ungefähr linear mit der Speichergröße. Allerdings ist nur bei einer Anlagenauslegung (Wohngebäudetyp 1) eine massive Steigerung des Wärmebedarfs festzustellen. Eine Steigerung des Wärmebedarfs um etwa 10 % ist zwar signifikant, kann aber im Einzelfall gerechtfertigt werden.

7.7.3 Einsatz von Notkühlern (Flex-3)

Die Flexibilisierungsoption 3 beinhaltet den Einsatz von Notkühlern. Diese sind genauso groß wie die thermische Leistung des BHKW. Ein solcher Notkühler erlaubt also über das ganze Jahr die maximale Anlagenleistung für den Minutenreservemarkt vorzuhalten. Gleichzeitig wird durch eine solche Option der KWK-Ansatz ausgehöhlt. Es gibt nun Betriebszustände, in welchen das BHKW wie ein gewöhnlicher Generator mit Kühlung arbeitet. Die Entscheidung, ob negative oder positive Minutenreserve angeboten werden soll, entscheidet dabei maßgeblich über die Höhe der weggekühlten Energie. Wenn die KWK-Anlage immer positive Minutenreserve anbieten würde, müsste der Notkühler nur eingesetzt werden, wenn die positive Minutenreserve abgerufen, der aktuelle Wärmebedarf unter der erzeugten KWK-Wärme und sich der Speicher schon an seinen thermischen Grenzen angelangt ist. Dies wäre äußerst selten der Fall. Für den Fall, dass immer negative Minutenreserve angeboten werden würde, wäre der Wärmebedarf des Versorgungsobjektes häufig unter der produzierten KWK-Wärme und der Notkühler müsste häufig eingesetzt werden. Eine gemischte Angebotsstrategie, welche über ein positives oder ein negatives Angebot abhängig vom Wärmebedarf entscheidet, könnte die überschüssige Wärme reduzieren.

Die angebotene Minutenreserve kann über eine solche Maßnahme je nach Anlagenauslegung zwischen 12 % und 97 % steigen. Eine Anlage mit einer recht geringen Ausnutzung (Wohngebäudetyp 1) kann sehr viel stärker von einer weiteren Wärmesenke über den Notkühler profitieren als eine KWK Anlage mit ohnehin schon hohen Volllaststunden (Wohngebäudetyp 8). Die meisten Anlagen bewegen sich mit dieser Flexibilisierungsoption bei einer Steigerung der Minutenreserve zwischen 120 und 130 % (Tab. 7-7).

Tab. 7-7: Vergleich des netzgeführten BHKW-Betriebes mit und ohne Notkühlernutzung (Flexibilisierung-3) für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie

Gebäudetyp	Minutenreservebereitstellung [kW _{el} ·h]		Steigerung auf
	ohne Notkühler	mit Notkühler	
WG 1 / EFH alt	4.447	8.760	197 %
WG 2 / kl. MFH alt	32.181	48.180	150 %
WG 3 / gr. MFH alt	39.833	48.180	121 %
WG 4 / HH alt	360.335	438.000	122 %
WG 5 / kl. MFH neu	5.213	8.760	168 %
WG 6 / gr. MFH neu	18.962	26.280	139 %
WG 7 / HH neu	210.855	297.840	141 %
WG 8 / gr. MFH passiv	7.818	8.760	112 %
WG 9 / HH passiv	99.823	133.152	133 %
WG 10 / RHS passiv	37.373	48.180	129 %
NWG 1 / Krankenhäuser	8.127.422	10.415.640	128 %
NWG 2 / Altenheime	497.765	621.960	125 %
NWG 3 / Hotels	138.622	175.200	126 %
NWG 5 / Bürogebäude	134.423	157.680	117 %
NWG 6 / Schulen	240.304	297.840	124 %
Fallbeispiel Wärmenetz	20.117.939	24.457.920	122 %
Fallbeispiel Industrie	315.966	438.000	139 %

Quelle: Eigene Berechnungen

In der Tab. 7-8 werden die Anteile der Wärmeverluste (Speicherverluste und Einsatz des Notkühlers) an der Wärmeproduktion im netzgeführten Betrieb ohne Flexibilisierung und im Notkühlerbetrieb verglichen. Hier wird deutlich, dass die Steigerung der Wärmeverluste signifikant sein kann. In Einzelfällen können die Wärmeverluste über die Hälfte der produzierten Wärme betragen.

Tab. 7-8: Vergleich der Wärmeverluste im netzgeführten BHKW-Betrieb mit und ohne Notkühlernutzung für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Fallbeispiele Wärmenetz und Industrie

Gebäudetyp	Anteil der Wärmeverluste an der Wärmeproduktion		Steigerung auf
	ohne Notkühler	mit Notkühler	
WG 1 / EFH alt	2,3 %	58,6 %	140 %
WG 2 / kl. MFH alt	1,7 %	30,7 %	117 %
WG 3 / gr. MFH alt	1,3 %	9,8 %	104 %
WG 4 / HH alt	0,6 %	9,8 %	105 %
WG 5 / kl. MFH neu	1,3 %	43,0 %	127 %
WG 6 / gr. MFH neu	1,2 %	21,0 %	111 %
WG 7 / HH neu	0,9 %	26,4 %	115 %
WG 8 / gr. MFH passiv	1,4 %	4,1 %	102 %
WG 9 / HH passiv	1,2 %	17,3 %	109 %
WG 10 / RHS passiv	1,4 %	15,1 %	108 %
NWG 1 / Krankenhäuser	0,3 %	12,4 %	107 %
NWG 2 / Altenheime	0,5 %	9,9 %	105 %
NWG 3 / Hotels	0,4 %	11,1 %	106 %
NWG 5 / Bürogebäude	0,5 %	6,6 %	103 %
NWG 6 / Schulen	0,5 %	11,5 %	106 %
Fallbeispiel Wärmenetz	3,0 %	8,9 %	103 %
Fallbeispiel Industrie	1,3 %	21,6 %	111 %

Quelle: eigene Berechnungen

Die Entscheidung für eine Flexibilisierungsoption mit einem möglichen Notkühlereinsatz muss daher mit einer geeigneten Betriebsstrategie einhergehen. Nur so lassen sich die Wärmeverluste in einem akzeptablen Rahmen halten.

7.7.4 Vergleich der Flexibilisierungsstrategien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Bereitstellung von Regelleistung

Die drei Flexibilisierungsstrategien haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Charakteristik der Regelleistungsbereitstellung. Dies lässt sich gut anhand der Form der Jahresdauerlinie (JDL) darstellen. Ohne die Flexibilisierungsstrategien ähnelt die JDL der Regelleistungsbereitstellung in ihrer Form stark der des Wärmebedarfs des jeweiligen Objektes, ist jedoch durch die Anlagenleistung begrenzt, so dass sich ein Plateau zu Beginn der JDL zeigt (siehe beispielsweise Abb. 7-5).

Die Vergrößerung der KWK-Anlage (Flex-1) erhöht dieses Plateau auf die entsprechende Leistung (siehe Abb. 7-13). Durch die Vergrößerung des Speichers (Flex-2) können die Übergangszeiten besser nutzbar gemacht werden, so dass sich das Plateau weiter nach rechts ausdehnt (siehe Abb. 7-14). Der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3) entkoppelt die Regelleistungsbereitstellung vom Wärmebedarf, so dass zu jedem Zeitpunkt die volle Leistung angeboten werden kann und die JDL eine konstante Linie auf Höhe der Anlagenleistung darstellt.

In welchem Maße sich die Regelleistungsbereitstellung durch welche Flexibilisierungsstrategie steigern lässt, ist stark von der Basis-Anlagenauslegung abhängig. Bei einer Anlagenauslegung mit einem relativ geringem Lastdeckungsgrad (z. B. WG 4) führt eine Verdoppelung der Anlagenleistung zu einem stärkerem Anstieg der angebotenen Minutenreserve. Dagegen kann bei einem hohen Lastdeckungsgrad (z. B. WG 1 oder WG 5) auch durch eine verdoppelte Anlagenleistung kein großer Effekt mehr erreicht werden (siehe Tab. 7-5).

Bei einer Anlagenauslegung mit einem hohem Lastdeckungsgrad kann ein signifikant größerer Speicher gerade in der Übergangszeit die Bereitstellung von Regelleistungskapazität ermöglichen. Dagegen stellt die KWK-Anlage bei einem geringem Lastdeckungsgrad schon so häufig Regelleistung in Höhe ihrer Nennleistung bereit, dass ein größerer Speicher nur in wenigen Situationen zu einer signifikanten Erhöhung des Minutenreserveangebots beitragen kann.

7.7.5 Kosten-Nutzen-Vergleich der Flexibilisierungsstrategien

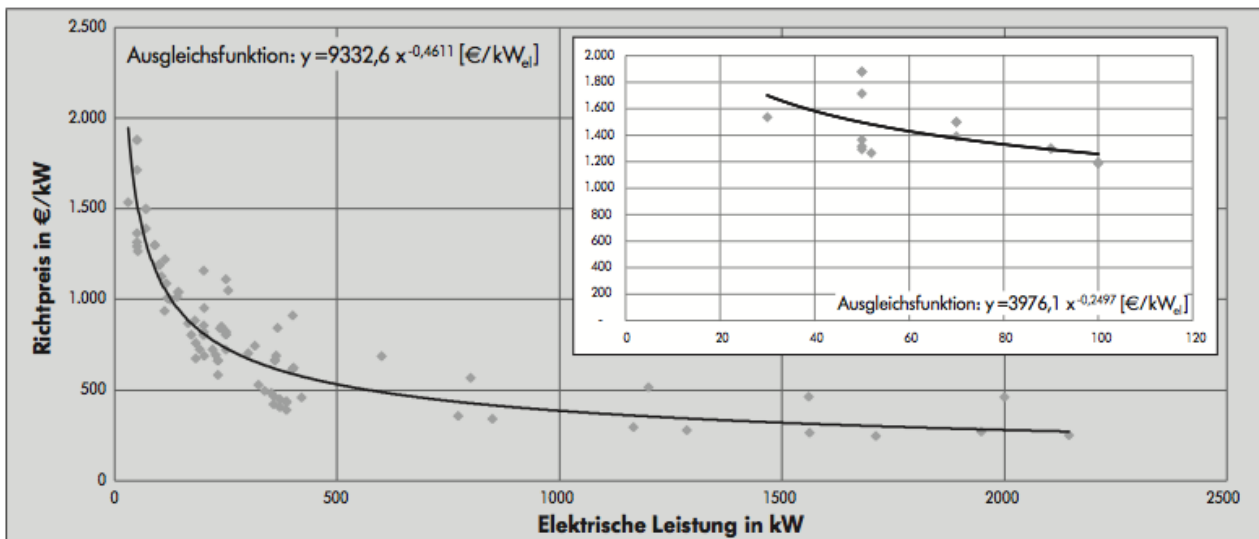
Die zuvor dargestellten Analysen und Ergebnisse beleuchten im Wesentlichen technische und energetische Aspekte. Daher werden sie im Folgenden durch eine einfache Kosten-Nutzen-Analyse ergänzt.

Als Ansatzpunkt dafür wird das Verhältnis von zusätzlicher Regelleistung, die durch die Flexibilisierungsstrategien jeweils ermöglicht wird, zu den Installationskosten betrachtet. Dieses Verhältnis wird exemplarisch für drei Wohngebäudetypen berechnet: Wohngebäude 2 (kleines Mehrfamilienhaus Altbau) und 4 (Hochhaus Altbau), da diese in 2010 den größten Anteil an der installierten Leistung ausmachen, und Wohngebäude 3 (großes Mehrfamilienhaus Altbau), da dieser Gebäudetyp ab 2020 signifikante Anteile der KWK-Leistung repräsentiert.

Die ausgewiesenen technischen Regelleistungspotenziale beziehen sich jeweils auf ein Jahr. Dementsprechend müssen auch die diesen gegenüberstehenden Kosten auf Jahresbasis umgerechnet werden. Dazu werden die Annuitäten der Investitionen mit einem angenommenen Zinssatz von 7 % und einer Lebensdauer von 20 Jahren berechnet. Gegebenenfalls zusätzlich anfallende Wartungs- und Instandhaltungskosten werden als weniger relevant eingestuft und daher nicht betrachtet.

Die Kosten für eine Vergrößerung des BHKW basieren auf (ASUE 2011). Die spezifischen Kosten für die BHKW-Anlage ohne Speicher und Spitzenkessel werden als eine negativ exponentielle Funktion der elektrischen Leistung dargestellt. Für den Spitzenkessel wird vereinfachend unterstellt, dass die Anschaffungskosten 10 % der Investitionen für die jeweilige Anlage entsprechen. Die Speicherkosten werden entsprechend der nachfolgend beschriebenen Näherung auf Basis realer Speicher abgeleitet.

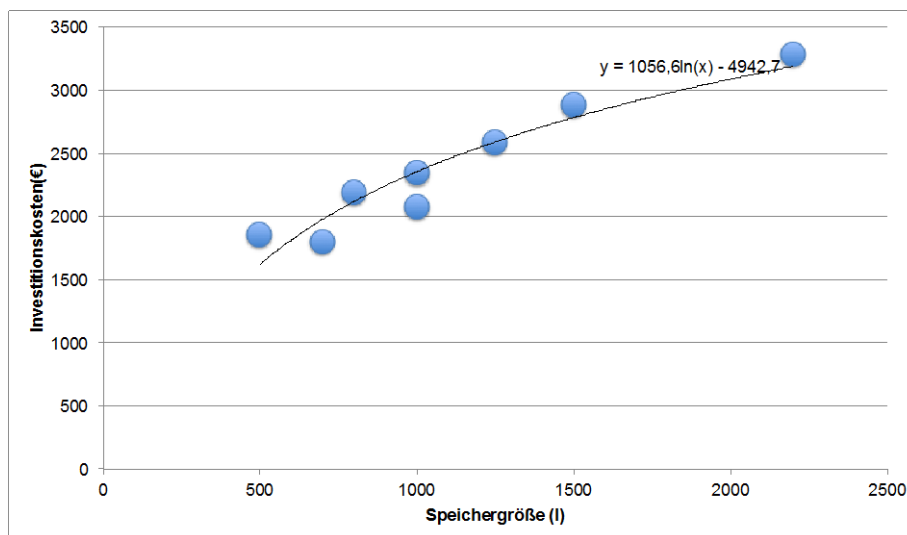
Abb. 7-15: Abschätzung der Investitionskosten für KWK-Anlagen



Quelle: (ASUE 2011)

Die Investitionen für größere Speicher werden anhand einer eigenen Kostenrecherche abgeschätzt. Demnach besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen den Anschaffungskosten und der Speichergröße (siehe Abb. 7-16). Die Kosten für die Vergrößerung des Speichers auf das Vierfache der Auslegungsgröße (Flex-2) liegen etwa eine Größenordnung unter denen für Flex-1.

Abb. 7-16: Investitionen für Speicher in Abhängigkeit vom Volumen³⁸

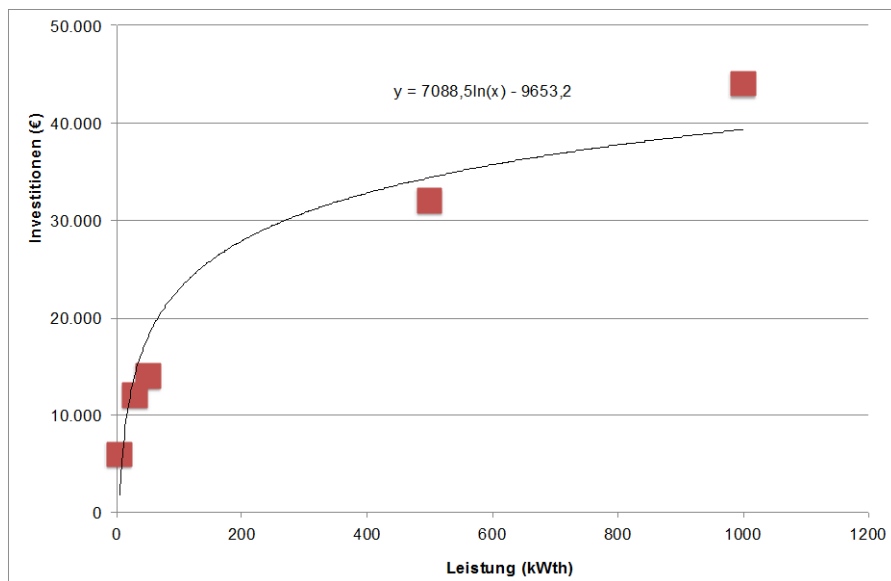


Quelle: Eigene Berechnungen

³⁸ Eigene Recherche zu Anschaffungskosten von Schichtspeichern. Berücksichtigte Produkte: EHK 1000, EHKS 1000, EHKSS 1000, HSK 500, KSS 700, HSK 800, KWW 1000, HSK KSS 1000, HSK KSS 1250, HSK KSS 1500, HSK KSS 2000, Fröling 1000, Junkers 500, Junkers 800, Junkers 1000, Hellmann 1500

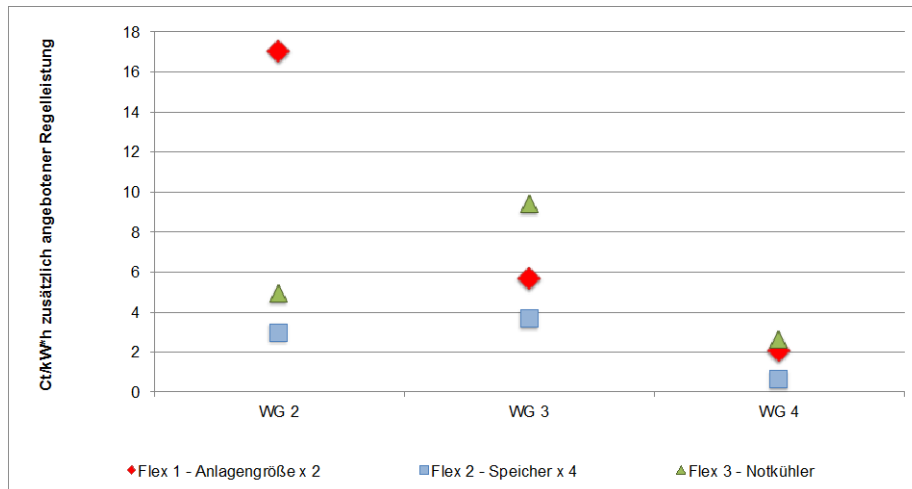
Die Investitionen für Notkühler wurden ebenfalls auf der Basis realer Anschaffungskosten für unterschiedliche thermische Leistungen ermittelt (Gailfuß 2012). Diese Daten wurden für die Abschätzung der Investitionen für die Analyse interpoliert (siehe Abb. 7-17). Damit wird implizit unterstellt, dass es keine Restriktionen hinsichtlich der Anlagengröße gibt. Die Kosten für die Installation eines Notkühlers (Flex-3) liegen demnach zwischen denen von Flex-1 und Flex-2.

Abb. 7-17: Investitionen für Notkühler in Abhängigkeit von der thermischen Leistung



Quelle: (Gailfuß 2012); eigene Darstellung

Für die Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der verschiedenen Flexibilisierungsoptionen werden für jede Variante die annuitätischen Kosten berechnet. Die Differenz der Kosten zur Basisauslegung wird durch die zusätzlich angebotene Regelleistung geteilt, um die Kosten in € pro Kilowattstunde der zusätzlich angebotenen Regelleistung zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Rechnungen für die drei Wohngebäudetypen und die verschiedenen Flexibilisierungsoptionen sind in der Abb. 7-18 und Tab. 7-9 dargestellt.

Abb. 7-18: Kosten-Nutzen-Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz


Bemerkungen: WG 2: kleines MFH Altbau, WG 3: großes MFH Altbau; WG 4: Hochhaus Altbau

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 7-9: Kosten-Nutzen-Verhältnis von doppelter Anlagengröße, vierfacher Speichergröße und Notkühlereinsatz

Gebäudetyp	Flexibilisierung-1 Doppelte Anlagengröße [ct/kW _{el} ·h]	Flexibilisierung-2 Vierfache Speichergröße [ct/kW _{el} ·h]	Flexibilisierung-3 Notkühler [ct/kW _{el} ·h]
WG 2/ kl. MFH alt	17,0	3,0	4,9
WG 3/ gr. MFH alt	5,6	3,6	9,3
WG 4 / HH alt	2,0	0,6	2,6

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Großteil der spezifischen Kosten pro zusätzlich angebotener Regelleistung liegt zwischen 2 und 6 ct/kW·h. Lediglich die doppelte Anlagengröße in Wohngebäude 2 und der Notkühlereinsatz in Wohngebäude 3 liegen mit 17 ct/kW·h bzw. 9 ct/kW·h deutlich darüber, da in diesen Fällen weniger zusätzliche Regelleistung im Verhältnis zu den Kosten generiert werden kann. Die Speichervergrößerung in Wohngebäude 4 erreicht mit nur 0,6 ct/kW·h sehr niedrige Kosten, da die Verdoppelung des ohnehin bereits großen Speichers nur geringe zusätzliche spezifische Kosten verursacht.

Die Abb. 7-18 und Tab. 7-9 zeigen auch deutlich, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis der verschiedenen Flexibilisierungsoptionen stark vom Wohngebäudetyp und der Auslegungsgröße der KWK abhängt. Für die betrachteten drei Wohngebäudetypen ist die Flexibilisierungsoption 2 (Vervierfachung des Speichervolumens) stets die günstigste. Das Binnenverhältnis der Flexibilisierungsstrategien ist jedoch stark von der Anlagenkonfiguration abhängig. Bei großen Anlagen sind die Kostensteigerungen, die durch die Flexibilisierungsoptionen entstehen, aufgrund des logarithmischen Zusammenhangs zwischen Leistung bzw. Speichergröße und Kosten geringer als bei kleineren Anlagen. Daher sind niedrigere Investitionen pro zusätzlich angebotener Kilowattstunde Regelleistung notwendig.

Einen ebenfalls großen Einfluss hat der Wärmedeckungsanteil der Anlagen. Ist eine Anlagenkonfiguration so ausgelegt, dass der Wärmebedarf in der Standardkonfiguration

bereits größtenteils durch die KWK-Anlage gedeckt ist, ist auch das Regelleistungspotenzial bereits weitestgehend erschlossen. Der Wärmebedarf stellt die limitierende Größe für das Regelleistungsangebot dar, so dass auch bei der Einrichtung von Flexibilisierungsmaßnahmen der Regelleistungsgewinn nicht wesentlich steigt. Eine größere Anlage kann in diesem Fall nur dann eine Steigerung des Regelleistungspotenzials bewirken, wenn zusätzlich ein Notkühler installiert wird, der eine Wärmesenke darstellt.

Bei Anlagen hingegen, bei denen in der Standardauslegung nur geringe Teile des Wärmebedarfs durch die BHKW gedeckt werden, bewirkt eine größere Anlage eine deutliche Steigerung des Regelleistungsangebots. Hier kann durch den Einsatz eines Notkühlers oder eines größeren Speichers aber nur wenig zusätzliche Regelleistung bereit gestellt werden (siehe dazu Kapitel 7.7.1 bis 7.7.3).

Es bleibt also je nach spezifischer Anlagenkonfiguration zunächst zu prüfen, welche Flexibilisierungsoption am besten für eine Steigerung des Regelleistungspotenzials eingesetzt werden sollte. Aus der Kosten-Nutzen-Analyse folgen tendenziell Vorteile für den Einsatz eines größeren Speichers (Flex-2). Diese Option hat zudem den Vorteil, dass sie sich gut für eine Flexibilisierung bestehender Anlagen eignet und mit geringerem Zusatzaufwand als die anderen Flexibilisierungsoptionen einhergehen dürfte. Für eine Verdopplung der Anlage bzw. den Einsatz eines Notkühlers bleibt die Kosten-Nutzen-Analyse indifferent. In diesen Fällen ist besonders auf die bestehende oder geplante Anlagenkonfiguration zu achten.

Energetische Gebäudesanierungen führen bei Bestands-BHKW indirekt zu einer Flexibilisierung, da ihr Lastanteil aufgrund des verringerten Wärmebedarfs dann größer als zuvor ausfällt. Da ambitionierte Sanierungsstrategien im Gebäudebestand ohnehin auf der politischen Agenda stehen, könnte die Flexibilisierung durch Anlagenvergrößerung im Vergleich zur Speichervergrößerung nachrangig verfolgt werden.

Notkühler können das Potenzial zwar zu moderaten Preisen stark erweitern, sie führen allerdings im Vergleich zu den anderen Flexibilisierungsoptionen zu höheren CO₂-Emissionen (siehe Kapitel 8.2.5).

7.8 Ermittlung der Minutenreservepotenziale des BHKW-Bestands für die Jahre 2020 und 2030

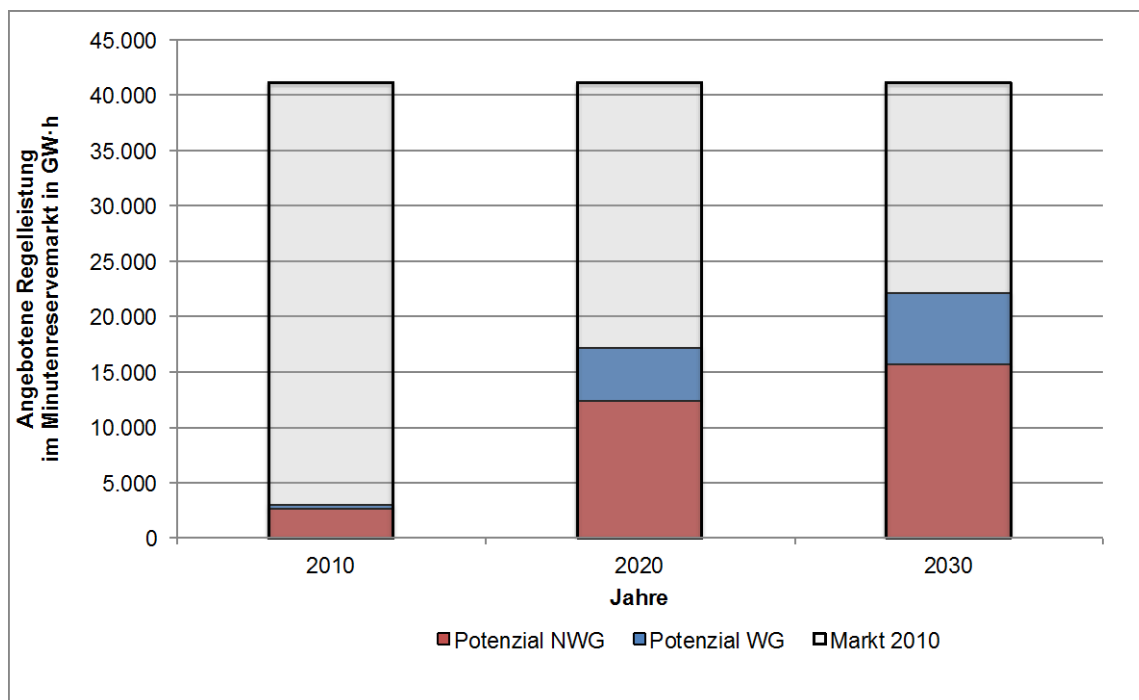
Die Ergebnisse der vorherigen Kapitel lassen sich nun mit Hilfe des laut Szenario (vgl. Kapitel 5.1) installierten Anlagenbestandes auf die Jahre 2020 und 2030 hochrechnen. Als Vergleichsbasis dient dabei der Minutenreservemarkt 2010. Diese Hochrechnung zeigt ein mögliches technisches Potenzial der BHKW im Wohngebäude und Nichtwohngebäudebereich auf.³⁹ Dabei ist zu beachten, dass das Mengengerüst einen sehr starken Einfluss auf die Ergebnisse hat. Sollte sich der Anlagenpark anders entwickeln (z. B. weniger stark) als im (ambitionierten) Szenario der Leitstudie, resultieren abweichende Ergebnisse. Das dargestellte technische Potenzial ist zudem abhängig von der gewählten

³⁹ Die Minutenreserve-Potenziale der BHKW im Bereich der Industrie und der Wärmenetze werden dagegen aufgrund ihrer Individualität nicht hochgerechnet.

Angebotsstrategie, d. h. bei anderen z. B. betriebswirtschaftlich optimierten Angebotsstrategien für positive und negative Regelleistung könnten ggf. auch höhere oder niedrigere Potenziale erreicht werden.

Insgesamt ergibt sich für den betrachteten Zeitraum und die beiden Bereiche Wohngebäude und Nichtwohngebäude das in der Abb. 7-19 dargestellte absolute Potenzial. Im Jahr 2010 hätten BHKW in den genannten Objekten (d. h. Wohn- und Nichtwohngebäuden) einen Anteil von 7,3 % des Minutenreservemarktes abdecken können. Die Abb. 7-19 zeigt, dass mit dem Anlagenbestand der Jahre 2020 und 2030 ein Anteil von 41,8 % bzw. 54,0 % am Minutenreservemarkt 2010 möglich gewesen wäre.

Abb. 7-19: Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve

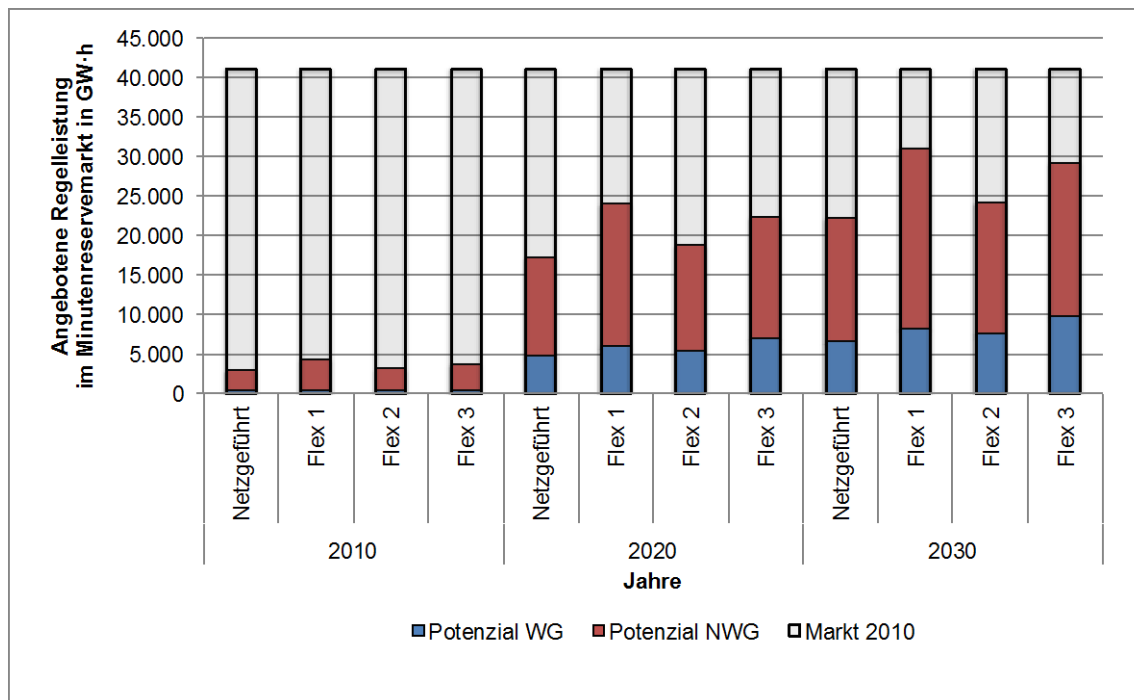


Quelle: Eigene Berechnungen

Unter Berücksichtigung der Flexibilisierung erhöht sich dieses Potenzial noch einmal erheblich. Die Abb. 7-20 zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Flexibilisierungsoptionen. Hier wird nicht zwischen der Bereitstellung von positiver- und negativer Regelleistung unterschieden, da das Angebot von negativer oder positiver Regelleistung am Markt 2010 orientiert ist und zudem mit nahezu identischer Quantität angeboten wurde, wäre eine Ausweisung der verschiedenen Minutenreservearten ohne weiteren Informationsgehalt.

Im Jahre 2010 hätten BHKW mit der Flexibilisierungsoption 1 (doppelte Anlagengröße) schon etwa 11 % des Minutenreservemarktes abdecken können. In den Jahren 2020 und 2030 könnten es ca. 58 % bzw. 76 % des Minutenreservemarktes 2010 sein.

Abb. 7-20: Potenziale der Wohngebäude und Nichtwohngebäude zur Bereitstellung von Minutenreserve bei unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Abb. 7-20 zeigt, dass die Wohngebäude ihren höchsten Deckungsbeitrag in der Variante Flex 3, also dem Notkühlereinsatz, liefern können. Die Nichtwohngebäude liegen dagegen in der Variante Flex 1, also der doppelten Anlagenleistung vorne. Diese Unterschiede lassen sich mit der Anlagenauslegung (vgl. Kapitel 5.3) erklären. Bei den Nichtwohngebäuden wurden die Anlagen mit einem geringerem Lastdeckungsanteil als bei den Wohngebäuden ausgelegt. Das heißt, dass die Nichtwohngebäude überproportional von einer Erhöhung der Leistung profitieren. Gleichzeitig wird bei diesem Vergleich aber auch deutlich, dass die Potenzialgewinne von Flexibilisierungsmaßnahmen stark von der Anlagenkonfiguration abhängen. Je nachdem, welcher Lastdeckungsgrad vorliegt und wie die Charakteristik der Wärmebedarfsganglinie ist, hat die eine oder die andere Flexibilisierungsoption einen größeren Einfluss auf das Minutenreservepotenzial. Die Vervierfachung des Speichers kommt aber in keiner der Anlagenkonfigurationen an das Potenzial der Flexibilisierungsoptionen eins und drei heran.

7.9 Zusammenfassung: Technische Potenziale der BHKW

Die Simulationen für netzgeführte BHKW zeigen, dass bei einer Anlagenverfügbarkeit von 90 % im Jahresmittel etwa bis zu 68 % der in Wohngebäuden installierten elektrischen Leistung als Regelleistung verfügbar. Die volle verfügbare Anlagenleistung kann über einen Zeitraum von etwa 3.300 Stunden im Jahr angeboten werden, während zu jedem Zeitpunkt im Jahr mindestens etwa 10 % der installierten Anlagenleistung als Regelleistung verfügbar ist. Die Charakteristik der Regelleistungsbereitstellung aus BHKW in Nichtwohngebäuden ähnelt der der Wohngebäude stark. Hier können im Jahresmittel etwa bis zu 71 % der verfügbaren Anlagenleistung als Regelleistung bereitgestellt werden. Aufgrund der hohen installierten Leistungen in diesem Segment sind die absoluten Beiträge jedoch signifikant höher als die des Wohngebäudesektors.

Für die exemplarisch untersuchte Wärmenetz-BHKW wird eine mittlere Regelleistungsverfügbarkeit von etwa 82 % im Jahr erreicht. Dieser Wert liegt höher als bei Wohn- und Nichtwohngebäuden, da für die Wärmenetz-Anlagen eine 100 %-ige Anlagenverfügbarkeit angenommen wurde. Die Charakteristiken des Wärmebedarfsprofils sowie des Regelleistungsprofils entsprechen aber weitgehend denen der betrachteten Wohn- und Nichtwohngebäudefälle.

Für die beispielhafte industrielle BHKW-Anlage wurde eine mittlere Regelleistungsverfügbarkeit von etwa 71 % der Anlagenleistung errechnet. Auch hier wurde kein Abschlag für die Anlagenverfügbarkeit vorgenommen, da es sich um eine Einzelanlage handelt. Das im Vergleich zum Wärmenetz deutlich kleinere Regelleistungsangebot lässt sich mit der stark schwankenden Charakteristik des Wärmelastprofils erklären.

Allen Versorgungsobjekten ist gemein, dass der sinkende Wärmebedarf im Sommer das Angebot an Minutenreserve stark limitiert. Während im Winter häufig die volle Anlagenleistung als Minutenreserve bereitgestellt werden kann, bricht das Regelleistungsangebot im Sommer stark ein.

Aus der Hochrechnung der objektbezogenen Ergebnisse mittels der EE-Langfristszenarien 2011 für den Wohn- und Nichtwohngebäudebereich folgt, dass die dort installierten BHKW etwa bis zu 7 % der insgesamt angebotenen Regelleistung im Jahr 2010 hätten bereitstellen können. Unter der Annahme eines unveränderten Regelleistungsmarktes und der Entwicklung des Anlagenparks gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 könnten im Jahr 2020 (2030) etwa bis zu 42 % (54 %) des Minutenreservemarktes durch BHKW abgedeckt werden. Zusätzlich bestehen weitere Potenziale in der Industrie und in Wärmenetzen, die hier jedoch nur exemplarisch berechnet wurden und dementsprechend nicht für ein Gesamtpotenzial berücksichtigt werden können.

Ferner wurde der Einfluss folgender verschiedener Flexibilisierungsoptionen auf das Potenzial untersucht: die Verdoppelung der Anlagengröße (Flex-1), die Vervierfachung des Speichervolumens (Flex-2) und der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3). Alle drei Optionen können das BHKW-Potenzial für die Bereitstellung von Minutenreserve signifikant steigern. Ein zusätzlicher Kosten-Nutzen-Vergleich zeigt, dass in den exemplarisch untersuchten Objekten die Vergrößerung des Speichers (Flex-2) die geringsten Kosten pro zusätzlich generierte Regelleistung aufweist. Doch je nach Anlagenkonfiguration können die Optionen Flex-1 und Flex-3 ähnlich geringe Kosten wie Flex-2 erreichen.

8 CO₂-Emissionen von BHKW mit und ohne Teilnahme am Minutenreservemarkt

8.1 CO₂-Bilanzierungs- und Allokations-Methode und Referenz-System

Durch die Abkehr von einer rein wärmegeführten hin zu einer netzgeführten oder flexibilisierten BHKW-Betriebsstrategie verändern sich die Verhältnisse der produzierten Energiemengen für Wärme und Strom. So kommt es zu Verschiebungen sowohl in den Anteilen „Wärme aus KWK zu Spitzenlastkessel“ als auch in den Anteilen „Strom aus KWK zu Netzbezug“. Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für gekoppelte und ungekoppelte Wärme- und Stromproduktion führen diese Verschiebungen zu abweichenden CO₂-Emissionen der BHKW-Systeme. Diese Veränderungen werden nachfolgend für ausgewählte Fälle aus den Bereichen Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Wärmenetze und Industrie analysiert.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist dabei wie folgt:

1. Berechnung der Primärenergieeinsparung für ausgewählte Modellfälle vs. ungekoppelte Erzeugung und Allokation der spezifischen CO₂-Emissionen auf die Koppelprodukte Strom und Wärme.
2. Berechnung der absoluten CO₂-Emissionen pro Versorgungsobjekt in kg/a und Vergleich der Betriebsweisen „ungekoppelt“, „wärmegeführt“, „netzgeführt“ und „flexibilisiert“.
3. Hochskalierung der CO₂-Emissionen in t/a mit den KWK-Mengengerüsten nach den EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) für die Jahre 2010, 2020 und 2030.

Für die energetische, ökologische oder ökonomische Bewertung einer gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme ist es erforderlich, Energie, Emissionen oder Kosten auf die beiden Koppelprodukte aufzuteilen (Allokationsmethoden) bzw. gutzuschreiben (Gutschriftmethode).

Im Folgenden wird das hier angewandte Verfahren, die sog. Finnische Allokationsmethode, erläutert und das zu Grunde gelegte Referenzsystem definiert.

8.1.1 Finnische Allokationsmethode zur Bilanzierung der wärme- und strombedingten CO₂-Emissionen

Die wichtigsten Allokationsmethoden, die im Zusammenhang mit der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Strom angewandt werden, sind die

- Wirkungsgradmethode
- IEA-Methode (Energetische Methode)
- Gutschriftmethode (Substitutionsmethode)
- Exergiemethode sowie
- Finnische Methode.

Vertiefende Abhandlungen zu Allokationsmethoden finden sich u.a. in (Mauch et al. o. J.), (Ebert et al. 2010), (Dittmann et al. 2009), (VDI 2008), (Arndt 2008), (Fritsche und Rausch 2008) und (VIK 2006).

Im Rahmen dieser Studie wird die Finnische Methode verwendet, da sie einerseits (anders als beispielsweise die Gutschriftmethode) kein Koppelprodukt bevorzugt, andererseits jedoch (anders als beispielsweise die Wirkungsgrad-, IEA- oder Exergiemethode) Referenzsysteme und Referenzbrennstoffe berücksichtigt. Im Vergleich mit der Gutschriftmethode entfällt das Problem, dass sich für das ausgekoppelte Nebenprodukt bilanztechnisch sehr niedrige oder gar negative Emissionen ergeben können. Zusätzlich zur Allokation erhält man als Zwischenergebnis die Primärenergieeinsparung gegenüber dem ungekoppelten Referenzsystem. Ein weiterer Vorteil der finnischen Methode ist die Kompatibilität zur EU-KWK-Richtlinie 2004/8/EG ist (EU 2004). Nach der EU-Richtlinie sind jedoch europaweit einheitliche Referenzwirkungsgrade für die Strom- und Wärmeerzeugung vorgeschrieben. Dies hat zur Folge, dass z. B. der tabellierte elektrische Referenzwirkungsgrad für ein GuD-Kraftwerk mit rund 53 % für deutsche Verhältnisse relativ gering ausfällt. Zum Vergleich: Das GuD-Kraftwerk mit dem höchsten elektrischen Wirkungsgrad steht in Irsching und hat eine Effizienz von $\eta_{el} \approx 60 \%$. Auch der Referenzwirkungsgrad der Wärmeerzeugung entspricht mit 90 % nicht der in Deutschland vorwiegend verwendeten Brennwertechnologie. Im Ergebnis fällt daher die ermittelte Primärenergie- und CO_2 -Einsparung insgesamt zu hoch aus.

Bei der Finnischen Methode wird zunächst mit Hilfe der thermischen und elektrischen Wirkungsgrade η_{th} und η_{el} die Primärenergieeinsparung PEE gegenüber einem ungekoppelten Referenzsystem (siehe Kapitel 8.1.2) nach folgender Vorschrift berechnet (vgl. VIK 2006):

$$PEE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,Ref}}}$$

Formel 6: Primärenergieeinsparung nach der finnischen Methode

Aus der PEE wird mit folgenden Formeln der Brennstoffbedarf für den Strom

$$W_{Br,el} = W_{Br} \cdot (1 - PEE) \cdot \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,Ref}} = W_{Br} - W_{Br,th}$$

Formel 7: Brennstoffbedarf für den Strom

bzw. analog der komplementäre Brennstoffbedarf für die Wärme

$$W_{Br,th} = W_{Br} \cdot (1 - PEE) \cdot \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,Ref}} = W_{Br} - W_{Br,el}$$

Formel 8: Brennstoffbedarf für die Wärme

hergeleitet. Darin kennzeichnet W_{Br} den gesamten Brennstoffbedarf für den KWK-Prozess. Die absoluten CO_2 -Emissionen für Strom und Wärme ergeben sich mit Hilfe des spezifischen Brennstoff-Emissionsfaktors $CO_{2,Br,spez.}$ (in kg_{CO_2}/kWh_{Br}) zu

$$\text{CO}_{2,el,abs} = \text{CO}_{2,Br,spez} \cdot W_{Br,el} \text{ bzw. } \text{CO}_{2,th,abs} = \text{CO}_{2,Br,spez} \cdot W_{Br,th}$$

Formel 9: absolute CO₂-Emissionen

Teilt man die absoluten Werte durch die erzeugte Strom- bzw. Wärmemenge, erhält man die spezifischen CO₂-Emissionen der KWK-Anlage in kg_{CO2}/kWh_{el} bzw. kg_{CO2}/kWh_{th}:

$$\text{CO}_{2,el,spez} = \frac{\text{CO}_{2,el,abs}}{W_{el}} \text{ bzw. } \text{CO}_{2,th,spez} = \frac{\text{CO}_{2,th,abs}}{W_{th}}$$

Formel 10: spezifische CO₂-Emissionen

8.1.2 Ungekoppeltes Referenzsystem

Bei Anwendung der Finnischen Methode gemäß EU-KWK-Richtlinie 2004/8/EG sind die Referenzwerte nicht frei wählbar, sondern Bestandteil der Richtlinie (EU 2004). Im Unterschied zur Gutschriftmethode orientiert sich demnach der Brennstoff des Referenzsystems am Brennstoff der KWK-Anlage. Die brennstoffspezifischen Referenzwirkungsgrade können aus dem Durchführungsbeschluss der europäischen Kommission (EU 2011) Anhang I (für Strom) bzw. Anhang II (für Wärme) entnommen werden.⁴⁰ Anhang III beschreibt die notwendige Korrektur der Strom-Referenzwirkungsgrade abhängig von den durchschnittlichen klimatischen Bedingungen nach folgender Vorschrift:

- a) Herabsetzung des Wirkungsgrades um 0,1 Prozentpunkte für jedes Grad Celsius über 15 °C;
- b) Heraufsetzung des Wirkungsgrades um 0,1 Prozentpunkte für jedes Grad Celsius unter 15 °C.

Außerdem wird der Strom-Referenzwirkungsgrad abhängig von der Netzspannungsebene, in welcher die KWK-Anlage angeschlossen ist, sowie abhängig vom Anteil des eingespeisten bzw. selbst vor Ort verbrauchten Stroms über einen Korrekturfaktor $f_{\text{Korr, Netzverluste}} (\leq 1)$ weiter abgesenkt:

$$\eta_{el, Ref, korr} = \eta_{el, Ref} \cdot f_{\text{Korr, Netzverluste}}$$

Formel 11: Strom-Referenzwirkungsgrad

Der Korrekturfaktor für vermiedene Netzverluste berechnet sich mit den Werten aus Tab. 8-1 zu:

⁴⁰ Der Durchführungsbeschluss (EU 2011) löst die bis dahin bestehende Entscheidung der europäischen Kommission ab.

$$f_{\text{Korr, Netzverluste}} = f_{\text{Korr, Einspeisung}} \cdot \text{Anteil}_{\text{Einspeisung}} + f_{\text{Korr, Eigenverbrauch}} \cdot \text{Anteil}_{\text{Eigenverbrauch}}$$

Formel 12: Korrekturfaktor für vermiedene Netzverluste

Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass KWK-Anlagen bei dezentraler Einspeisung und insbesondere bei hohen Anteilen selbst verbrauchten Stroms Netzverluste vermeiden.

Tab. 8-1: Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme

Netzspannung	ins Netz einspeister Strom $f_{\text{Korr, Einspeisung}}$	vor Ort verbraucher Strom $f_{\text{Korr, Eigenverbrauch}}$
> 200 kV	1,000	0,985
100-200 kV	0,985	0,965
50-100 kV	0,965	0,945
0,4-50 kV	0,945	0,925
< 0,4 kV	0,925	0,860

Quelle: (EU 2011) (Anhang IV)

Für alle betrachteten Anwendungsfälle wird in dieser Studie als Referenz für die Stromerzeugung ein Erdgas-GuD-Kraftwerk (tabellierter Referenzwirkungsgrad: 52,5 %, klimakorrigiert⁴¹: 53,2 %) und als Referenz für die Wärmeerzeugung ein Erdgas-Kessel (tabellierter Referenzwirkungsgrad: 90 %) verwendet. Je nach Netzspannungsebene und Eigenstromanteil verringert sich im jeweiligen Anwendungsfall jedoch der klimakorrigierte elektrische Referenzwirkungsgrad entsprechend.⁴² Die Tab. 8-2 fasst diesbezüglich die getroffenen Annahmen und resultierenden Referenzwerte zusammen.

41 Die Jahresdurchschnittstemperatur für Deutschland wurde mit 8,2°C angenommen (Mittelwert zwischen 1961–1990).

42 Für die Jahre 2020 und 2030 wurden keine Wirkungsgradsteigerungen bzw. Veränderungen der SKZ angenommen, weder für die BHKW noch für die Referenzanlagen, da die zukünftige technische Entwicklung sowohl bei den KWK-Anlagen als auch bei den Referenzanlagen unsicher ist. Es handelt sich daher diesbezüglich um eine statische und eher konservative Betrachtung.

Tab. 8-2: Annahmen zu Netzanschluss und elektrischen Eigenverbrauchsanteilen der BHKW sowie resultierende Referenzwerte für Wirkungsgrade und Emissionsfaktoren der ungekoppelten Erzeugung

	Wohn- und Nichtwohngebäudetypen 3, 5 u. 6	Nichtwohngebäude-typen 1 u. 2	Wärmenetz	Industrie
Spannungsebene	< 0,4 kV	0,4-50 kV		< 0,4 kV
Eigenverbrauchsanteil Strom	60 %		0 %	60 %
Korrekturfaktor vermiedene Netzverluste	0,886	0,933	0,945	0,886
Referenzwirkungsgrad Strom	47,1 %	49,6 %	50,3 %	47,1 %
Referenzwirkungsgrad Wärme	90 %			
Spez. Emissionsfaktor Strom	428 gCO ₂ /kWh _{el}	406 gCO ₂ /kWh _{el}	401 gCO ₂ /kWh _{el}	428 gCO ₂ /kWh _{el}
Spez. Emissionsfaktor Wärme	224 gCO ₂ /kWh _{th}			

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

Als spezifischer Brennstoff-Emissionsfaktor $CO_{2,Br,spez.}$ wird für Erdgas 0,202 kg_{CO₂}/kWh_{Br} verwendet. Durch den Ansatz, als Referenzsysteme relativ energieeffiziente und CO₂-arme Systeme auf Erdgasbasis anzunehmen, fallen die nachfolgenden CO₂-Emissionsanalysen für die betrachteten KWK-Anlagen konservativ aus.

8.2 CO₂-Emissionen für unterschiedliche BHKW-Betriebsweisen und -Auslegungen

Wie bereits erläutert, führt eine Veränderung der üblicherweise wärmegeführten KWK-Betriebsweise hin zu einer Fahrweise mit Teilnahme am Minutenreservemarkt zu einer Veränderung der Energieproportionen⁴³ und infolgedessen auch der CO₂-Emissionen. Um diese Emissionsänderungen zu beschreiben, werden im Folgenden jeweils die Fahrweisen *mit* Teilnahme am Minutenreservemarkt (netzgeführte sowie flexibilisierte Varianten 1, 2 und 3) denjenigen *ohne* Teilnahme (wärmegeführte Variante) sowie der ungekoppelten Strom- und Wärmeproduktion im Referenzsystem gegenübergestellt. Aus Gründen der besseren Übersicht wird in einigen Abbildungen auf die Darstellung der flexibilisierten Varianten 1 (doppelte Anlagengröße) und 2 (vierfache Speichergröße) verzichtet und nur die Notkühler-Variante (Flex3) gezeigt. Da die Notkühler-Variante i. d. R. die höchsten CO₂-Emissionen aller betrachteten Betriebsweisen aufweist, ist sichergestellt, dass die gesamte Bandbreite der Emissionen dargestellt ist.

⁴³ Bei der Wärme die Anteile aus BHKW und Spitzenlastkessel sowie beim Strom die Eigenverbrauchsanteile.

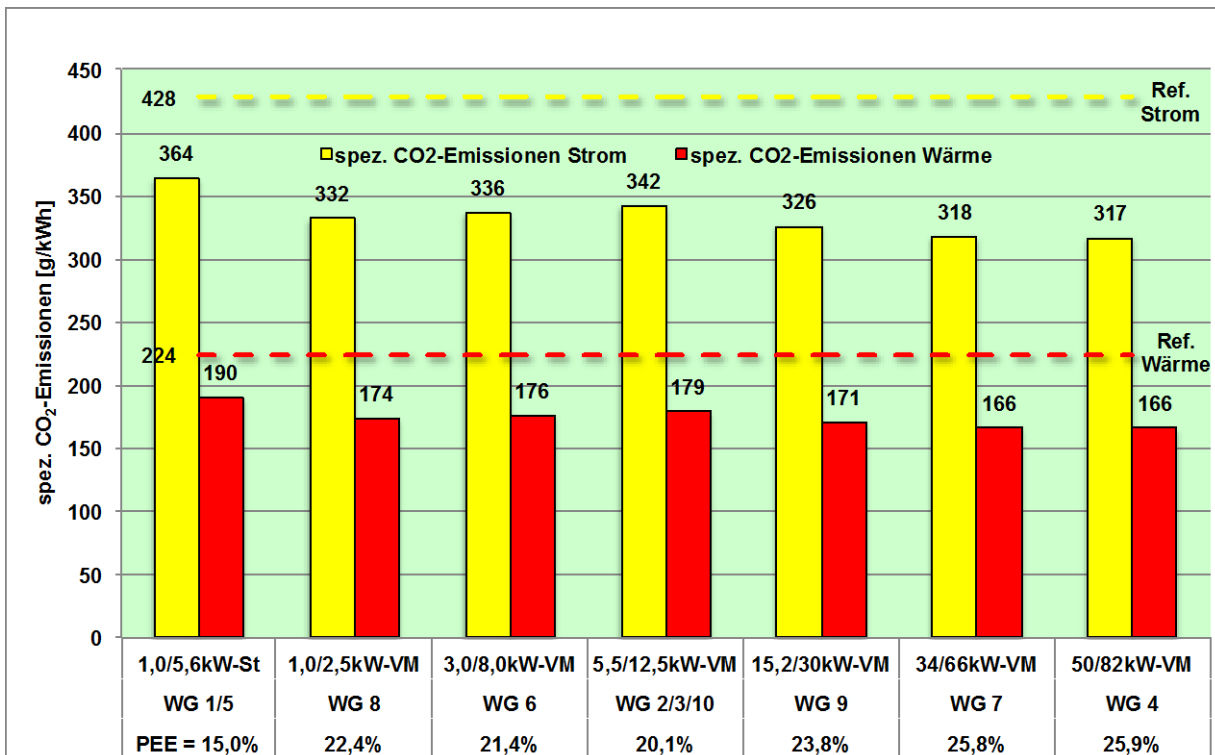
Als Basis für die bereitzustellenden Jahresenergiemengen werden jeweils die produzierten Strom- und Wärmemengen aus dem KWK-Betrieb der wärmegeführten Variante herangezogen. Das bedeutet, dass z. B. bei verringerter Energieerzeugung aus KWK (z. B. durch zeitweises Abschalten der KWK-Anlage zur Vorhaltung von positiver Minutenreserve) die residualen Strom- und Wärmemengen aus dem Netz bzw. dem Spitzenlastkessel bereitgestellt werden. In den seltenen Fällen, in denen mehr KWK-Strom als in der wärmegeführten Basisvariante produziert wird – dies betrifft lediglich einen Fall bei den Wohngebäuden (Flex3 in WG1) - erfolgt eine Strom- bzw. CO₂-Gutschrift.

8.2.1 Wohngebäude

Die Auswahl der zehn repräsentativen und für KWK-Anwendung geeigneten Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10 wurde in Kapitel 5.2.3 beschrieben. Die Zuordnung geeigneter BHKW-Module ist in Kapitel 5.3.1 dokumentiert. Dabei ist zu beachten, dass die Auslegung entsprechend heutiger Praxis für den wärmegeführten Betrieb vorgenommen wurde. Die für die Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Annahmen und Parameter sind Tab. 8-2 zu entnehmen.

Die Ergebnisse der CO₂-Allokationsberechnungen (Abb. 8-1) zeigen, dass selbst bei dem hier vorgenommenem Vergleich mit einem GuD-Referenzkraftwerk (+ Erdgaskessel) alle BHKW-Systeme sowohl primärenergetisch als auch bei den CO₂-Emissionen für Strom und Wärme vorteilhafter sind als in der ungekoppelten Erzeugung. Die Primärenergieeinsparungen (PEE) betragen je nach Modul zwischen 15 und 26 %. Die spezifischen CO₂-Emissionswerte für Strom liegen in einer Bandbreite von 317 bis 364 g_{CO2}/kWh_{el}, die für Wärme zwischen 166 bis 190 g_{CO2}/kWh_{th}. Größere Aggregate weisen aufgrund ihrer i. d. R. höheren elektrischen Wirkungsgrade bessere Werte auf (siehe Abb. 8-1). Der Stirlingmotor (WG 1 und 5) schneidet im Vergleich zum Verbrennungsmotor (WG 8) trotz gleicher elektrischer Leistung von 1 kW_{el} aufgrund seines niedrigen elektrischer Wirkungsgrad von nur 14,1 % gegenüber 26,3 % beim konventionellen Verbrennungsmotor deutlich schlechter ab.

Abb. 8-1: Spezifische direkte CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der sieben ausgewählten KWK-Module für die zehn Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10 (finnische Methode η_{el} , Ref, korrt. = 47,1 % / $\eta_{th, Ref}$ = 90,0 %)



Anmerkungen: aufsteigend sortiert nach elektrischer Anlagengröße, St: Stirling, VM: Verbrennungsmotor

Quelle: Eigene Berechnungen

Für die Flex3-Variante (Einsatz eines Notkühlers) muss mit angepassten spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für den in der BHKW-Anlage produzierten Strom gerechnet werden. Die veränderten Emissionsfaktoren ergeben sich, indem bei der CO₂-Allokationsberechnung der thermische Wirkungsgrad der KWK-Anlage auf Null gesetzt wird. Die Werte für die Wohngebäude-BHKW sind in Tab. 8-3 dokumentiert. Wie zu erkennen ist, erhöhen sich die spezifischen CO₂-Emissionswerte durch den Gebrauch des Notkühlers um rund 90 % bis 290 % gegenüber dem KWK-Betrieb und um rund 40 % bis 230 % gegenüber dem Netzstrombezug.

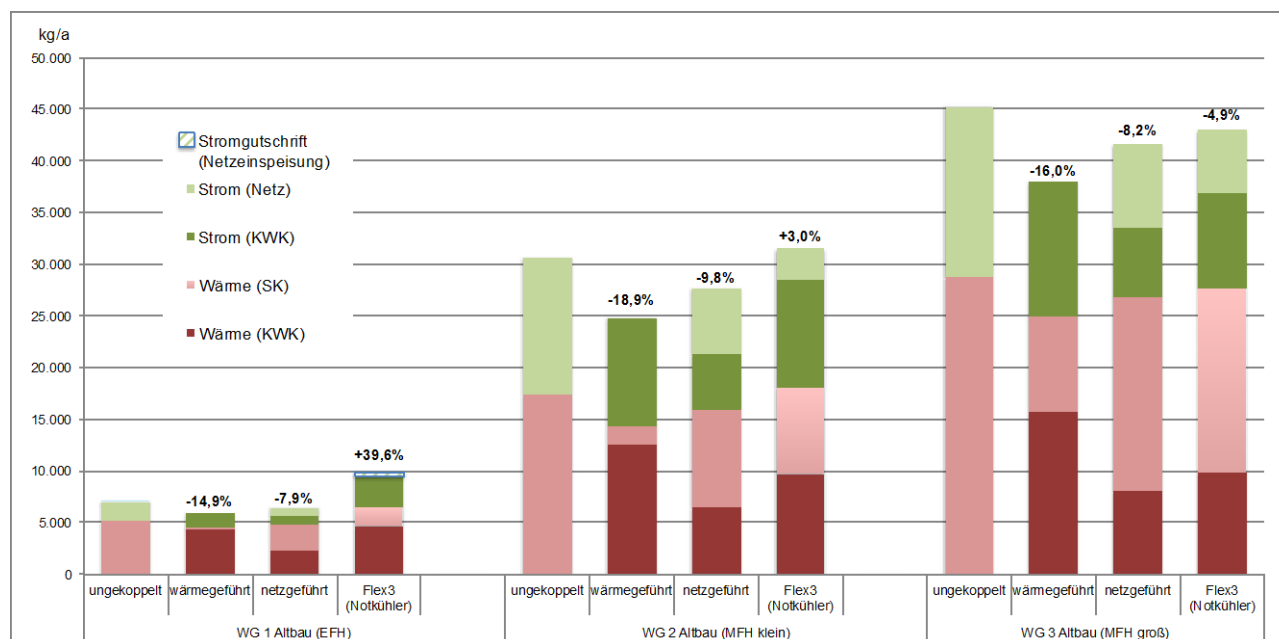
Tab. 8-3: Spezifische direkte CO₂-Emissionen in g_{CO2}/kWh_{el} der Stromerzeugung in BHKW-Anlagen für Wohngebäude (WG) bei Einsatz des Notkühlers (Flexibilisierung 3-Variante mit η_{th} = 0 %)

WG-Typ	WG 1	WG 2	WG 3	WG 4	WG 5	WG 6	WG 7	WG 8	WG 9	WG 10
spez. CO ₂ -Emissionen Strom mit Notkühler [gCO ₂ /kWh _{el}]	1.430	747	747	589	1.430	806	640	767	663	747
Mehremissionen vs. KWK-Betrieb [%]	293	118	118	86	293	140	102	131	103	118
Mehremissionen vs. Strombezug [%]	234	75	75	38	234	88	50	79	55	75

Quelle: eigene Berechnungen

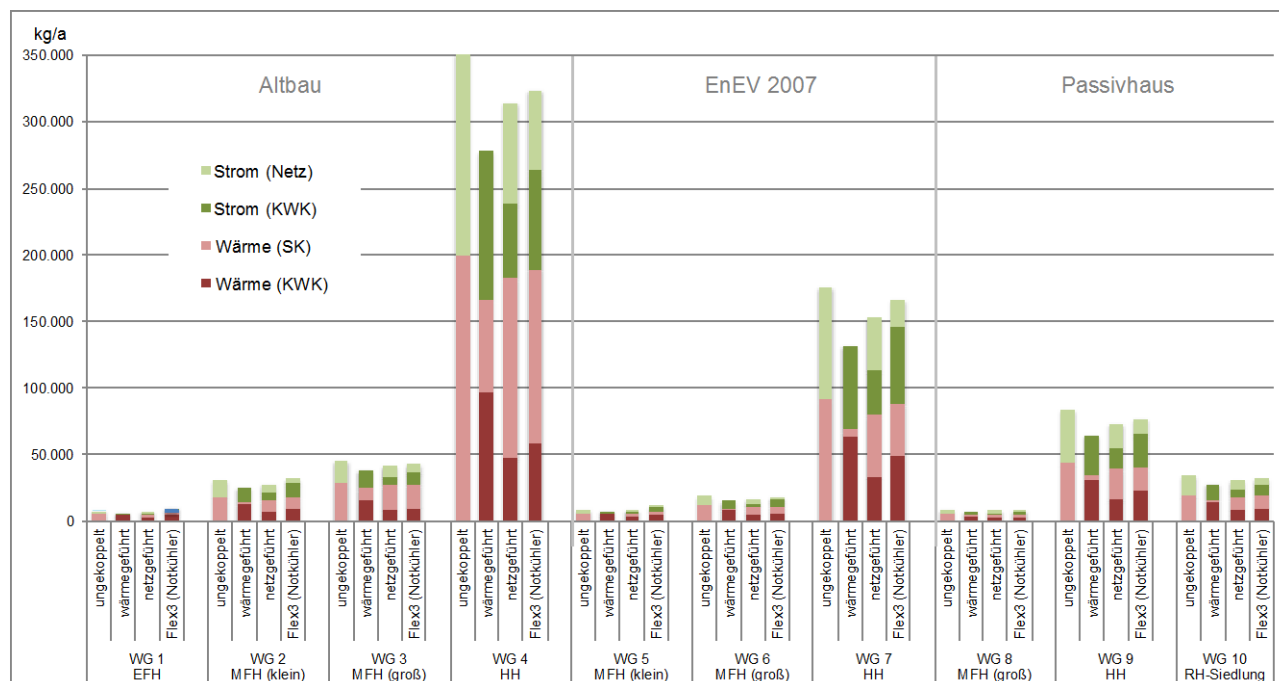
Auf Basis der in Abb. 8-1 und Tab. 8-3 dokumentierten spezifischen CO₂-Emissionswerte werden mit Hilfe der Energiemengen aus den Simulationsrechnungen die jährlichen absoluten CO₂-Emissionen für die zehn Wohngebäudetypen berechnet. In Abb. 8-2 (Fokus auf Altbauvarianten WG 1 bis 3) und Abb. 8-3 (alle WG) sind die CO₂-Emissionen, differenziert nach ihren Anteilen KWK-Wärme, KWK-Strom, Wärme aus Spitzenlastkessel und Strom aus Netz, dargestellt.

Abb. 8-2: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 3 auf Objektebene



Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 8-3: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG1 bis WG10 auf Objektebene



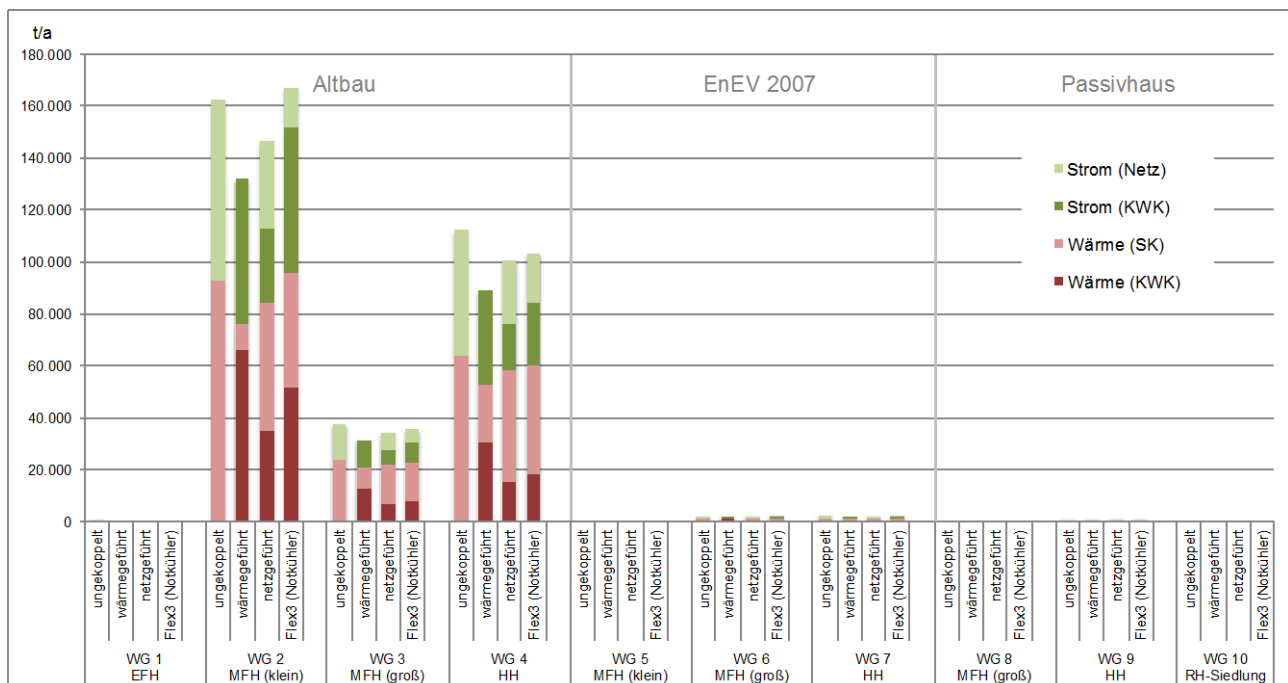
Quelle: Eigene Berechnungen

Zu erkennen ist, dass die CO₂-Emissionen beim Wechsel der Betriebsweise von wärme- auf netzgeführten bzw. flexibilisierten Betrieb (hier: Variante „Notkühler“) ansteigen. Die Einsparungen vs. ungekoppelter Erzeugung verringern sich bzw. wechseln in WG 1, WG 2 und WG 5 sogar das Vorzeichen hin zu Mehremissionen. Die Zunahme fällt je nach Gebäudetyp, KWK-Lastanteil und SKZ des KWK-Moduls unterschiedlich aus, begründet im abnehmendem KWK-Betrieb (dunkelrote Balken), der durch einen zunehmenden Spitzenlastkessel-Betrieb (hellrot) und zusätzlichen Strombezug aus dem Netz (hellgrün) mit entsprechend höheren spezifischen CO₂-Emissionen kompensiert werden muss. In der Flex3-Variante wird zusätzlich noch KWK-Wärme über den Notkühler geleitet.

Auf Objektebene sind die absoluten Emissionen der Hochhaus-BHKW (WG 4, 7 und 9 in Abb. 8-3) dominant gegenüber den übrigen WG-Typen, da dort die Wärmebedarfe deutlich höher liegen. Ebenso liegen der Wärmebedarf und die Emissionen der Altbau-Wohngebäude (WG 1 bis 4) jeweils auf deutlich höherem Niveau als die der EnEV- (WG 5 bis 7) und PH-Wohngebäude (WG 8 bis 10).

Im nächsten Schritt werden die objektbezogenen CO₂-Emissionen entsprechend dem den einzelnen Nutzungen zugeordneten KWK-Mengengerüst der EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) für die Jahre 2010, 2020 und 2030 hochskaliert. In den Abb. 8-4, Abb. 8-5 und Abb. 8-6 sind die aggregierten CO₂-Emissionen für die drei Stützjahre dargestellt.

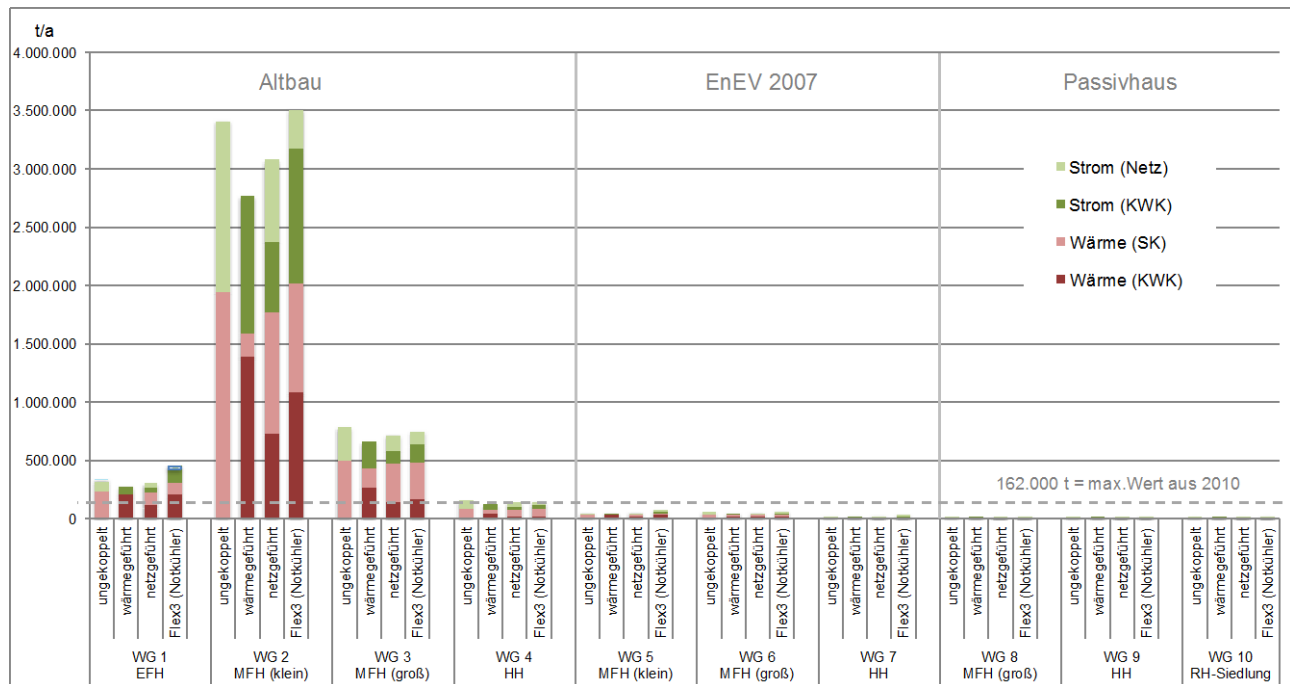
Abb. 8-4: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2010



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Jahr 2010 ist nur im Altbaubereich (WG 2 bis 4) mit nennenswerten CO₂-Emissionen aus BHKW zu rechnen. Die größten jährlichen Emissionen liegen beim kleinen MFH (0,132 bis 0,167 Mio. t_{CO2} je nach Betriebsweise), gefolgt vom Hochhaus (0,089 bis 0,103 Mio. t_{CO2}) und großen MFH (0,031 bis 0,035 Mio. t_{CO2}).

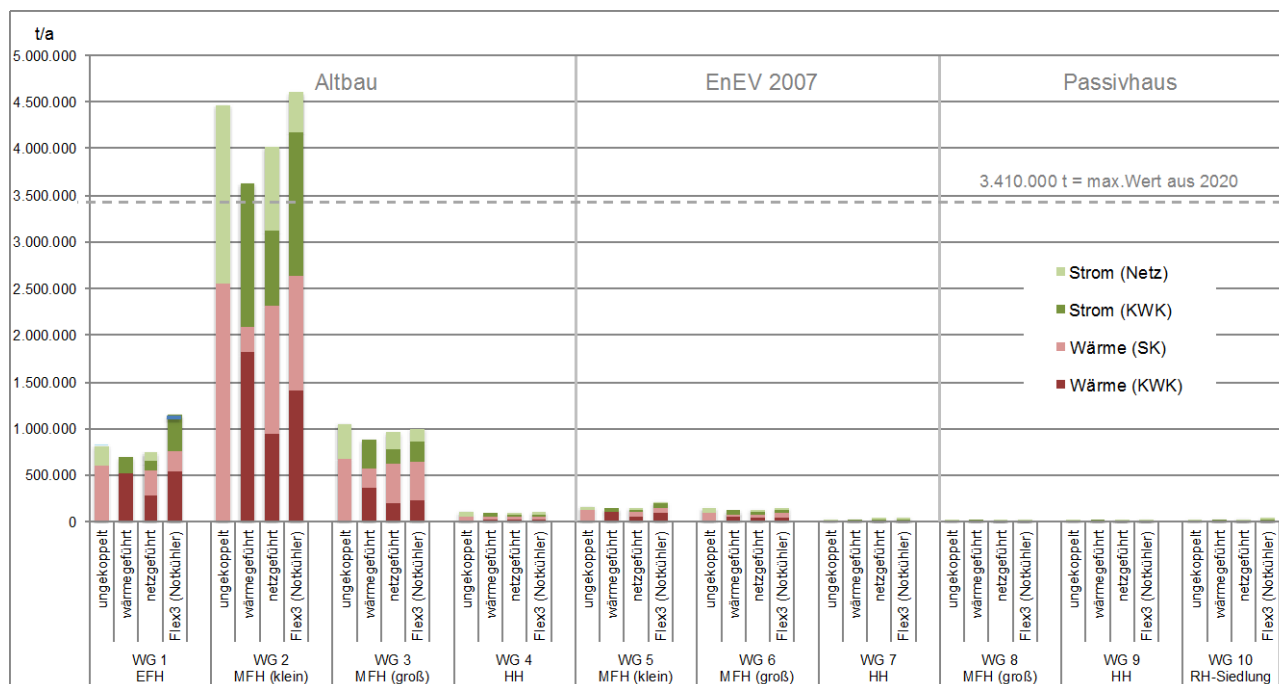
Abb. 8-5: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnungen

Bis zum Jahr 2020 erhöhen sich die KWK-Anwendungspotenziale (und somit deren Emissionen) gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 und den eigenen Annahmen zur Zuordnung von Wohngebäudetypen (siehe Kapitel 5.3.1) zum Mengengerüst erheblich. Der WG-Typ „Altbau MFH (klein)“ bleibt der dominierende KWK-Anwendungstyp, seine CO₂-Emissionen wachsen um den Faktor 21 auf 2,77 bis 3,51 Mio. t_{CO2}. An zweiter Stelle wird das WG 4 „Altbau HH“ vom WG-Typ „Altbau MFH (groß)“ mit 0,66 bis 0,75 Mio. t_{CO2} abgelöst. Kleine KWK-Anlagen erschließen nun auch Einfamilienhäuser, vorwiegend im Altbau (WG1).

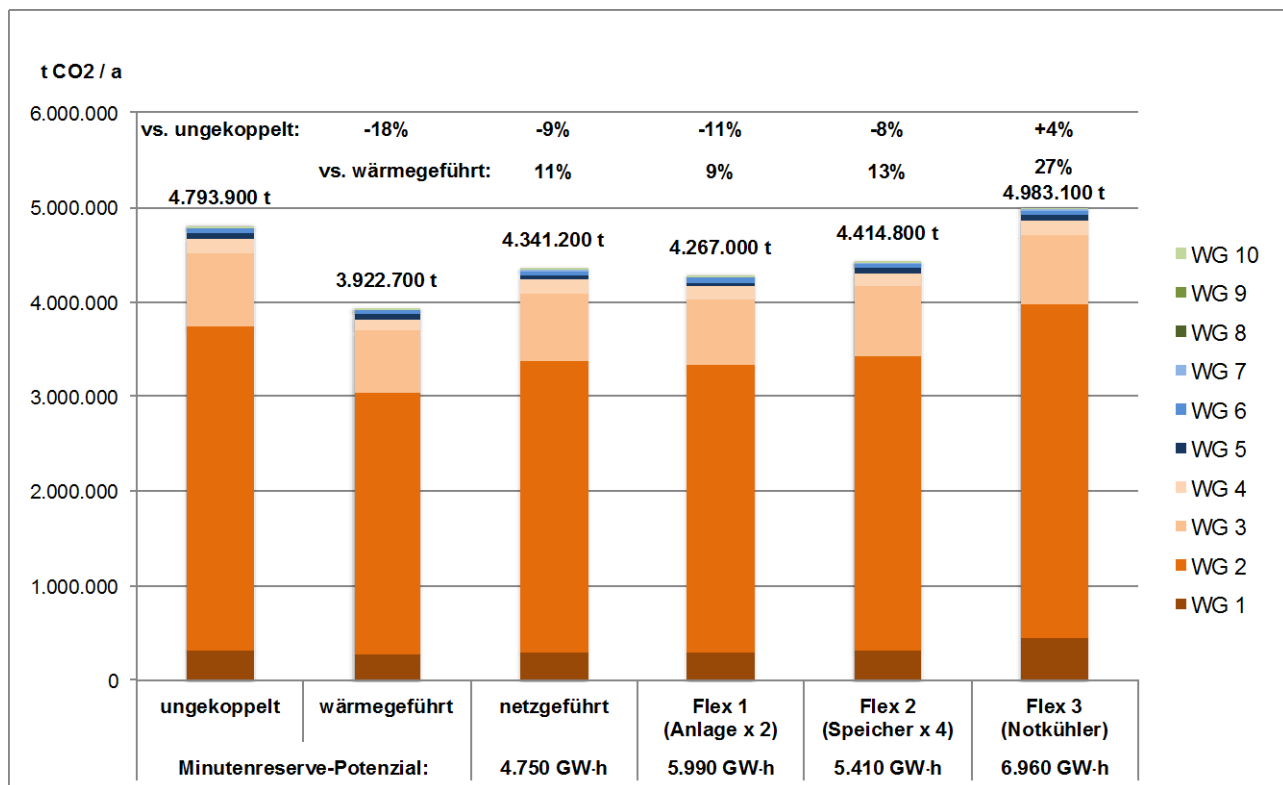
Abb. 8-6: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für Wohngebäudetypen WG 1 bis WG 10, aggregiert für das Jahr 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Entsprechend den Annahmen aus der Leitstudie findet bis 2030 ein moderates weiteres Wachstum des BHKW-Ausbaus und somit der CO₂-Emissionen statt, das jedoch gegenüber dem Zeitraum bis 2020 gebremst ist. Der WG-Typ 1 gewinnt dabei weiter an Bedeutung: Seine Emissionen wachsen von 0,28 bis 0,45 Mio. t im Jahr 2020 auf 0,69 bis 1,13 Mio. t. Kleine und große MFH nach EnEV 2007 (Typ 5 und 6) werden nun ebenfalls verstärkt erschlossen und übertreffen nun deutlich die Emissionen der EnEV-Hochhäuser (Typ 4). In Abb. 8-7 sind die Emissionen beispielhaft für das Jahr 2020 aus den jeweiligen Wohngebäudetypen aufsummiert dargestellt.

Abb. 8-7: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für Wohngebäudetypen WG 1 bis 10, aggregiert für das Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnungen

Die über alle geeigneten Wohngebäudetypen aufsummierten CO₂-Emissionen liegen im Jahr 2020 bei minimal 3,92 Mio. t (Basisfall wärmegeführte Betriebsweise) und maximal bei 4,79 Mio. t (ungekoppelte Referenz). Gegenüber dem wärmegeführten Betrieb erhöhen sich die Emissionen um 9 % (flexibilisiert mit doppelter Anlagengröße) bis 27 % (flexibilisiert mit Notkühler). Gegenüber der ungekoppelten Referenz reduzieren sich die CO₂-Einsparungen der BHKWs mit Minutenreserve-Bereitstellung von 18 % (wärmegeführt) auf 11 % im günstigsten Fall (Flex 1). Im ungünstigsten Fall (Flex 3) resultieren jedoch gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung um 4 % erhöhte Emissionen.

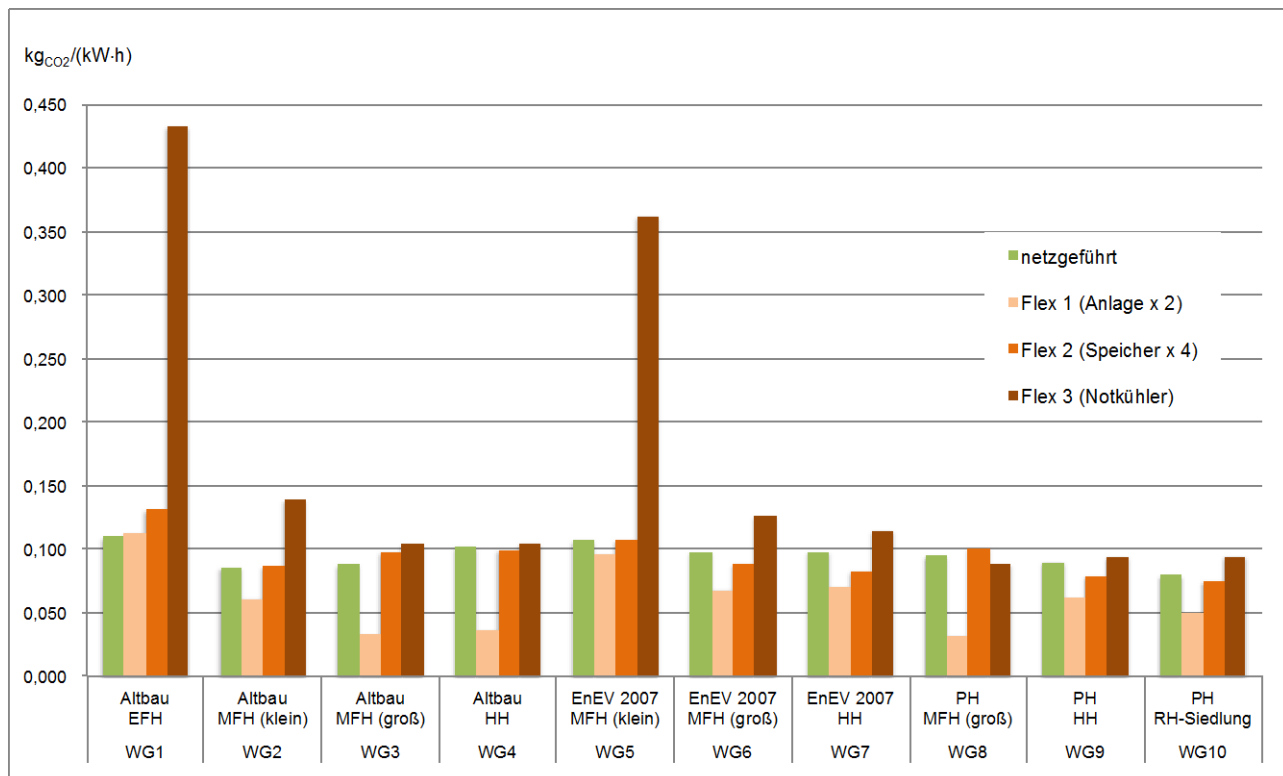
Etwa 97,5 % der Emissionen entfallen auf den Altbau (Typ 1 bis 4), 2,5 % auf die EnEV-2009-Gebäude (Typ 5 bis 7) und nur 0,05 % auf die PH-Gebäude (Typ 8 bis 10). Dies liegt zum einen an der geringen Anzahl von Wohngebäuden mit gehobenem energetischem Standard, die für eine KWK-Anwendung in Betracht kommen (vgl. Tab. 5-7). Zum anderen sind die absoluten CO₂-Emissionen pro Objekt beim EnEV-Haus um den Faktor 2,6 und beim Passivhaus sogar um den Faktor 5,6 niedriger als beim Altbau (Bsp. WG 4 „großes MFH“).

In Abb. 8-7 sind neben den CO₂-Emissionen auch das Minutenreservepotenzial angegeben. Legt man den Fokus auf möglichst geringe CO₂-Emissionen, so ist die Auslegung mit doppelter Anlagengröße (Flex1) die günstige Variante, da ein relativ großes Regelleistungspotenzial von rund 6.000 GW·h bei moderater Erhöhung der CO₂-Emissionen (um 9 %) erzielt werden kann. Bei einem Fokus auf maximale Bereitstellung von Regelleistung schneidet die Variante mit Notkühler (Flex3) mit rund 7.000 GW·h am besten ab, wobei jedoch eine Erhöhung der CO₂-Emissionen um mehr als ein Viertel (27 %) resultiert. Der geringste investive Aufwand fällt bei der netzgeführten Variante an, da weder Kosten für ein größeres Modul, noch für einen

größeren Speicher oder einen Notkühler aufgewendet werden müssen. Allerdings fällt hier das Minutenreserve-Potenzial mit rund 4.800 GW · h am geringsten aus.

In Abb. 8-8 sind für jeden Wohngebäudetyp WG 1 bis 10 die gegenüber dem wärmegeführten Basisfall zusätzlich anfallenden CO₂-Emissionen bezogen auf den Nutzen (GW · h vorgehaltene Minutenreserve) aufgetragen. Durch diese Darstellungsweise kann das Verhältnis zwischen CO₂-Mehremissionen und Nutzen für jeden Wohngebäudetyp einzeln beurteilt werden.

Abb. 8-8: Spezifische CO₂-Mehremissionen (kg_{CO2} pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für Wohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt liegen alle spezifischen Emissionswerte unterhalb von 450 g_{CO2}/(kW · h), in 26 von 40 Fällen sogar unterhalb von 100 g_{CO2}/(kW · h). In 9 von 10 Fällen schneidet die Flex1-Variante (Verdoppelung der Anlagengröße) am besten ab, nur in WG 1 (113 g_{CO2}/(kW · h)) ist die netzgeführte Variante marginal (-2,3 %) besser. Besonders gering sind mit Werten zwischen 32 und 36 g_{CO2}/(kW · h) in den Fällen WG 3, 4 und 8. Die Flex1-Variante bietet somit das beste Verhältnis von Mehremission zu Regelleistungspotenzial, sie ist allerdings auch die Variante mit den höchsten investiven Kosten (vgl. dazu auch die Kosten-Nutzen-Analyse in Abschnitt 7.7.5).

Die Flex2-Variante (Vervielfachung der Speichergröße) liegt – wegen des geringeren Regelleistungspotenzials bei gleichzeitig höheren Speicherverlusten - in allen Fällen oberhalb der Flex1-Variante und mit Ausnahme von WG 8 (großes PH-MFH) jeweils unterhalb der Flex3-Variante. Perspektivisch wäre hier noch eine gewisse Verbesserung zu erwarten, sofern sich bessere Dämmkonzepte für Speicher am Markt durchsetzen.

Die Flex3-(Notkühler)-Varianten stellen sich - mit Ausnahme von WG 8, bei dem der Notkühler mit nur 309 kWh_{th}/a kaum zum Einsatz kommt, - schlechter als die netzgeführten Varianten

dar. In den Fällen WG1 ($433 \text{ g}_{\text{CO}_2}/(\text{kW} \cdot \text{h})$) und WG 5 ($362 \text{ g}_{\text{CO}_2}/(\text{kW} \cdot \text{h})$) liegen die Emissionen jedoch ungefähr dreimal so hoch wie in den anderen Wohngebäuden. Der Grund dafür ist die geringe SKZ des dort verwendeten 1 kW-Stirlingmotors, die zu übermäßig starkem Ableiten der KWK-Wärme über den Notkühler (28 % bzw. 21 %, s. Tab. 8-4) führt.

Tab. 8-4: Stromkennzahl und Anteil der Wärmeverluste über Notkühler bezogen auf die gesamte Wärme aus KWK-Modul und Spitzenlastkessel (Flex 3-Variante)

WG-Typ	WG 1	WG 2	WG 3	WG 4	WG 5	WG 6	WG 7	WG 8	WG 9	WG 10
Verlust über den Notkühler	28 %	15 %	4 %	5 %	21 %	10 %	13 %	1 %	8 %	7 %
SKZ	0,179	0,440	0,440	0,610	0,179	0,375	0,515	0,400	0,507	0,440

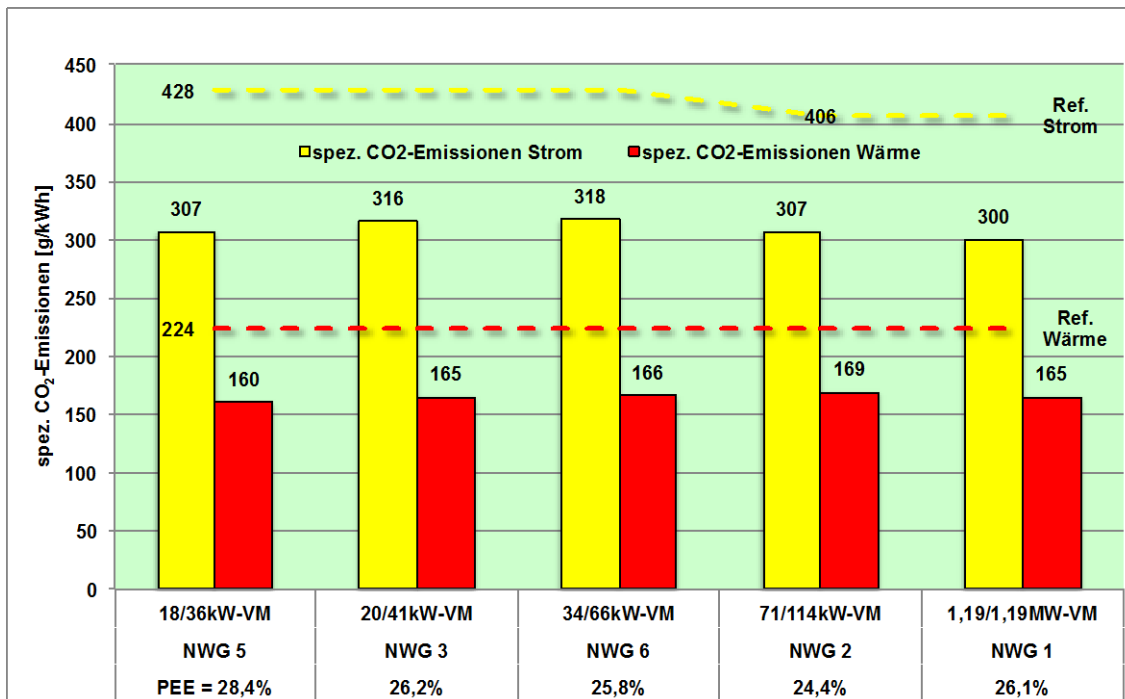
Quelle: eigene Annahmen und Berechnungen

8.2.2 Nichtwohngebäude

Die Auswahl der fünf repräsentativen und für KWK-Anwendung geeigneten NWG-Typen NWG 1, 2, 3, 5 und 6 wurde in Kapitel 0 beschrieben. Die Zuordnung geeigneter KWK-Module ist in Kapitel 5.3.2 dokumentiert. Die Basisauslegung wurde – derzeitiger Praxis entsprechend – wie bei den Wohngebäuden für den wärmegeführten Betrieb vorgenommen. Die für die Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Annahmen und Parameter können der Tab. 8-2 (S. 137) entnommen werden.

Die Ergebnisse der CO_2 -Allokationsberechnungen (Abb. 8-9) zeigen, dass die Primärenergieeinsparungen bei den NWG-Modulen mit 24 bis 28 % im Mittel deutlich höher ausfallen als bei den Wohngebäuden (15 bis 26 %, s. Abb. 8-1). Die spezifischen CO_2 -Emissionswerte für Strom liegen in einer Bandbreite von 300 bis $318 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$, die für Wärme zwischen 160 bis $169 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$. Im Vergleich zu den Wohngebäude-BHKW weisen die im Mittel größeren NWG-Aggregate aufgrund ihrer höheren elektrischen Wirkungsgrade insgesamt bessere Werte auf.

Abb. 8-9: Spezifische direkte CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der fünf ausgewählten KWK-Module für die fünf Gebäudetypen NWG 1 bis NWG 6 (finnische Methode $\eta_{el, Ref. kor.} = 47,1 - 49,6 \% / \eta_{th, Ref.} = 90,0 \%$)



Anmerkungen: aufsteigend sortiert nach elektrischer Anlagengröße, VM: Verbrennungsmotor

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie bei den Wohngebäuden (vgl. Tab. 8-3) muss auch bei den Nichtwohngebäuden für die Flex3-Variante (Einsatz eines Notkühlers) mit angepassten spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für den in der BHKW-Anlage produzierten Strom gerechnet werden. Die veränderten Emissionsfaktoren ergeben sich wieder, indem der thermische Wirkungsgrad der KWK-Anlage auf Null gesetzt wird. Die Werte für die Nichtwohngebäude-BHKW sind in Tab. 8-5 dokumentiert. Wie zu erkennen ist, erhöhen sich die spezifischen CO₂-Emissionswerte durch den Gebrauch des Notkühlers um 55 % bis 107 % gegenüber dem KWK-Betrieb und um rund 15 % bis 53 % gegenüber dem Netzstrombezug.

Tab. 8-5: Spezifische direkte CO₂-Emissionen in g_{CO2}/kWh_{el} der Stromerzeugung in BHKW-Anlagen für Nichtwohngebäude (NWG) bei Einsatz des Notkühlers (Flexibilisierung 3-Variante mit $\eta_{th} = 0 \%$)

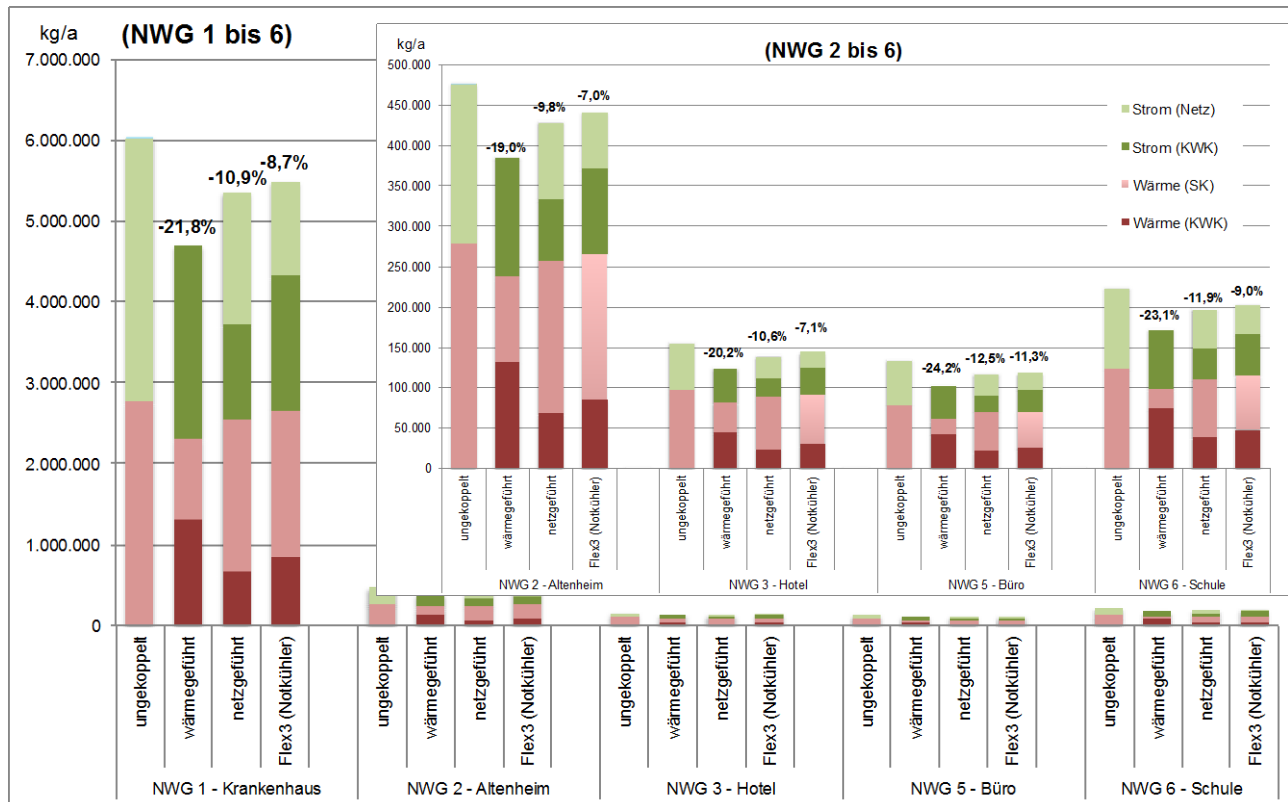
NWG-Typ	NWG 1	NWG 2	NWG 3	NWG 5	NWG 6
spez. CO ₂ -Emissionen Strom mit Notkühler [gCO ₂ /kWh _{el}]	466	579	655	628	640
Mehremissionen vs. KWK-Betrieb [%]	55	89	107	105	102
Mehremissionen vs. Strombezug [%]	15	43	53	47	50

Quelle: eigene Berechnungen

Auf Basis der in Abb. 8-9 und Tab. 8-5 dokumentierten spezifischen CO₂-Emissionen werden mit Hilfe der Energiemengen aus den Simulationsrechnungen die jährlichen absoluten CO₂-Emissionen für die fünf NWG-Typen berechnet. In Abb. 8-10 sind die CO₂-Mengen, differenziert nach ihren Anteilen KWK-Wärme, KWK-Strom, Wärme aus Spitzenlastkessel und Netzstrom,

dargestellt. Darin werden die Säulen für die NWG-Typen 2, 3, 5 und 6 zwecks besserer Auflösung der jeweiligen Anteile zusätzlich separat gezeigt.

Abb. 8-10: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude auf Objektebene (mit Ausschnittvergrößerung für NWG 2 bis NWG 6)



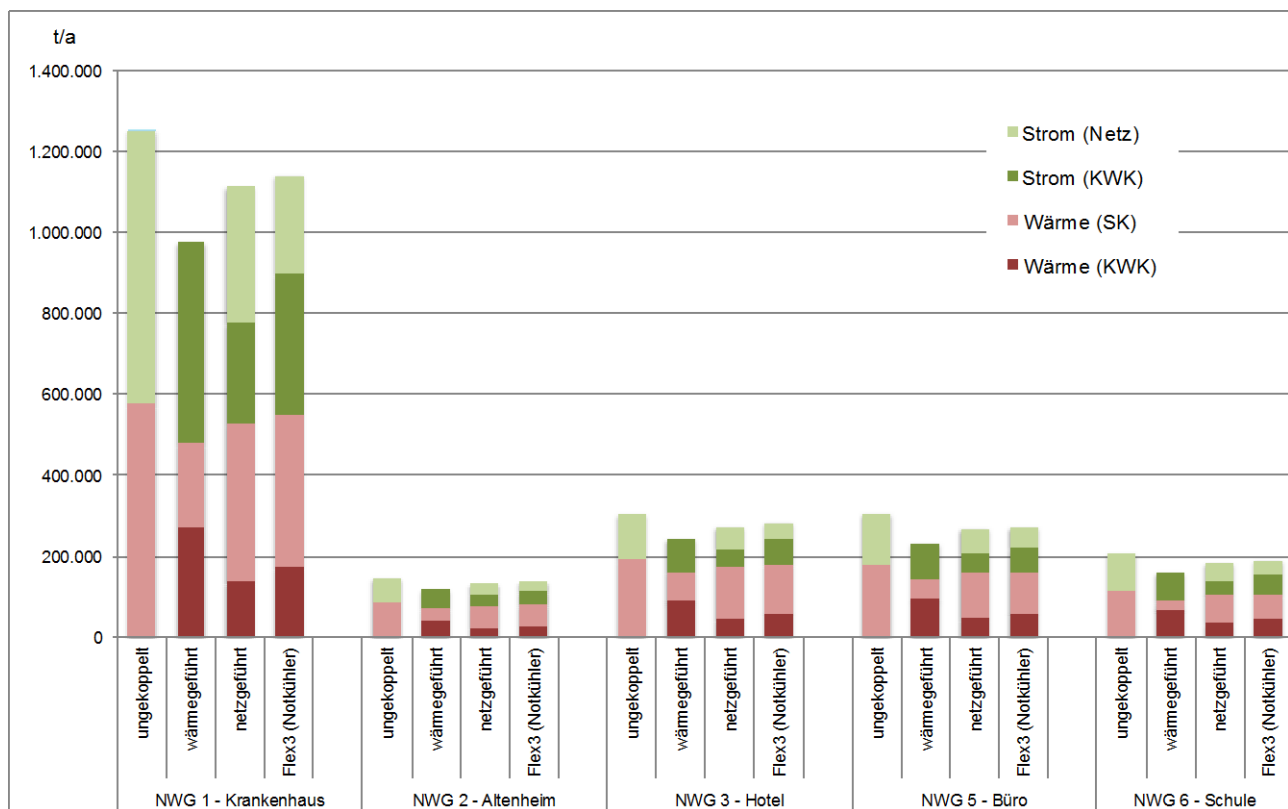
Quelle: Eigene Berechnungen

Wie bei den Wohngebäuden nehmen die CO₂-Emissionen beim Wechsel der Betriebsweise von wärme- zum netzgeführten bzw. flexibilisierten Betrieb (hier: Variante „Notkühler“) zu. Die Einsparungen vs. ungekoppelter Erzeugung verringern sich, jedoch gibt es (anders als beim Wohngebäudetyp WG 1, WG 2 und WG 5) in keinem Fall einen Wechsel des Vorzeichens (im Sinne von Mehremissionen).

Auf der Objektebene sind die absoluten Emissionen der Krankenhaus-BHKW-Anlage (NWG 1 in Abb. 8-10) dominant gegenüber den übrigen NWG-Typen, da der Wärmebedarf des Krankenhauses um den Faktor 16 bis 60 höher liegt. Der Wärmebedarf des Altenheimes liegt wiederum um den Faktor 2,3 bis 3,6 oberhalb des Bedarfes von Schule, Hotel und Bürogebäude.

Die Abb. 8-11, Abb. 8-12 und Abb. 8-13 zeigen die aggregierten CO₂-Emissionen für die Jahre 2010, 2020 und 2030, deren Veränderungen maßgeblich von den zugrunde gelegten KWK-Entwicklungspfaden (BMU 2012) und den eigenen Zuordnungen der Nichtwohngebäude hierzu (vgl. Kapitel 5.3.2) abhängen.

Abb. 8-11: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1 bis 6, aggregiert für das Jahr 2010



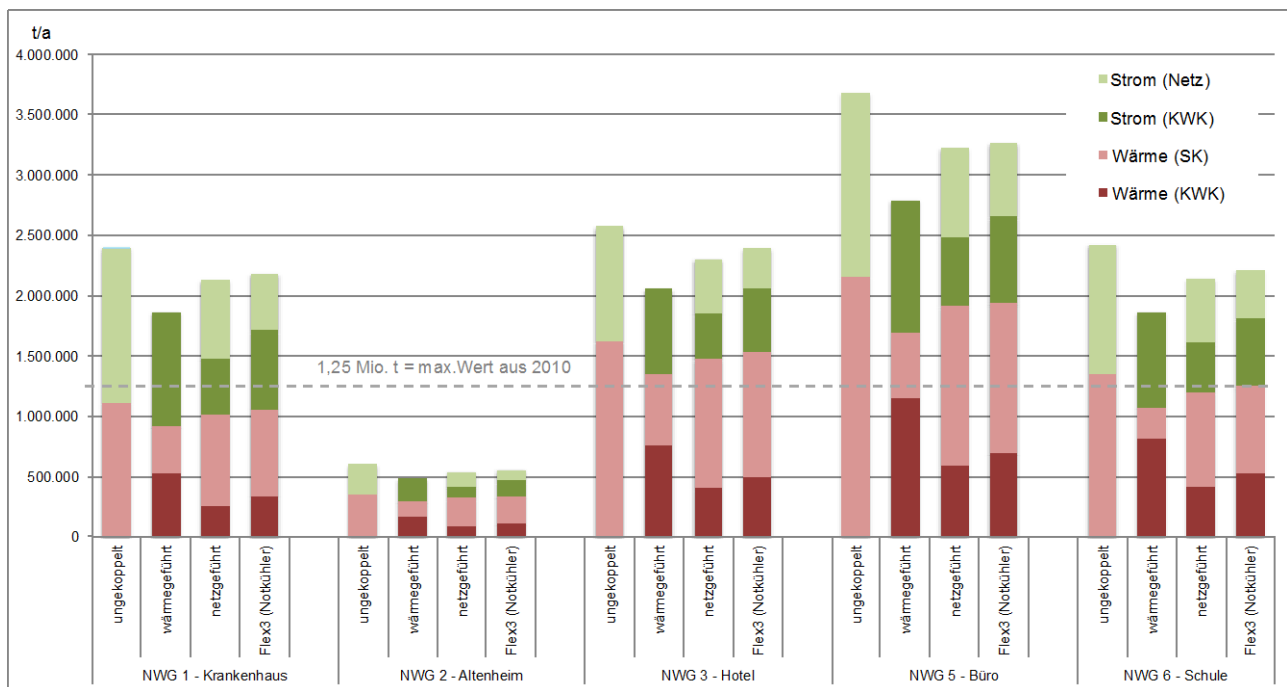
Quelle: Eigene Berechnungen

Im Jahr 2010 stammen die meisten CO₂-Emissionen aus den BHKW in Krankenhäusern (NWG 1), da hier derzeit mit dem größten Marktanteil gerechnet wird. Die jährlichen Emissionen liegen dort mit 0,98 bis 1,14 Mio. t_{CO2} je nach Betriebsweise um ein Vielfaches oberhalb der Emissionen der übrigen vier NWG (0,12 bis 0,28 Mio. t_{CO2}).

Bis zum Jahr 2020 steigt die BHKW-Nutzung (und somit deren Emissionen) gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 und der eigenen Annahmen zur Zuordnung von Nichtwohngebäuden zum dortigen Mengengerüst (siehe Kapitel 5.1) insgesamt erheblich an. Obwohl sich die Emissionen von dem in 2010 dominierenden KWK-Anwendungstyp „Krankenhaus“ bis 2020 auf 1,9 bis 2,2 Mio. t_{CO2} (je nach Betriebsweise) fast verdoppeln, werden sie noch von denen der NWG-Typen „Hotel“, „Bürogebäude“ und „Schule“ übertroffen (siehe Abb. 8-12). Die höchsten Emissionen stammen nun aus NWG 5 (Büro mit 2,8 bis 3,3 Mio. t_{CO2}), die niedrigsten aus NWG 2 (Altenheim mit 0,48 bis 0,55 Mio. t_{CO2}).

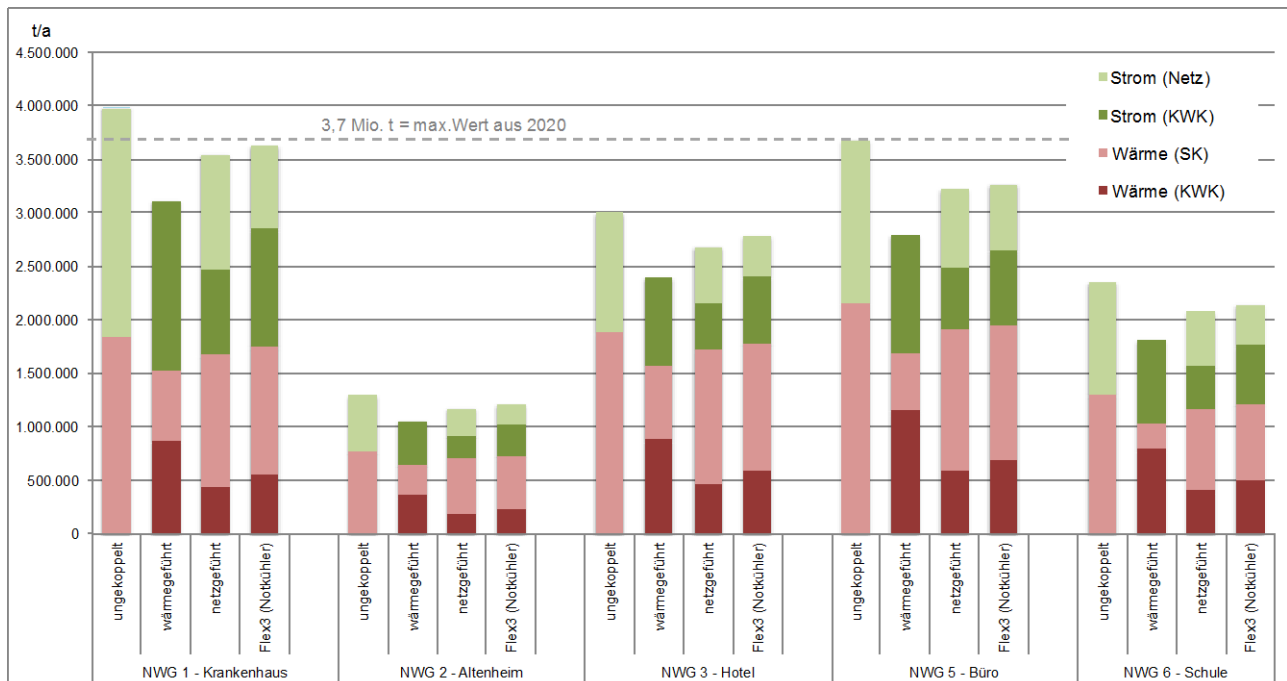
Entsprechend der EE-Langfristszenarien 2011 und den einschlägigen eigenen Annahmen findet bis zum Jahr 2030 ein weiteres Wachstum der KWK-Anwendungen und -Emissionen nur noch für NWG 1, 2 und 3 statt, während der Ausbau für die NWG 5 und 6 stagniert (siehe Abb. 8-13). Die Emissionen aus den Krankenhaus-BHKWs steigen gegenüber dem Jahr 2020 noch mal um den Faktor 1,7 auf 3,1 bis 3,6 Mio. t_{CO2} an und tragen dann wieder am stärksten zu den Gesamtemissionen bei. Die Emissionen aus NWG-Typ 2 (Altenheim) wachsen zwar noch stärker an (Faktor 2,2), bleiben jedoch in absoluten Zahlen (1,1 bis 1,2 Mio. t_{CO2}) nach wie vor deutlich unter denen der übrigen NWG-Typen.

Abb. 8-12: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1 bis 6, aggregiert für das Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnungen

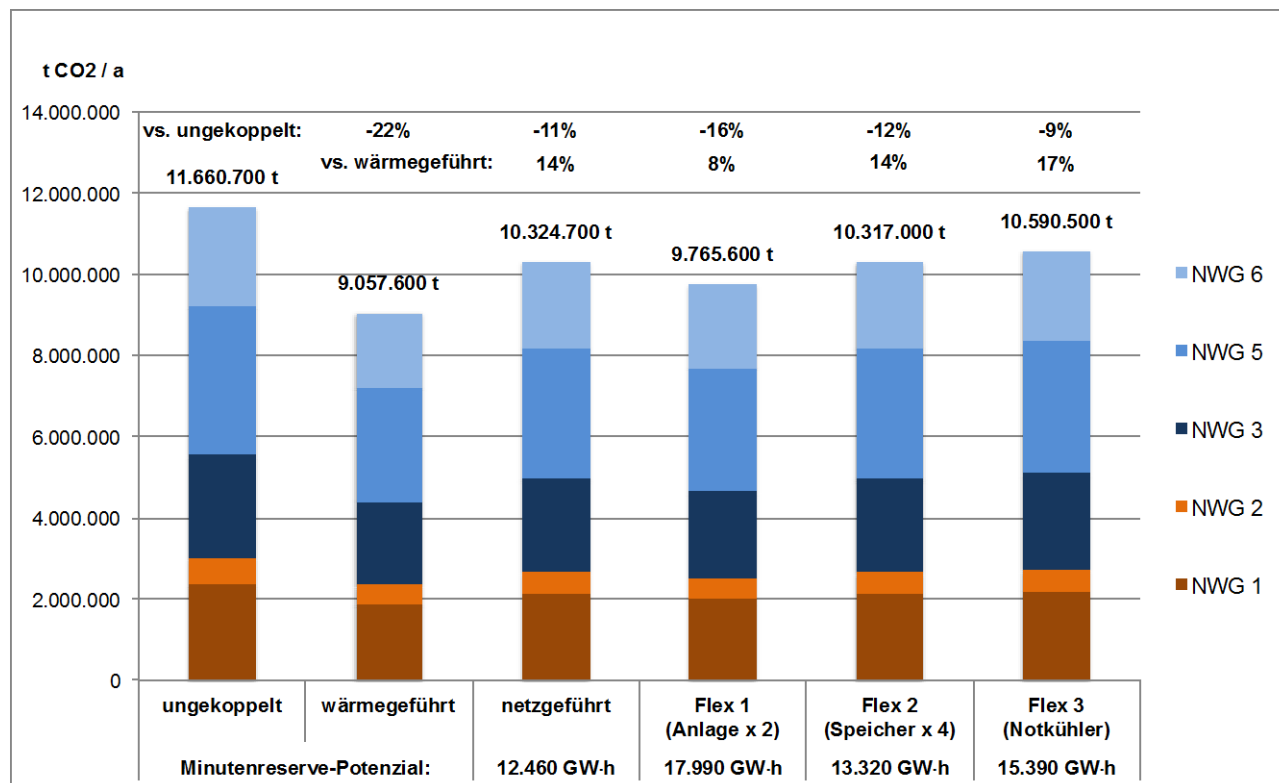
Abb. 8-13: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb (Variante 3: Notkühler) für die Nichtwohngebäude NWG 1, 2, 3, 5 und 6, aggregiert für das Jahr 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abb. 8-14 sind die Emissionen der jeweiligen NWG-Typen beispielhaft für das Jahr 2020 aufsummiert dargestellt.

Abb. 8-14: Vergleich der CO₂-Emissionen für ungekoppelten, wärmegeführten, netzgeführten und flexibilisierten Betrieb für alle NWG-Typen, aggregiert für das Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnungen

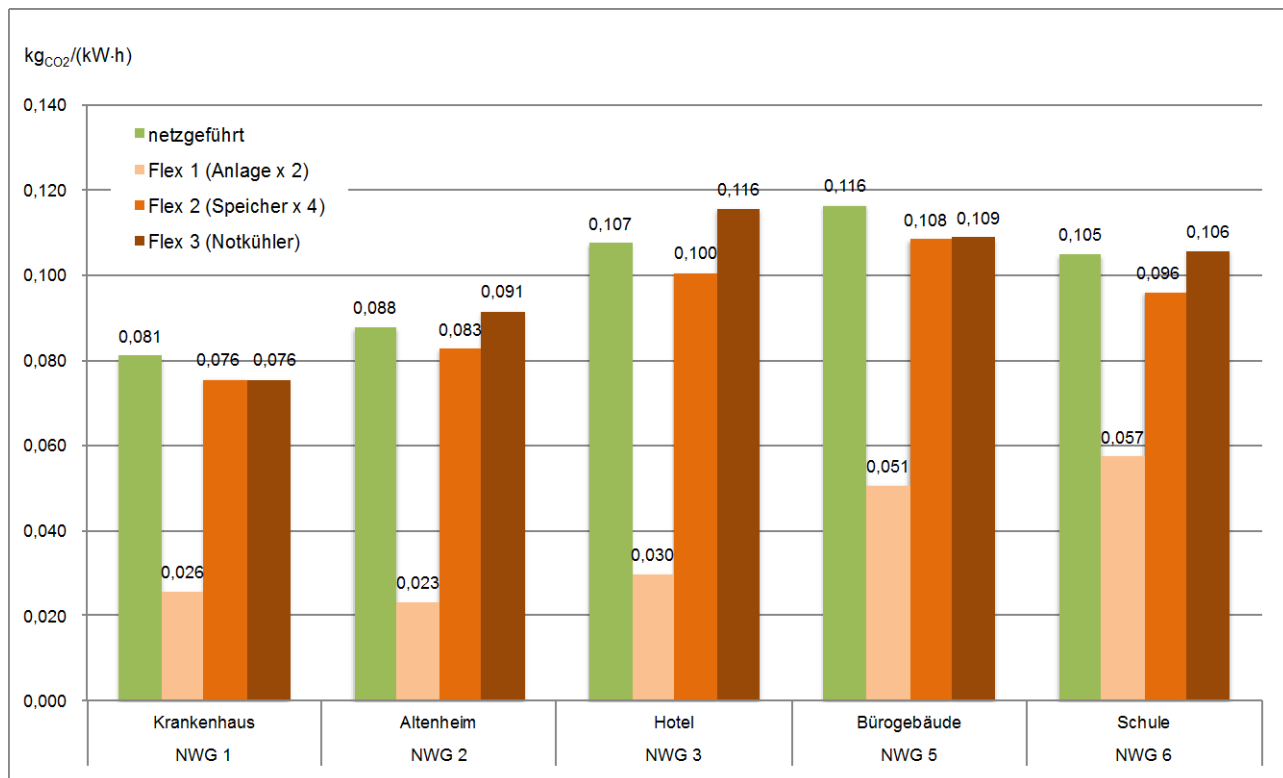
Die über alle betrachteten NWG-Typen aufsummierten CO₂-Emissionen liegen im Jahr 2020 bei minimal 9,06 Mio. t (wärmegeführte Betriebsweise) und maximal bei 11,66 Mio. t (ungekoppelte Referenz). Gegenüber dem wärmegeführten Betrieb erhöhen sich die Emissionen um 8 % (flexibilisiert mit doppelter Anlagengröße), 14 % (netzgeführt, flexibilisiert mit vierfachem Speicher) bzw. 17 % (flexibilisiert mit Notkühler). Zwar sind alle Varianten, die Minutenreserve bereitstellen können, immer noch besser als die ungekoppelte Referenz, jedoch verringert sich die Einsparung von 22 % (wärmegeführt) auf 16 % im günstigsten Fall (Flex 1) und auf 9 % im ungünstigsten Fall (Flex 3).

Bei den Wohngebäuden ist die Flex1-Variante mit doppelter Anlagengröße diejenige mit den geringsten Mehremissionen (Zunahme um 9 %) gegenüber dem wärmegeführten Basisfall, während hingegen das größte Minutenreserve-Potenzial von der Flex3-Variante mit Notkühler bereitgestellt werden kann (vgl. Abb. 8-7). Im Unterschied dazu vereint die Flex1-Variante bei den Nichtwohngebäuden die Vorteile geringste CO₂-Mehremissionen (8 %) und höchste Bereitstellung von Regelleistung (rund 18.000 GW·h). Gegenüber der ungekoppelten Referenz werden noch 16 % Emissionen eingespart.

Die netzgeführte Variante liefert mit rund 12.500 GW·h zwar das kleinste Minutenreserve-Potenzial, jedoch ist hier auch der investive Aufwand am geringsten, da weder Kosten für ein größeres Modul, noch für einen größeren Speicher oder einen Notkühler anfallen.

In Abb. 8-15 sind für jeden der betrachteten NWG-Typen die gegenüber dem wärmegeführten Basisfall zusätzlich anfallenden CO₂-Emissionen bezogen auf den Nutzen (GW·h vorgehaltene Minutenreserve) aufgetragen. Durch diese Darstellungsweise kann das Verhältnis (ökologische) Kosten zu Nutzen für jeden Wohngebäudetyp einzeln beurteilt werden.

Abb. 8-15: Spezifische CO₂-Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt liegen alle spezifischen Emissionswerte unterhalb von 120 g_{CO2}/(kW·h), in 12 von 20 Fällen bei maximal 100 g_{CO2}/(kW·h). Ausnahmslos und mit Abstand schneidet die Flex1-Variante (Verdoppelung der Anlagengröße) mit Werten zwischen 23 und 57 g_{CO2}/(kW·h) am besten ab. Die Flex2-Varianten (Vervierfachung der Speichergröße) liegen – wegen der höheren Speicherverluste bei gleichzeitig geringem Regelleistungsangebot – in allen Fällen weit oberhalb der Flex1-Varianten. Allerdings schneiden sie jeweils etwas günstiger als die netzgeführte Fahrweise ab.

Die Flex3-(Notkühler)-Varianten sind nur in zwei Fällen (NWG 1 und NWG 5) besser als die netzgeführten Varianten. Anders als bei den Wohngebäuden (Abb. 8-8) gibt es hier keine Ausreißer nach oben, da die größeren KWK-Module der NWG durchweg höhere SKZ aufweisen.⁴⁴ Die Wärmeverluste über Notkühler liegen nur zwischen 3 bis 6 %, während die der Wohngebäude bis zu 28 % betragen (vgl. Tab. 8-4).

⁴⁴ Kleine SKZ führen zu übermäßig starkem Wegkühlen der KWK-Wärme über Notkühler trotz relativ geringer Stromproduktion.

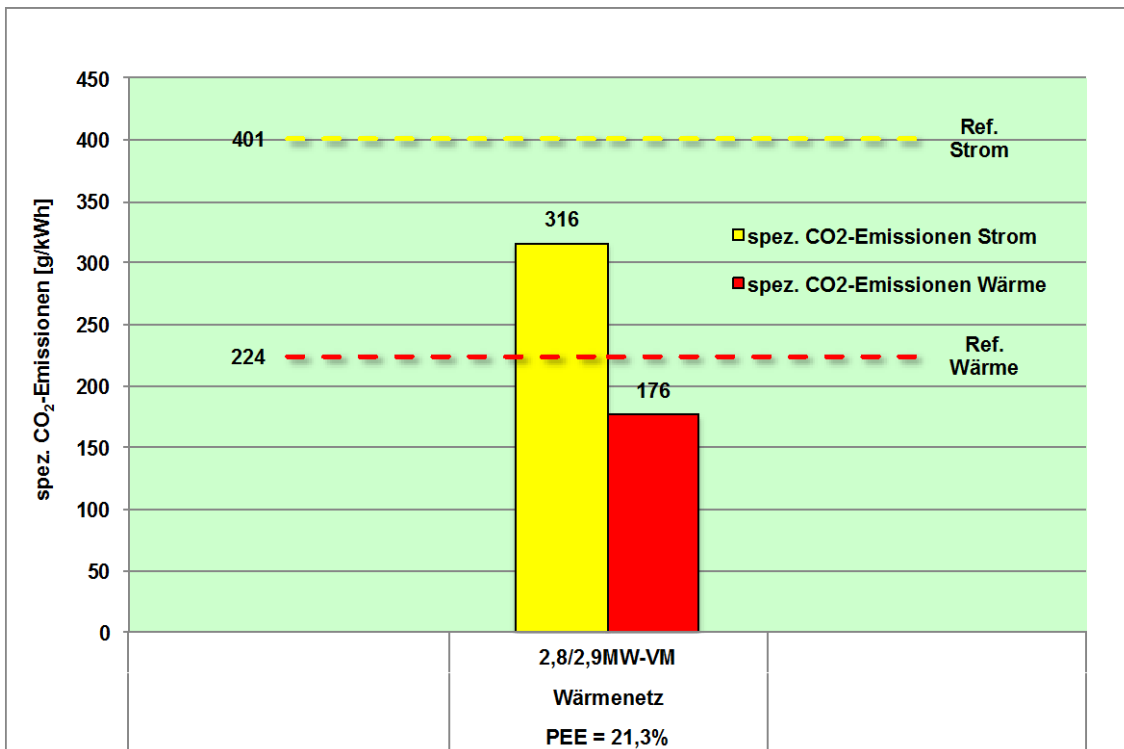
8.2.3 Wärmenetze

Das beispielhaft modellierte Wärmenetz wurde in Kapitel 5.3.3 beschrieben. Die für die Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Annahmen und Parameter können der Tab. 8-2 entnommen werden.

Das Ergebnis der CO₂-Berechnung (Abb. 8-16) zeigt, dass die Primärenergieeinsparung mit 21,3 % im mittleren Bereich der Wohngebäude liegt (15 bis 26 %, s. Abb. 8-1), jedoch niedriger ausfällt als bei den Nichtwohngebäuden (24 bis 28 %, s. Abb. 8-9). Der Grund für das schlechtere Abschneiden gegenüber den Nichtwohngebäuden liegt in den Annahmen zur Eigenstromnutzung und zur Netzeinspeiseebene. Würde man die spezifischen CO₂-Emissionen wie bei den NWG mit 60 % Eigenstromnutzung und einer Einspeisung in das Niederspannungsnetz (bis 400 V) berechnen, erhält man eine Primärenergieeinsparung von 24,4 %.

Die spezifischen CO₂-Emissionswerte für Strom (316 g_{CO2}/kWh_{el}) und Wärme (176 g_{CO2}/kWh_{th}) fallen beim synthetischen Wärmenetz-BHKW aufgrund des höheren elektrischen Wirkungsgrades im Vergleich zu den Wohngebäude-Modulen (317 bis 364 g_{CO2}/kWh_{el} und 166 bis 190 g_{CO2}/kWh_{th}) insbesondere beim Strom besser aus. Gegenüber den Nichtwohngebäuden (Bandbreite von 300 bis 318 g_{CO2}/kWh_{el} und 160 bis 169 g_{CO2}/kWh_{th}) liegen die spezifischen Emissionen jedoch fast durchwegs höher.

Abb. 8-16: Spezifische direkte CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung des modellierten Wärmenetzes mit drei einspeisenden KWK-Modulen (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 50,3 \% / \eta_{th, Ref} = 90,0 \%$)



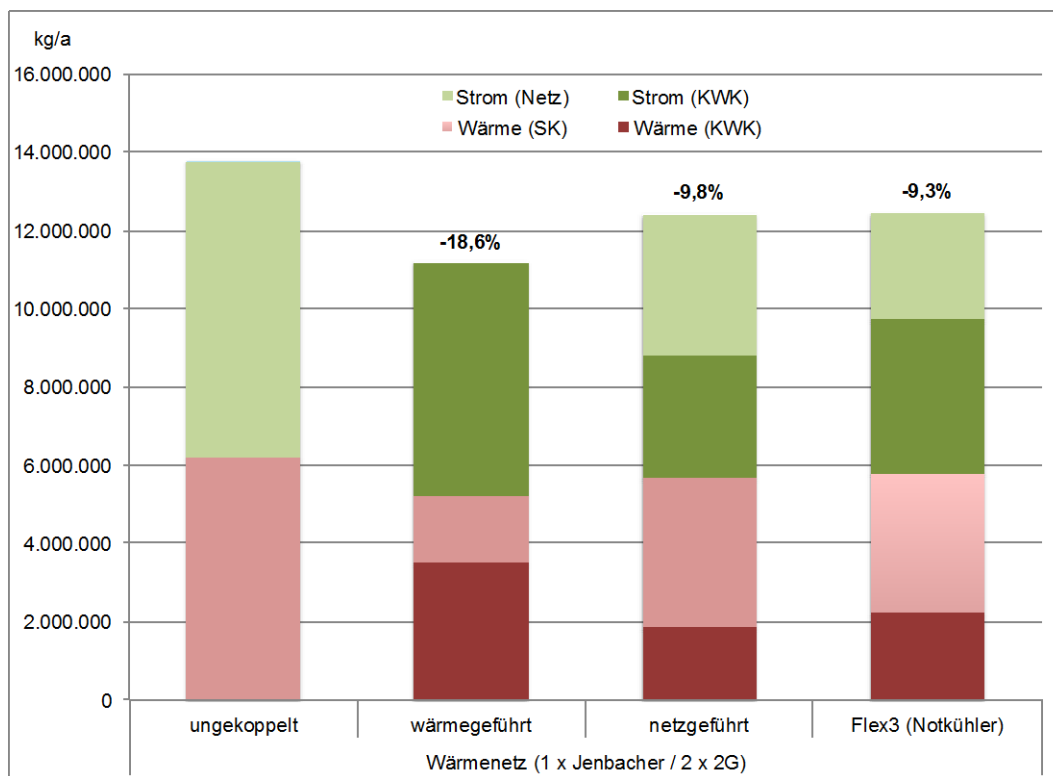
Anmerkungen: Angabe der elektrischen und thermischen Gesamtleistung in Megawatt; VM: Verbrennungsmotor
Quelle: Eigene Berechnungen

Für die Flex3-Variante (Einsatz eines Notkühlers) wird wiederum ein angepasster spezifischer CO₂-Emissionsfaktor für den in der BHKW-Anlage produzierten Strom berechnet, indem der

thermische Wirkungsgrad der KWK-Anlage auf Null gesetzt wird. Die spezifischen CO₂-Emissionen für Strom aus dem modellierten Wärmenetz-BHKW erhöhen sich dadurch um 63 % von 316 g_{CO2}/kWh_{el} ohne Notkühlereinsatz auf 513 g_{CO2}/kWh_{el} mit Notkühlereinsatz. Gegenüber dem Netzstrombezug (401 g_{CO2}/kWh_{el}) steigen die Emissionen um 28 % an.

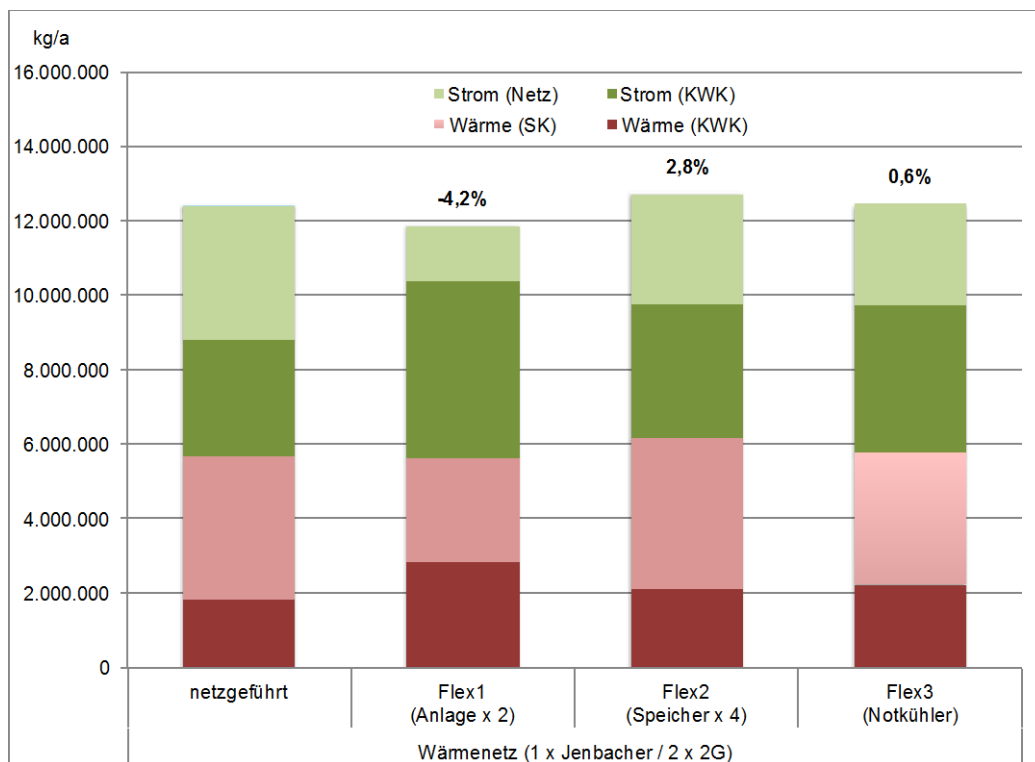
Auf Basis der in Abb. 8-16 dokumentierten spezifischen CO₂-Emissionswerte werden mit Hilfe der Energiemengen aus den Simulationsrechnungen die jährlichen absoluten CO₂-Emissionen für das Wärmenetz berechnet. In Abb. 8-17 (Vergleich versus ungekoppelte Fahrweise) und Abb. 8-18 (versus netzgeführte Fahrweise) sind die CO₂-Emissionen, differenziert nach den Anteilen KWK-Wärme, KWK-Strom, Wärme aus Spitzenlastkessel und Strom aus Netz, dargestellt.

Abb. 8-17: Vergleich der CO₂-Emissionen für das modellierte Wärmenetz: Wärmegeführter, netzgeführter und flexibilisierter Betrieb (Variante 3: Notkühler) versus ungekoppelte Fahrweise



Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 8-18: Vergleich der CO₂-Emissionen für das modellierte Wärmenetz: Flexibilisierter Betrieb versus netzgeführte Fahrweise

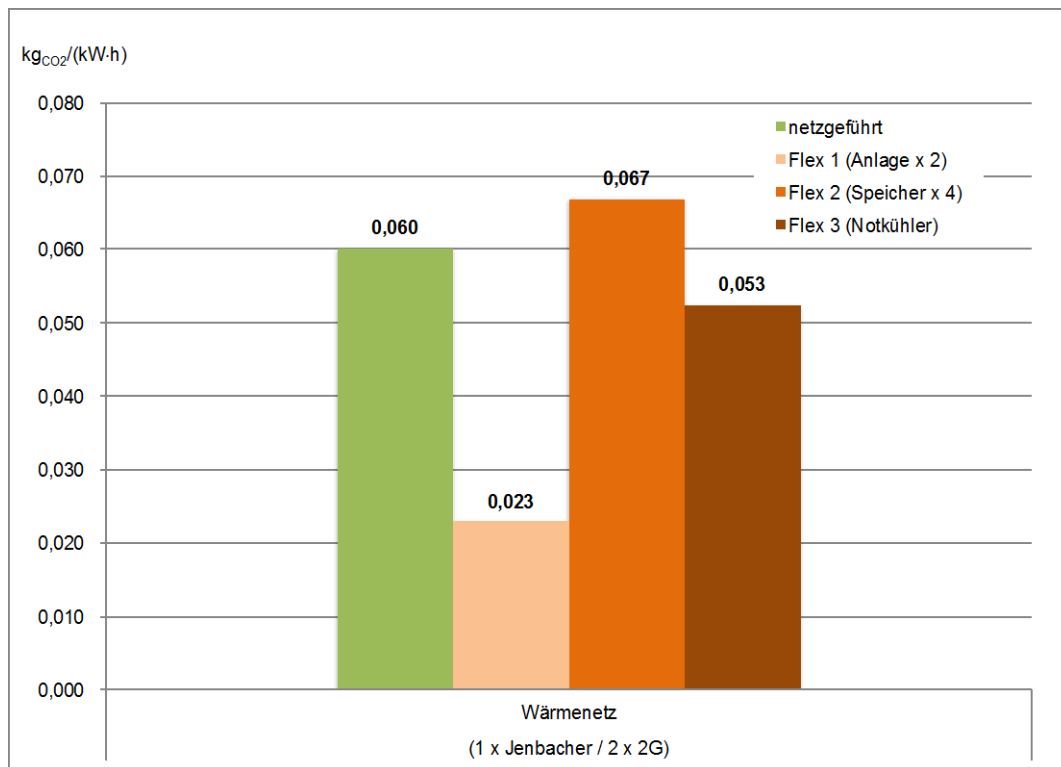


Quelle: Eigene Berechnungen

Wie bei den Wohn- und Nichtwohngebäuden nehmen auch hier die CO₂-Emissionen bei Wechsel der Betriebsweise von wärme- auf netzgeführten bzw. flexibilisierten Betrieb zu. Die Einsparungen gegenüber ungekoppelter Erzeugung verringern sich von 18,6 % auf bis zu 9,8 %. Vergleicht man die Optionen zur Bereitstellung von Regelleistung untereinander (Abb. 8-18), so ergibt die Flex-Variante 1 (doppelte Anlagengröße) eine leichte Verbesserung und die Flex-Varianten 2 (vierfache Speichergröße) und 3 (Notkühler) eine leichte Verschlechterung gegenüber der netzgeführten Betriebsweise.

In Abb. 8-19 sind für das betrachtete Wärmenetz wiederum die gegenüber dem wärmegeführten Basisfall resultierenden CO₂-Mehremissionen bezogen auf die vorgehaltene Minutenreserve dargestellt.

Abb. 8-19: Spezifische CO₂-Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für das modellierte Wärmenetz



Quelle: Eigene Berechnungen

Die spezifischen Emissionswerte liegen unterhalb von 70 g_{CO2}/(kW·h). Die Flex1-Variante (Verdoppelung der Anlagengröße) weist mit 30.440 GWh/a nicht nur das größte Regelleistungspotenzial auf, sondern schneidet mit 23 g_{CO2}/(kW·h) auch am besten ab. Die Flex2-Variante (Vervierfachung der Speichergröße, Regelleistungspotenzial : 23.330 GWh/a) liegt mit 67 g_{CO2}/(kW·h) – wegen höheren Speicherverlusten bzw. geringem Regelleistungsangebot – oberhalb der übrigen Regelleistungsvarianten. Im Unterschied zu den Nichtwohngebäuden (vgl. Abb. 8-15) schneidet sie auch schlechter ab als die netzgeführte Fahrweise mit einem Minutenreservepotenzial von 20.120 GWh/a.

Die Flex3-(Notkühler)-Variante mit einem Regelleistungspotenzial von 24.460 GWh/a ist deutlich besser als die netzgeführte Variante. Die Wärmeverluste über Notkühler liegen nur bei 3 % (bezogen auf die gesamte produzierte Wärme aus KWK-Modul und Spitzenlastkessel), während die der Wohngebäude bei Anlagen mit kleiner SKZ bis zu 28 % betragen (siehe Tab. 8-4).

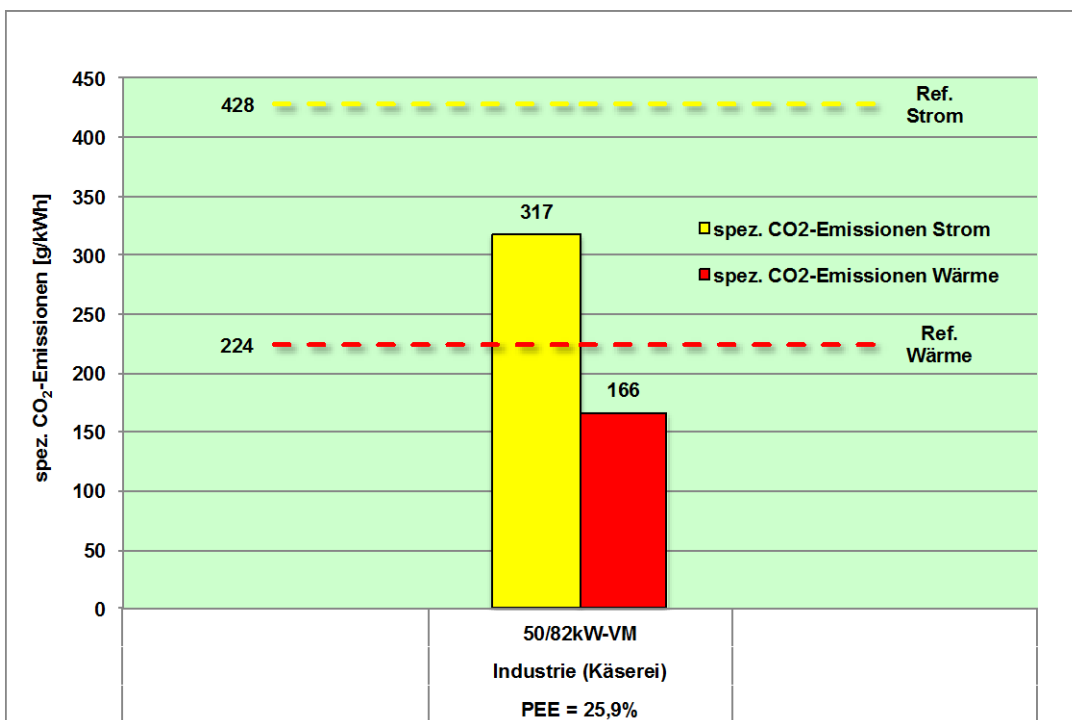
8.2.4 Industrie

Die beispielhaft modellierte industrielle BHKW-Anlage⁴⁵ für eine Käserei wurde in Kapitel 5.3.4 beschrieben. Die darüber hinaus für die Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Annahmen und Parameter können der Tab. 8-2 entnommen werden.

Das Ergebnis der CO₂-Allokationsberechnung (Abb. 8-20) zeigt, dass die Primärenergieeinsparung mit 25,9 % im oberen Bereich der Wohngebäude (15 bis 26 %, s. Abb. 8-1) und im mittleren Bereich der Nichtwohngebäude (24 bis 28 %, s. Abb. 8-9) liegt.

Die spezifischen CO₂-Emissionswerte für Strom (317 g_{CO2}/kWh_{el}) und Wärme (166 g_{CO2}/kWh_{th}) sind identisch mit den besten Werten der Wohngebäude-Module (317 bis 364 g_{CO2}/kWh_{el} und 166 bis 190 g_{CO2}/kWh_{th}). Gegenüber den Nichtwohngebäuden (Bandbreite von 300 bis 318 g_{CO2}/kWh_{el} und 160 bis 169 g_{CO2}/kWh_{th}) liegen die spezifischen Emissionen jedoch in vielen Fällen höher.

Abb. 8-20: Spezifische direkte CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsparung (PEE) vs. ungekoppelter Erzeugung der modellierten industriellen KWK-Anlage in einer Käserei (finnische Methode $\eta_{el, Ref, kor.} = 47,1 \% / \eta_{th, Ref} = 90,0 \%$)



Anmerkungen: Angabe der elektrischen und thermischen Leistung in Kilowatt, VM: Verbrennungsmotor
Quelle: Eigene Berechnungen

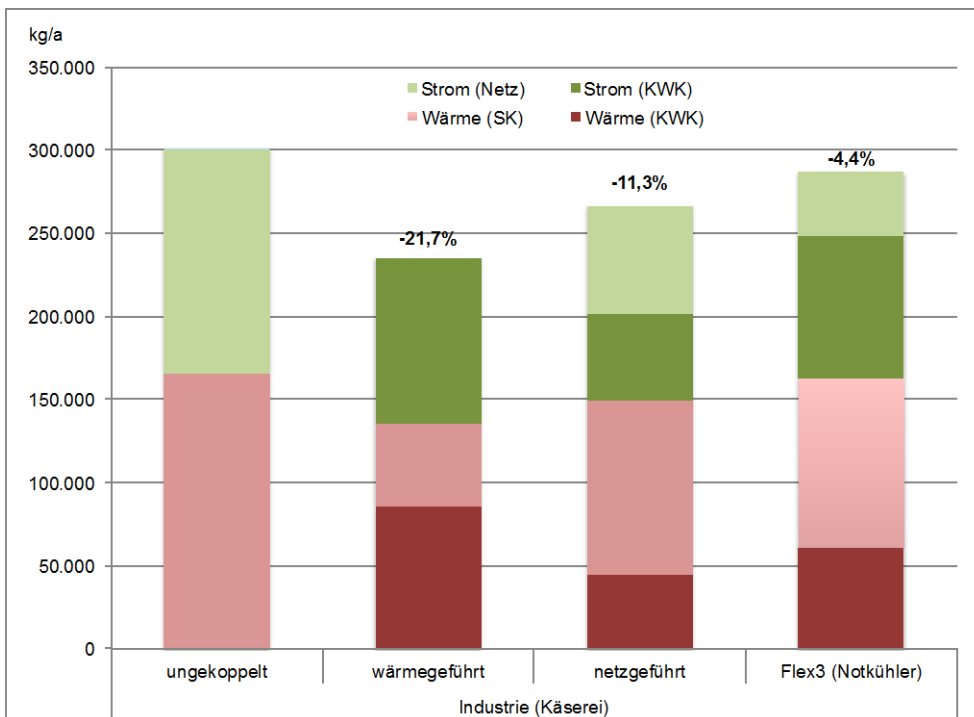
Für die Flex3-Variante (Einsatz eines Notkühlers) wird wieder ein angepasster spezifischer CO₂-Emissionsfaktor für den in der BHKW-Anlage produzierten Strom berechnet, indem bei der CO₂-Allokationsberechnung der thermische Wirkungsgrad der KWK-Anlage auf Null gesetzt

⁴⁵ Es handelt sich dabei um das gleiche BHKW-Modul wie beim Wohngebäudetyp 4 (Hochhaus Altbau).

wird. Die spezifischen CO₂-Emissionen für Strom aus dem Industrie-BHKW erhöhen sich dadurch von 317 g_{CO2}/kWh_{el} ohne Notkühlereinsatz auf 589 g_{CO2}/kWh_{el} mit Notkühlereinsatz (+86 %). Gegenüber dem Netzstrombezug (428 g_{CO2}/kWh_{el}) steigen die Emissionen um 38 % an.

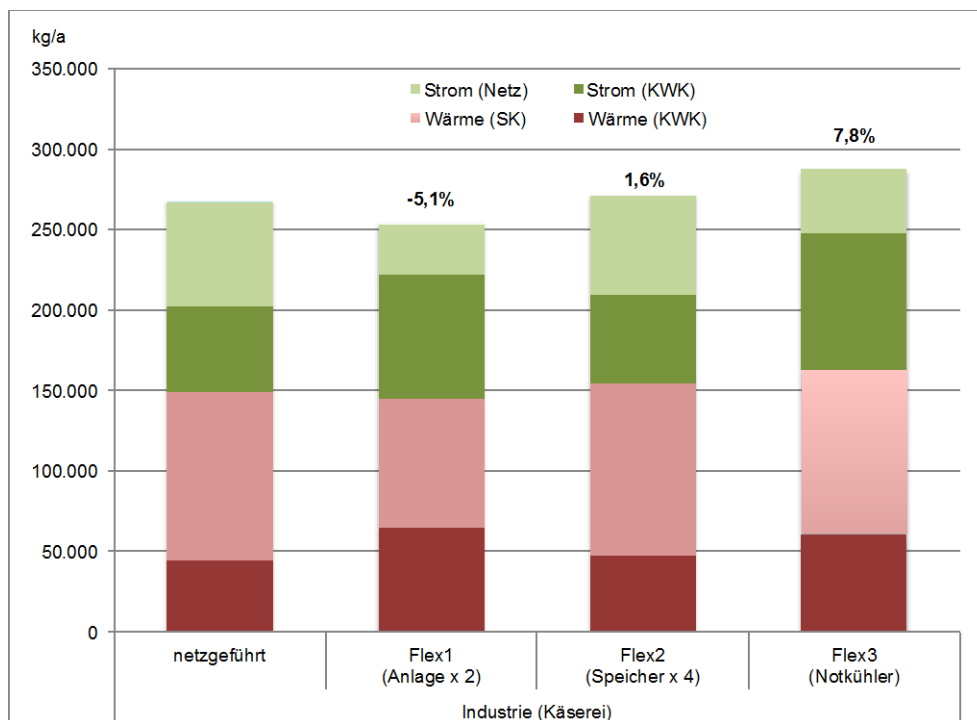
Auf Basis der in Abb. 8-20 dokumentierten spezifischen CO₂-Emissionswerte werden mit Hilfe der Energiemengen aus den Simulationsrechnungen die jährlichen absoluten CO₂-Emissionen für das industrielle BHKW berechnet. In Abb. 8-21 (Vergleich mit der ungekoppelten Fahrweise) und Abb. 8-22 (versus netzgeführte Fahrweise) sind die CO₂-Emissionen, differenziert nach ihren Anteilen KWK-Wärme, KWK-Strom, Wärme aus Spitzenlastkessel und Netzstrom, dargestellt.

Abb. 8-21: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für die modellierte industrielle KWK-Anlage (Käserei): Wärmegeführter, netzgeführter und flexibilisierter Betrieb (Variante 3: Notkühler) versus ungekoppelte Fahrweise



Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 8-22: Vergleich der direkten CO₂-Emissionen für die modellierte industrielle KWK-Anlage (Käserei): flexibilisierter Betrieb versus netzgeführte Fahrweise



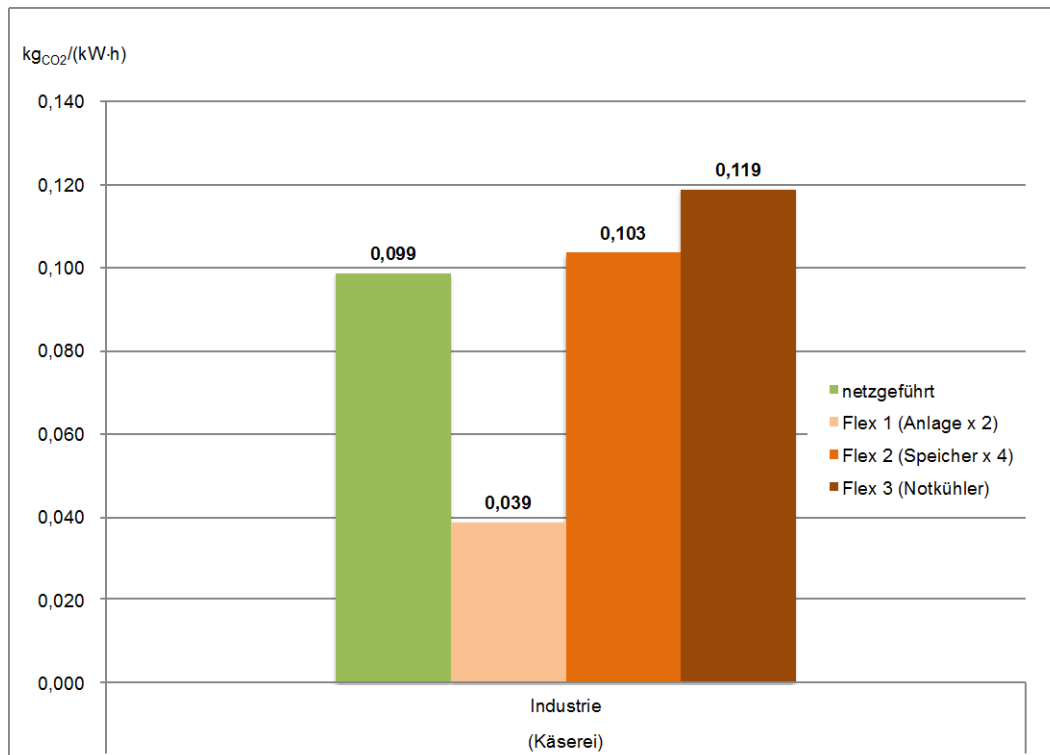
Quelle: Eigene Berechnungen

Wie auch in den übrigen Sektoren nehmen die CO₂-Emissionen beim Wechsel der Betriebsweise von wärme- auf netzgeführten bzw. flexibilisierten Betrieb zu und die Einsparungen im Vergleich zur ungekoppelten Erzeugung verringern sich von 21,7 % auf 11,3 % bzw. 4,4 %. Im Vergleich dazu sind beim Wohngebäudetyp WG 4 mit identischem KWK-Modul die Einsparungen vs. Referenz beim wärme- und netzgeführten Betrieb leicht geringer (-20,8 % bzw. -10,3 %) und beim Flex3-Betrieb leicht höher (-7,8 %).

Vergleicht man die Optionen zur Bereitstellung von Regelleistung untereinander (Abb. 8-22), so ergibt nur die Flex-Variante 1 (doppelte Anlagengröße) eine leichte Verbesserung gegenüber der netzgeführten Betriebsweise (-5,1 %), während die Varianten Flex2 (vierfache Speichergröße) und Flex3 (Notkühler) einen leichten bzw. merklichen Emissionsanstieg um 1,6 % bzw. 7,8 % bedeuten. Die vergleichbaren Veränderungen beim WG 4 fallen mit -5,5 % (wärmegeführt), 0,4 % (netzgeführt) und 2,9 % (Flex3) insgesamt etwas günstiger aus.

In Abb. 8-23 sind für die betrachtete industrielle KWK-Anlage die gegenüber dem wärmegeführten Basisfall zusätzlich resultierenden CO₂-Emissionen bezogen auf den Nutzen (GW · h vorgehaltene Minutenreserve) aufgetragen.

Abb. 8-23: Spezifische CO₂-Mehremissionen (pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve) der netzgeführten und flexibilisierten Fahrweisen gegenüber dem wärmegeführten Betrieb für das modellierte Industrie-BHKW (Käserei)



Quelle: Eigene Berechnungen

Die spezifischen Emissionswerte liegen unterhalb von 120 g_{CO2}/(kW·h). Die Flex1-Variante (Verdoppelung der Anlagengröße) weist mit 455.000 kWh/a nicht nur das größte Regelleistungspotenzial für Minutenreserve auf, sondern schneidet mit 39 g_{CO2}/(kW·h) auch am besten ab. Die Flex2-Variante (Vervierfachung der Speichergröße, Regelleistungspotenzial : 342.000 kWh/a) liegt mit 103 g_{CO2}/(kW·h) – wegen höherer Speicherverluste bzw. geringem Regelleistungsangebot – oberhalb der übrigen Regelleistungsvarianten. Im Unterschied zu den Nichtwohngebäuden (vgl. Abb. 8-15) und insbesondere im Unterschied zu der identischen Wohngebäude-KWK-Anlage WG 4 (Abb. 8-8) schneidet die Flex2-Variante auch schlechter ab als die netzgeführte Fahrweise mit einem Minutenreservepotenzial von 316.000 kWh/a und 99 g_{CO2}/(kW·h).

Die Flex3-(Notkühler)-Variante mit einem Regelleistungspotenzial von 438.000 kWh/a und 119 g_{CO2}/(kW·h) weist die höchsten spezifischen Emissionen der vier untersuchten Fahrweisen auf. Die Wärmeverluste über Notkühler liegen bei relativ hohen 10 % (bezogen auf die gesamte produzierte Wärme aus KWK-Modul und Spitzenlastkessel), während die der identischen Wohngebäude-KWK-Anlage WG 4 nur bei der Hälfte lag (siehe Tab. 8-4).

8.2.5 Ausblick Flexibilisierungsvarianten

Die Flex2-Variante (Vervierfachung der Speichergröße) liegt – wegen des geringeren Regelleistungspotenzials bei gleichzeitig höheren Speicherverlusten – in vielen Fällen oberhalb der Flex1-Variante. Perspektivisch wäre hier noch eine gewisse Verbesserung zu erwarten, sofern sich bessere Dämmkonzepte für Speicher am Markt durchsetzen. Ein vielversprechender Ansatz könnte z. B. ein Latentwärmespeicher sein oder aber die Vakuum-Technik, bei der –

ähnlich wie bei einer Thermoskanne – der Wärmeübergang mit Hilfe einer doppelwandigen evakuierten Schale gebremst wird. In einer Pilotanlage mit einem 16 m³ großem Vakuum-Tank konnten dadurch beispielsweise die Verluste gegenüber einem konventionellem Speicher mit Mineralwolle-Dämmung um 80 % auf 2 Watt pro Kelvin (oder 0.2 °C pro Tag bei einer Temperaturdifferenz von 90 °C) reduziert werden (Banse, S. 2011).

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass für eine sinnvolle Anwendung der Flex3-Variante (Notkühler) auch für Gebäude mit geringem Wärmebedarf wie in WG 1 (EFH Altbau mit 22.700 kWh_{th}) bzw. WG 5 (kleines MFH EnEV mit 27.400 kWh_{th}) die Entwicklung kleiner KWK-Modulen mit höheren SKZ voraussetzt. Der kleine 1 kW_{el}-Verbrennungsmotor, der in WG 8 (großes MFH PH) zum Einsatz kommt, hat hingegen mit einem Wert von 0,4 bereits eine akzeptablere SKZ. Insbesondere die Markteinführung von Brennstoffzellen mit noch deutlich höheren Stromkennzahlen (≥ 1 bis 2) auch im kleinen Leistungssegment würde einen großen Sprung hin zu einer effizienten Notkühlervariante bedeuten. Die in der Markteinführungsphase befindliche Hochtemperaturbrennstoffzelle BlueGen von Ceramic Fuel Cells Limited weist bspw. einen elektrischen Wirkungsgrad von 50 bis 60 % und eine SKZ größer 2 auf (ca. 0,5 kW_{th} bei 1,5 kW_{el}).⁴⁶ Da das Gerät ohnehin mit einem hochtemperaturfesten Abgasweg aus Edelstahl ausgeführt werden muss, würde hier sogar der Aufwand für einen zusätzlichen Notkühler entfallen. Allerdings ist diese SOFC-Brennstoffzelle in der Anschaffung noch sehr teuer und aufgrund von Degradationseffekten fast ausschließlich für den Dauerbetrieb geeignet (vgl. auch Tab. 4-7), was die Anwendung für die Bereitstellung von Regelleistung stark einschränkt.

46 s. Produktdatenblatt unter www.cfcl.com.au
([www.cfcl.com.au/Assets/Files/Gennex_Brochure_\(GER\)_April_2010.pdf](http://www.cfcl.com.au/Assets/Files/Gennex_Brochure_(GER)_April_2010.pdf))

8.3 Zusammenfassung: CO₂-Emissionen

Ein Wechsel vom heute üblichen wärmegeführten Betrieb hin zur netzgeführten Fahrweise bewirkt eine Veränderung der Energieproportionen (vgl. Fußnote 43, S. 137) und infolgedessen auch der CO₂-Emissionen. Die Bestimmung der jeweiligen CO₂-Emissionen und erforderlichen Primärenergie für die verschiedenen Einsatzstrategien und für ein ungekoppeltes Referenzsystem erfolgt mit Hilfe der Finnischen Allokationsmethode. Demnach dienen Erdgas-GuD-Kraftwerke und Erdgas-Kessel mit Referenz-Wirkungsgraden von 52,5 % und 90 % als Referenztechnologien für die Strom- und Wärmeerzeugung.

Die Allokationsberechnungen für den netzgeführten Betrieb zeigen für alle betrachteten Fälle, dass sie trotz sinkendem BHKW-Deckungsbeitrag sowohl primärenergetisch als auch bezogen auf die CO₂-Emissionen immer noch signifikant besser abschneiden als das ungekoppelte Referenzsystem. Jedoch sinkt die mögliche CO₂-Einsparung dadurch etwa um die Hälfte im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Im Hinblick auf die möglichen Primärenergieeinsparungen schneiden die Nichtwohngebäude mit einer Bandbreite von 24 bis 28 % und das industrielle BHKW-Fallbeispiel mit etwa 26 % am besten ab. Die PEE liegt für das betrachtete Wärmenetz-BHKW dagegen „nur“ bei etwa 21 %, was im wesentlichen aus der Annahme einer niedrigeren Eigenstromnutzung und dementsprechend geringeren vermiedenen Netzverlusten resultiert. Die PEE für die Wohngebäude-BHKW weisen dagegen eine große Bandbreite auf und liegen je nach Modul zwischen 15 und 26 %. Im Vergleich zu den Wohngebäude-Modulen haben die im Mittel größeren NWG-Aggregate aufgrund ihrer höheren elektrischen Wirkungsgrade insgesamt bessere Werte.

Die betrachteten Flexibilisierungsoptionen haben unterschiedlichen Einfluss auf die CO₂-Emissionen. Eine Verdopplung der Anlagengröße führt in fast allen Fällen (mit Ausnahme von WG-Typ 1 und 5) zu niedrigeren Emissionswerten als beim netzgeführten Betrieb. Dabei schneiden die größeren Anlagen bei den NWG mit minus 4 bis 6 % etwas besser ab als die WG-Anlagen mit minus 1 bis 6 %. Ein viermal größerer Speicher bewirkt bei NWG, Wärmenetz- und Industrie-Beispiel emissionsseitig kaum Veränderungen gegenüber dem netzgeführten Betrieb. Bei WG resultiert dagegen überwiegend eine leichte Zunahme (< 2 %), mit Ausnahme von WG-Typ 2 mit einem Anstieg um rd. 4 %. Die Flexibilisierung mittels Notkühler führt bei den WG-Typen 1, 5 und 2 zu einem besonders hohen Anstieg der CO₂-Emissionen (52 %, 34 % und 14 %). Grund dafür ist die geringe SKZ des dort verwendeten 1kW-Stirlingmotors, die ein übermäßig starkes Wegkühlen der KWK-Wärme bei relativ geringer Stromproduktion zur Folge hat. In den übrigen Fällen bewirkt der Notkühler einen leichten bis mäßigen Anstieg: Gegenüber der netzgeführten Variante erhöhen sich die Emissionen um 1 % beim Wärmenetz, durchschnittlich 3 % bei den NWG, durchschnittlich 5 % bei den WG (ohne WG 1, 2 und 5) und 8 % beim Industrie-BHKW.

Die Hochrechnungen der Ergebnisse für die betrachteten Wohn- und Nichtwohngebäude auf den Gesamtbestand in Deutschland für das Jahr 2020 zeigen, dass die gesamten CO₂-Emissionen im WG-Bereich zwischen 3,9 Mio. t (Basisfall wärmegeführte Betriebsweise) und 4,8 Mio. t (ungekoppelte Referenz) liegen. Die mögliche CO₂-Einsparung verringert sich im günstigsten Fall (Flex 1) von 18 % auf 11 %. Im ungünstigsten Fall (Flex 3) erhöhen sich die Emissionen um 4 %. Im NWG-Bereich liegen die CO₂-Gesamtemissionen zwischen 9,1 Mio. t (wärmegeführte Betriebsweise) und 11,7 Mio. t (ungekoppelte Referenz). Hier kommt es im

günstigsten Fall (Flex 1) zu einer Verringerung der möglichen Einsparung von 22 % auf 16 % und im ungünstigsten Fall (Flex-3) auf 9 %.

9 Hemmnisse

Wie die vorigen Analysen gezeigt haben können BHKW am Minutenreservemarkt teilnehmen (siehe Kapitel 4.2), dort nennenswerte Beiträge leisten (siehe Kapitel 7) und trotzdem noch die CO₂-Emissionen im Vergleich zu ungekoppelten Referenzsystemen (siehe Kapitel 8.2) reduzieren helfen. In der Praxis wird ihre Teilnahme jedoch durch verschiedene Einflussfaktoren (Hemmnisse) behindert oder sogar verhindert. Welche Hemmnisse das sein können und wie sie zu bewerten sind, steht im Fokus dieses Kapitels. Dabei ist zu beachten (vgl. (FFU - Forschungsstelle Für Umweltpolitik 2007)), dass:

- es für Hemmnisanalysen keine einheitlich festgelegten Kategorien gibt. Die Kategorien richten sich häufig nach dem Gegenstand, Schwerpunkt und Ziel der Untersuchung. Sie können daher z. B. eher technisch-ökonomischer oder politikwissenschaftlicher Natur oder in manchen Fällen auch gar nicht nötig sein.
- Hemmnisse (Ursache und Wirkungen) nicht immer eindeutig kategorisiert werden können. So kann die Ursache z. B. in fehlender technischer Ausstattung oder unpassenden politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen liegen, die eigentliche Wirkung ist dann aber z. B. häufig ökonomischer Art („zu teuer“).

Für die Analyse hier wurden auf der Basis eigener Überlegungen und Literaturlauswertungen jeweils einschlägige Hemmnisse für die Dimensionen Technik, Ökologie, Ökonomie, Politik sowie Soziales identifiziert und auf dem Experten-Workshop zum Projekt vorgestellt, ergänzt, bewertet und diskutiert (siehe Kapitel 13). Die dort durchgeführte ad-hoc Bewertung mittels Punktevergabe ergab, dass die ökonomischen Hemmnisse am relevantesten sind. Demnach liegt der Fokus der im Folgenden auch auf der Analyse der identifizierten ökonomischen Hemmnisse (siehe Kapitel 9.1). Die anderen Hemmnisse werden im Vergleich dazu weniger stark vertieft. Dabei wird insgesamt getrennt zwischen so genannten „allgemeinen“ Hemmnissen für den KWK-Ausbau, auf die hier nicht eingegangen wird, und den spezifischen Hemmnissen für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt, die hier im Fokus stehen.

9.1 Wirtschaftliche Hemmnisse

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird in ökonomischer Hinsicht im Wesentlichen durch folgende Hemmnisse erschwert:

- Zusätzliche Investitionen, Betriebs- und Transaktionskosten z. B. für Automatisierung, Flexibilisierungs-Optionen und Marktteilnahme
- Fernwirktechnik – Verfügbarkeit, Kosten und Standards
- Weniger Einnahmen durch reduzierte Auslastung (Volllaststunden)
- Konkurrenz mit Eigenstromnutzung bzw. Verkauf an Dritte
- Konkurrenz mit Teilnahme am Strommarkt (Spotmarkt, day-ahead bzw. intraday)
- Unattraktive Preise am Minutenreservemarkt.

9.1.1 Zusätzliche Investitionen, Betriebs- und Transaktionskosten

Für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt fallen im Vergleich zu bisheriger wärmegeführter Auslegung und Betriebsweise zusätzliche Investitionen, Kapital- und

Betriebskosten an. Sie wirken unterschiedlich hemmend. Die Investitionsmittel müssen gleich zu Beginn bereit gestellt bzw. finanziert werden und stehen für andere Maßnahmen nicht mehr zur Verfügung. Besonders hohe Summen, hohe/viele Risiken bzw. geringe/ungewisse Renditeaussichten sind in der Regel ein großes Hemmnis.

Dazu gehören im Wesentlichen die nötigen Investitionen in moderne Fernwirktechnik als technische Voraussetzung für netzgeführte Betriebsweisen, die Präqualifikation der Anlagen und ihre Einbindung in Leitwarten. Dafür werden in (Scherbinski, M. 2012a) etwa 3.000 bis 5.000 € pro Anlage als typische Kosten angegeben. Diese Kosten fallen nahezu unabhängig von der Größe der Anlage an, so dass die Wirtschaftlichkeit mit abnehmender Anlagenleistung stark sinkt und jedenfalls für Anlagen $< 100 \text{ kW}_{\text{el}}$ nicht gegeben ist (Scherbinski, M. 2012b). Wenn auch der kleinere Leistungsbereich erschlossen werden soll, dann sind kostengünstigere Fernwirktechniklösungen erforderlich (siehe folgendes Kapitel).

Durch die Teilnahme am Minutenreservemarkt kann es im Vergleich zur wärmegeführten Betriebsweise zu vermehrten Start- und Stopp-Vorgängen (Taktungen) kommen. Diese sowie kurze Laufzeiten ($< 1 \text{ h}$) erhöhen den Verschleiß und führen wegen der An- und Abfahrverluste zu schlechteren Wirkungsgraden (WM-BaWü 2009) (Müller, J. et al. o. J.). Daraus folgen jeweils höhere Betriebskosten, die vermieden werden wollen. Daher wird es darauf ankommen die Betriebsstrategie so anzupassen, dass so wenig wie möglich zusätzliche Taktungen (z. B. 1-2 pro Tag) auftreten und die Mindestlaufzeit von einer Stunde eingehalten wird: Dann dürften sich die Auswirkungen in Grenzen halten [MG-pers-120907]. Hinzu kommt besonders im Sommer ein häufigerer Teillastbetrieb (siehe Hemmnis „Sommerloch“, S. 176), mit dem niedrigere Wirkungsgrade (außer für die Brennstoffzelle) und damit ein höherer Brennstoffeinsatz und höhere Kosten verbunden sind.

Größere Potenziale und Beiträge zum Minutenreservemarkt können durch verschiedene Flexibilisierungsoptionen, wie z. B. Vergrößerung der Speicher, erzielt werden (siehe Kapitel 7.7.2). Dafür fallen je nach Option unterschiedlich hohe zusätzliche Investitionen (siehe Kapitel 7.7.4) und Folgekosten an. Da die betrachteten Flexibilisierungsoptionen kaum Synergieeffekte für den heutigen, wärmegeführten Betrieb beinhalten, sind (hinreichend) gute Renditeaussichten auf dem Strom- bzw. Minutenreservemarkt oder finanzielle Anreize durch den Gesetzgeber erforderlich, um die nötigen Investitionen auszulösen.

9.1.2 Fernwirktechnik – Verfügbarkeit, Kosten und Standards

BHKW mit Leistungen unter $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ sind (laut Expertenmeinung) in der Regel nicht mit der nötigen Fernwirktechnik⁴⁷ für eine Integration in virtuelle Kraftwerksverbünde bzw. eine Teilnahme am Regelenergiemarkt ausgestattet [41]. Die im Mini-KWK-Bereich ($\leq 20 \text{ kW}_{\text{el}}$) vorhandene Technik zielt in diesem Bereich bisher in der Regel nur auf ferngesteuerte Überwachung des Anlagenzustands (z. B. Störungserkennung) durch die Hersteller ab (Ortlieb,

47 Dabei handelt es sich auf der Anlagenseite um so genannte Fernwirk-Unterstellengeräte (z. B. Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Kommunikations-Schnittstellen, Systembus, Sende- und Empfangstechnik), die eine Überwachung und -steuerung der Anlage von einem oder mehreren räumlich entfernten Orten mittels signalumsetzender Verfahren ermöglicht.

O. 2012). Je älter sie ist, desto geringer ist ihre Kompatibilität mit den heutigen Kommunikationswegen und -anforderungen bzw. desto weniger Optionen bieten sie für die Fernsteuerung. Die Möglichkeiten und der damit verbundene Aufwand für einen ferngesteuerten strom- bzw. netzgeführten Betrieb im Bestand hängen daher von der bereits eingebauten Regler- und Kommunikationstechnik ab.

Für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt sind für kleine BHKW zunächst Investitionen in adäquate Fernwirktechnik nötig.⁴⁸ Da es diese laut Expertenmeinung für kleine Anlagen in der Breite noch nicht gibt [41], wird es sich um „Sonderanfertigungen“ handeln, für die die Anschaffungskosten unverhältnismäßig und damit prohibitiv hoch liegen werden. Beides zusammen wird daher eine Markteinführung zentral behindern. Die Kosten für die verfügbaren Systeme liegen nach Angaben eines Herstellers⁴⁹ mit etwa 2.000 bis 3.000 € pro Anlage noch ungünstig hoch [41]. Je nach Anlagengröße würde der Anteil dieser Zusatzkosten an den BHKW-Investitionen etwa 3 % (für 50 kW_{el} und 77.000 €) bis 11 % (5 kW_{el} und 22.000 €; [42]) ausmachen. Bei einer Laufzeit von ca. 20 Jahren wären zur Deckung allein dieser Kosten (ohne Zinsen) Erlöse in Höhe von etwa 125 € jährlich zu realisieren, z. B. durch Verrechnung mit den KWK-Zuschlägen für 2.500 kWh_{el} erzeugten Stroms. Die hemmende Wirkung nimmt mit sinkender Anlagenleistung zu und ist gerade für den hier betrachteten Bereich kleiner Anlagen als sehr stark einzustufen.

Bei einer Ausweitung des Marktes bzw. der Produktion kann allerdings noch mit erheblichen Kostensenkungen aufgrund von Skaleneffekten gerechnet werden. Von Herstellerseite aus wird z. B. eine Senkung der spezifischen Investitionen auf Werte unter 400 € pro Anlage als nötig und möglich erachtet [41].

Neben der verfügbaren Technik ist die Entwicklung und Einhaltung von (neuen) industriellen Standards sehr wichtig, um sie in Leitwarten von virtuellen Kraftwerksbetreibern einbinden zu können. Dazu kann z. B. der neue Industrie-Standard VHP_{READY} (Virtual Heat & Power Ready) von Vattenfall gezählt werden, der aus einem Katalog an technischen Anforderungen besteht, die Voraussetzungen für eine Einbindung von BHKW und Wärmepumpen in das neue eigene virtuelle Kraftwerk sind [26]. Dieser und die anderen Standards, die den Geschäftsmodellen der Unternehmen in der Tab. 4-8 zugrunde liegen werden, sind jeweils auf die eigenen Bedürfnisse und Ziele zugeschnitten. Ein einheitlicher, generell akzeptierter oder verbindlicher Standard, auf den sich die BHKW-Hersteller ausrichten könnten, fehlt somit noch. Eigene technische Entwicklungen und neue Geschäftsmodelle werden dadurch stark gehemmt, weil das Risiko für Fehlentwicklungen groß ist. Das Fehlen von einheitlichen verbindlichen Standards stellt ein weiteres wesentliches Hemmnis im Kontext der Fernwirktechnik dar.

48 Für BHKW mit einer Mindestleistung von 300 kW_{el} bietet die junge Firma Next Kraftwerke GmbH Fernwirktechnik an, um sie innerhalb eines BHKW-Pools am Minutenreservemarkt anzubieten. Dafür werde einmalig eine Poolgebühr erhoben, die von dem Unternehmen vorfinanziert und mit den anschließenden Angebotserlösen verrechnet werde [38].

49 WAGO Kontaktechnik GmbH & Co. KG (Minden)

9.1.3 Verminderte Einnahmen durch reduzierte Auslastung (Volllaststunden)

Durch die auf maximale Minutenreserve-Angebote ausgerichtete Einsatzoptimierung der BHKW wird die Auslastung und die Stromerzeugung stark reduziert. Die Verringerung liegt z. B. für den Wohngebäudetyp 2 (kleines MFH-Altbau) bei rd. 48 % bzw. etwa 14.700 kWh_{el}/a. Da für kleine Bestandsanlagen (≤ 50 kW_{el}) nach dem KWKG über einen Zeitraum von 10 Jahren ein Zuschlag in Höhe von 5,11 ct/kWh_{el} für jede erzeugte Kilowattstunde gewährt wird, resultieren daraus bei statischer Betrachtung jährliche Einbußen in Höhe von ca. 750 €. ⁵⁰ Für gleich große neue Anlagen gibt es nach dem KWKG-2012 nun die Wahlmöglichkeit, den auf 5,41 ct/kWh_{el} erhöhten KWK-Zuschlag für die Dauer von 10 Jahren oder von 30.000 Vollbenutzungsstunden zu erhalten. Wenn der Betreiber die Vollbenutzungsstundenoption wählt, dann kann er das Hemmnis kompensieren. Diese Option ist jedoch nur für Anlagen mit einer zu erwartenden Auslastung unter 3.000 h/a interessant, für alle anderen Fälle bleibt das Hemmnis bestehen (vgl. Kapitel 9.4.4).

Ferner können in Folge der Abnahme der Stromerzeugung für alle BHKW zusätzlich Einbußen durch kleinere Eigenstromnutzung (Stromgutschriften, s.u.) und ggf. kleinere Einspeisung (vermiedene Netzentgelte) anfallen (vgl. Kap. 7.1.3). Diese entstehen jedoch nur bei positiven Minutenreserve-Angeboten oder negativen Abrufen. Da letztere jedoch bisher nur in geringem Umfang vorkommen, werden sie bei den nachfolgenden Überlegungen nicht weiter berücksichtigt.

Um die oben dargestellten direkten wirtschaftlichen Nachteile wenigstens egalisieren zu können, müssten die erzielbaren Leistungspreise für positive Minutenreserve für Bestands-KWK beispielsweise beim Wohngebäudetyp 2 bei etwa 5 ct/kW_{el} · h liegen. Der maximale positive Leistungspreis im Jahr 2010 betrug jedoch nach [43] 1 ct/kW_{el}, während er nach [44] im Durchschnitt über den Tag kleiner war als 0,9 ct/kW_{el} · h. Die 2010er Preise am Minutenreservemarkt reichen also bei Weitem nicht zur Kompensation des dann fehlenden KWK-Zuschlages aus.

Das Hemmnis lässt sich auf Betreiberseite dadurch überwinden, dass nicht maximal angeboten, sondern die Betriebsweise nach ökonomischen Faktoren optimiert wird. Dazu gehört als einfachste Strategie, dass exklusiv oder vorrangig negative Minutenreserve angeboten wird, was die Auslastung ohne Abruf⁵¹ nicht reduziert. Nach dem Ablauf der Gewährung des KWK-Zuschlages fällt das Hemmnis weg, so dass die Einsatzstrategie geändert werden kann bzw. sollte.

⁵⁰ Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Hemmnis bzw. die Einbußen nicht über die gesamte, aber immerhin etwa 2/3 der Betriebszeit eines BHKW wirkt (bei einer unterstellten Lebensdauer von etwa 15 Jahren)

⁵¹ Im Falle von (zunehmenden) Abrufen können die fälligen Minutenreserve-Arbeitspreise als zusätzliche Erlöse angesehen werden, sofern nur mit Leistungspreisen größer gleich des „KWKG-Zuschlag“-Benchmarks angeboten wird. Ansonsten ist eine Mischkalkulation erforderlich.

9.1.4 Konkurrenz mit Eigenstromnutzung (inkl. Verkauf an Dritte)

Den eigenen Strombezug und/oder den von anderen Abnehmern durch den im BHKW erzeugten Strom zu reduzieren, stellt für Betreiber im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich einen der bedeutendsten wirtschaftlichen Faktoren dar. Der Grund dafür ist, dass der Strombezug hier (für Haushalte aktuell etwa 25 ct/kWh_{el}) im Vergleich zu den anderen Sektoren am teuersten ist (vgl. (BHKW-Forum 2012)) und die möglichen Erlöse damit deutlich über denen bei Einspeisung und Verkauf an den Netzbetreiber liegen (8 bis 13 ct/kWh_{el}) (Bachor und et al. 2010). Dabei ist von den Optionen bzw. Anforderungen her zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern (EFH und MFH) zu unterscheiden. Für den Verkauf des BHKW-Stroms an die Haushalte im MFH ist u.a. zusätzlicher Aufwand für Zählung, Abrechnung und ggf. Reservestrombezug erforderlich. Der Verkauf steht zudem unter dem Vorbehalt der Wahlfreiheit des Kunden hinsichtlich seines Stromversorgers und ist dem Risiko von Abnehmerwechseln und Leerständen ausgesetzt [vgl. (Bachor und et al. 2010) und (Musall und et al. o. J.)]. Die Eigenstromnutzung ist daher in EFH deutlich einfacher zu realisieren als in MFH.

Eine Untersuchung über „... verschiedene Betreibermodelle für Mikro-KWK-Anlagen im deutschen Wohngebäudesektor...“ kam zu dem Ergebnis, dass „sich für das Einfamilienhaus insbesondere⁵² der KWK-Eigenbetrieb ohne Netzeinspeisung des KWK-Stroms als finanziell attraktiv heraus stellte. Für ein MFH schnitt dagegen die Einbettung der Anlage in einem virtuellen Kraftwerk auf der Basis eines dafür unterstellten Vertrages im Vergleich zu den anderen untersuchten Betreibermodellen und zum Betrieb eines Brennwertkessels finanziell am besten ab (Emmerich 2010).

Die Eigenstromnutzung wird daher besonders im EFH-Bereich ein entscheidendes Hemmnis für netzgeführte BHKW und eine Teilnahme am Minutenreservemarkt sein. Hier ist zudem der wirtschaftliche Druck am größten, da die spezifischen Strombereitstellungskosten für Mikro-BHKW deutlich höher liegen als für größere Anlagen (Hinz 2011). Eine eigene grobe Schätzung der möglichen Einbußen am Beispiel des BHKW für WG-Typ 1 soll die Stärke des Hemmnisses verdeutlichen. Demnach liegen die direkten Gesamteinbußen (mit KWKG-Zuschlag und vNNE) ohne Transaktionskosten und ohne mögliche Erlöse am Minutenreservemarkt sowie ohne Berücksichtigung der Brennstoffkosten je nach Anteil der Eigennutzung zwischen ca. 260 €/a (100 %) und 700 €/a (0 %) und bei rd. 440 €/a für einen Anteil von 60 %⁵³ (siehe Tab. 9-1).

52 Anmerkung: Aussage gilt im Vergleich zum Verkauf an einen Netzbetreiber oder an Dritte

⁵³ Annahme für die Modellberechnungen.

Tab. 9-1: Mögliche Einbußen eines netzgeführten Betriebs im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb am Beispiel der EFH-BHKW-Anlage (Wohngebäude 1)

	Wärmegeführt	Netzgeführt		
Stromverbrauch [kWh _{el}]		3.200		
Stromerzeugung [kWh _{el}]	4.160	2.201		
Eigennutzungsanteil [%]	60	60	0	100
Eigenstromnutzung [kWh _{el}]	2.496	1.321	0	2.201
Einspeisung ins Netz [kWh _{el}]	1.664	880	2.000	0
Angebotene MR (o. Abruf) [kW·h]		4.447		
Stromkosten brutto (o. Grundgebühr) [€]		800		
Gutschrift für vermiedenen Strombezug [€]	-624	-330	0	-550
KWK-Zuschläge [€]	-213	-112		
Einspeisevergütung (üblicher Preis) [€]	-73	-39	-97	0
Vermiedene Netzentgelte [€]	-17	-9	-22	0
Stromkosten netto [€]	-126	310	569	137
Einbußen durch netzgeführten - im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb (ohne Brennstoffkosten)		436	695	264

Zusätzliche Annahmen: Strompreis=25 ct/kWh_{el}; KWK-Zuschlag=5,11 ct/kWh_{el}; Üblicher Preis=4,4 ct/kWh_{el}; Vermiedenes Netzentgelt=1 ct/kWh_{el}; Quelle: Eigene Berechnungen

Im MFH-Bereich ist zu erwarten, dass die hemmende Wirkung der Eigenstromnutzung von der weiteren Entwicklung entsprechender Verkaufsmodelle abhängt. Je schneller (langsamer) sie bekannt und erfolgreich werden, um so schwerer (günstiger) wird es prinzipiell für eine alternative Vermarktung am Minutenreservemarkt. Die analog zum EFH abgeschätzten Einbußen in Abhängigkeit des Eigenanteils liegen hier insgesamt zwischen etwa 2.000 €/a (100 %) und 5.200 €/a (0 %) im Jahr bzw. bei rd. 3.300 €/a für einen Anteil von 60 %.

Unabhängig davon können die in diesem Kontext (Verkauf an Dritte) bei den Betreibern oder Dritten gesammelten Erfahrungen später zum Teil auch für andere Vermarktungswege, wie z. B. Minutenreserveangebote, nützlich sein. Die möglichen Verkaufsmodelle „im Haus“ stehen umgekehrt selber bereits in Konkurrenz zu dem Geschäftsmodell z. B. von Lichtblick, die ihre Anlagen stromgeführt betreiben und mit ihnen ein virtuelles Großkraftwerk aufbauen wollen. Von einer solchen stromgeführten Betriebsweise und Vermarktung am Strommarkt zu einer netzgeführten Betriebsweise und Vermarktung am Regelleistungsmarkt ist es dann nur noch ein relativ kleiner Schritt.

Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass das Thema Eigenstromnutzung im EFH-Bereich ein stärkeres Hemmnis für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt darstellt als im MFH-Bereich. Die hemmende Wirkung wird mit weiter steigenden Strompreisen zunehmen, wenn es nicht auch zu entsprechenden Preissteigerungen auf dem Minutenreservemarkt kommt.

9.1.5 Konkurrenz mit Teilnahme am Strommarkt

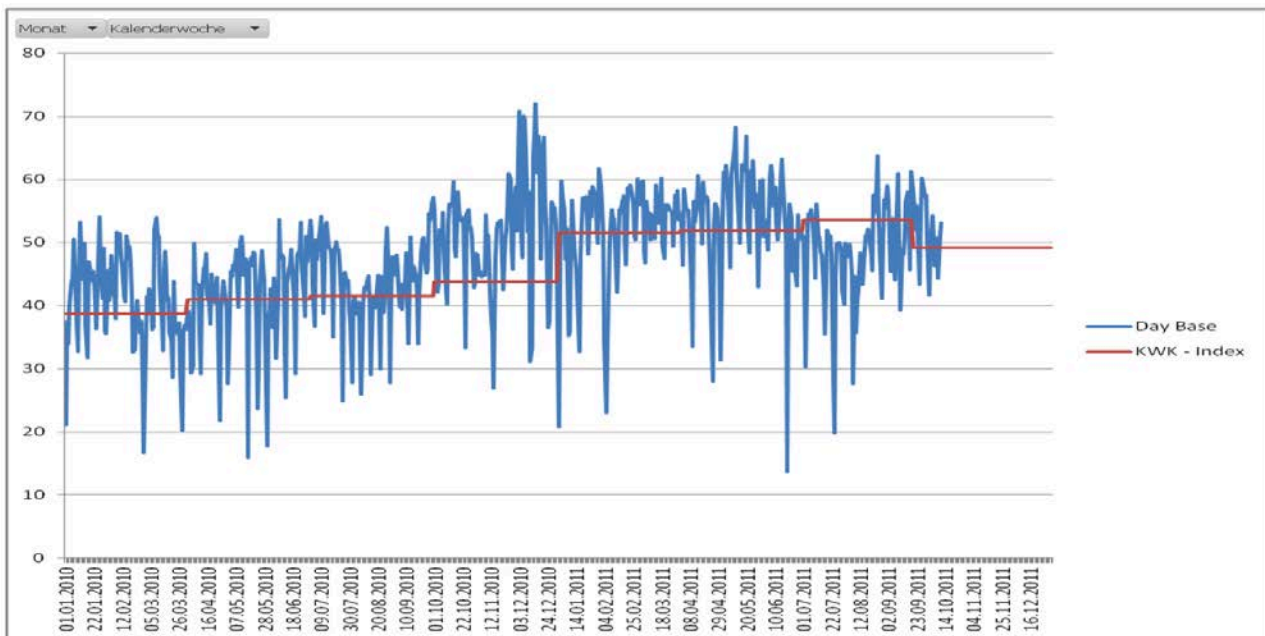
Neben der sehr attraktiven Eigennutzung des BHKW-Stroms kommen als Alternative zur Teilnahme am Minutenreservemarkt noch verschiedene Vermarktungsmöglichkeiten bezogen auf den Strommarkt in Frage. Zum einen der Verkauf des Stroms an Stromhändler, zum anderen der Verkauf an der Strombörse. Letztere Option, konkret der Spotmarkt⁵⁴, wird nachfolgend näher betrachtet, da sie von den Strukturen her besser und interessanter mit dem Minutenreservemarkt zu vergleichen ist.

Der Spotmarkt ist unterteilt in den *day-ahead* (tägliche Auktion bezogen auf die 24 h des Folgetages) und den *intraday*-Handel (kurzfristige Auktionen zum untertägigen Ausgleich). Beide Teilmärkte zeichnen sich im Vergleich zum Minutenreservemarkt dadurch aus, dass Kontrakte auf Stundenbasis möglich sind und dass das Mindestvolumen und die Mindestschrittweite für Gebote 0,1 MW_{el} betragen. Die Betreiber von BHKW müssen sich demnach mit ihren Anlagen zeitlich weniger festlegen bzw. die Betriebsweise braucht weniger stark geändert werden. Die Anlagen können mit höherer Prognosesicherheit auch sehr kurzfristig auf dem *intraday*-Markt eingesetzt werden und es müssen deutlich weniger Anlagen für ein Mindestgebot gepoolt werden. Dies begünstigt insbesondere die Möglichkeiten einer Marktteilnahme von kleinen BHKW.

Neben diesen regulatorischen Vorteilen des Spotmarktes gegenüber dem Minutenreservemarkt bietet er derzeit auch in ökonomischer Hinsicht Vorteile. Dazu wird für Anlagen innerhalb des KWKG-Förderregimes der Verkauf des Stroms zum üblichen Preis an den Netzbetreiber als Benchmark für zusätzliche Erlöse herangezogen. Diesbezüglich bietet eine Teilnahme am Spotmarkt den prinzipiellen Vorteil, dass durch einen stundengenauen Verkauf zu Zeiten höherer *base*-Preise als dem üblichen Preis (*base*-Preis-Quartalsdurchschnitt) Mehreinnahmen gegenüber dem unregulierten (Grundlast)Verkauf generiert werden können (siehe Abb. 9-1). Eine Analyse für das Jahr 2009 ermittelte diesbezüglich mögliche Mehreinnahmen durch eine optimierte Vermarktung innerhalb eines virtuellen Kraftwerks in Höhe von 16 % (Simon 2010). Die Abb. 9-2 unten legt zudem nahe, dass bereits systematisches Bieten z. B. im Zeitraum von 11 bis 14 und 19 bis 24 Uhr zu relativ sicheren Mehreinnahmen führen kann. Es ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund zurückgehender *spreads* am Strommarkt die Mehreinnahmen geringer ausfallen.

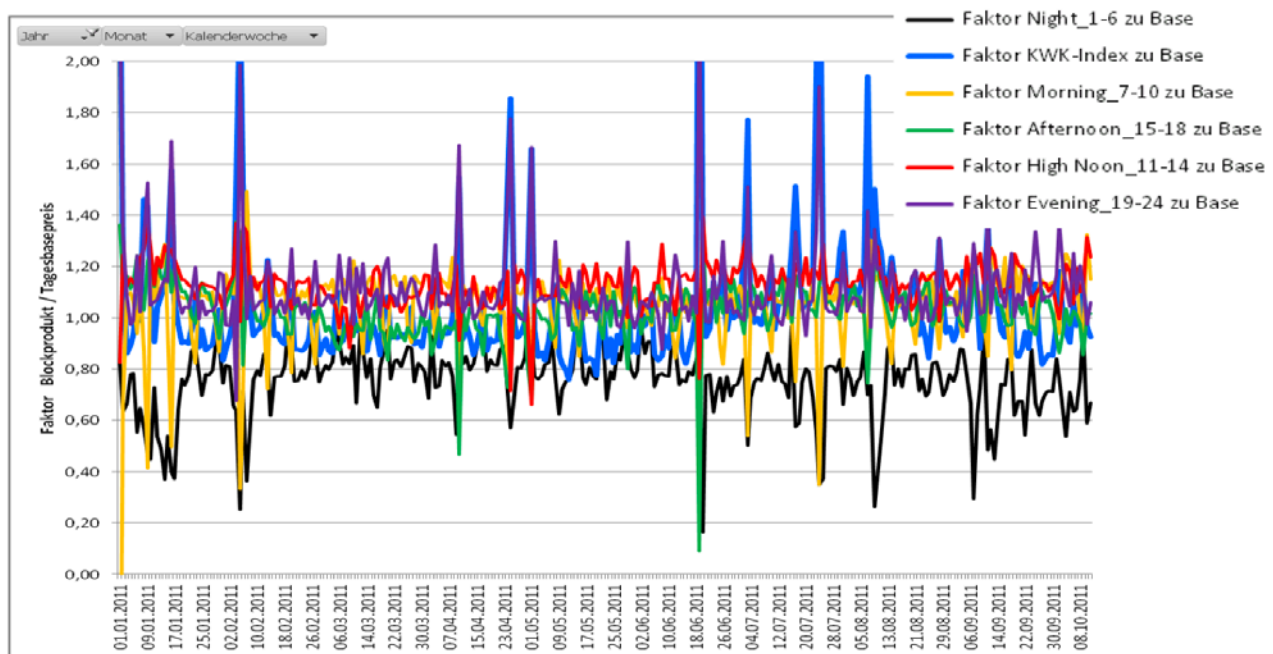
⁵⁴ Der Terminmarkt ist für BHKW im Vergleich zum Spotmarkt weniger geeignet, da die Laufzeit der Kontrakte zwischen Wochen und Jahren (höhere Prognoseunsicherheit für BHKW) und die Handelsmenge um etwa einen Faktor 2,5 höher liegt (höherer Wettbewerb) (EEX 2012)

Abb. 9-1: Vergleich von täglichen base-Preisen mit dem KWK-Index im Zeitraum in €/MWh (2010-2011)



Quelle: (Hinz 2011)

Abb. 9-2: Vergleich von täglichen base-Preisen mit dem KWK-Index im Zeitraum in €/MWh (2010-2011)



Quelle: (Hinz 2011)

Dagegen können am heutigen Minutenreservemarkt im Vergleich dazu nur bei hinreichend hohen Leistungspreisen sicher höhere Erlöse als durch den üblichen Preis erzielt werden. Die möglichen zusätzlichen Arbeitspreiserlöse werden aufgrund der bisher seltenen Abrufe nicht berücksichtigt. Da die Leistungspreise (monatlicher Durchschnitt) für die Vorhaltung von positiver Minutenreserve in den Jahren 2009 und 2010 unter denen für die negative Minutenreserve lagen und dafür zudem weitere Einnahmen (z. B. KWK-Zuschläge, s. o.) ausfallen, werden für den Vergleich hier nur die Leistungspreise für die Vorhaltung negativer Minutenreserve betrachtet. Diese liegen für das betrachtete Jahr 2010 umgerechnet auf die

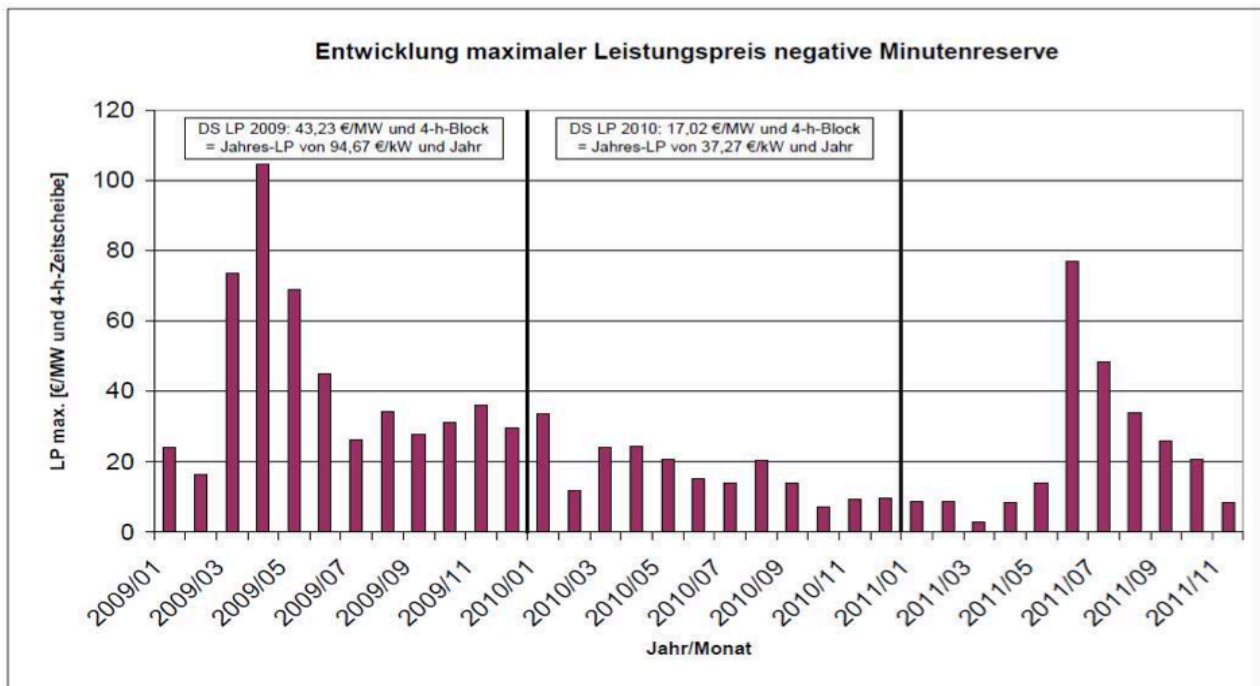
eingespeiste Strommenge während vier Stunden Vorhaltezeit von 1 MW_{el} im Durchschnitt (ca. 17 €/MW_{el}) bzw. Maximum (ca. 33 €/MW_{el}) bei 4,3 bzw. 8,3 €/MWh (s.u.). Sie liegen damit selbst in der Spitze um etwa einen Faktor fünf unterhalb des üblichen Preises in Höhe von ca. 44 €/MWh (mittlerer base-Preis für Deutschland und Österreich 2010; (Pressemitteilung o. J.)). Im Jahr 2009 sah es mit im Durchschnitt umgerechnet etwa 10,8 €/MWh (maximal ca. 26,3 €/MWh möglichen Erlösen für vorgehaltenen negative Minutenreserve besser aus, sie blieben dennoch deutlich unter dem mittleren base-Preis in Höhe von ca. 51,1 €/MWh (Pressemitteilung o. J.)). Im Jahr 2011 lagen die Leistungspreise zwischen denen der Jahre 2009 und 2010 (siehe Abb. 9-3).

Dieser hohe Preisabstand lässt den Spotmarkt im direkten Vergleich und aus heutiger Sicht auch für Anlagen, die nach zehn Jahren aus der Gewährung des üblichen Preises herausfallen, attraktiver als den Minutenreservemarkt erscheinen. Allerdings dürfte sich der weitere Ausbau insbesondere von Windkraft und Photovoltaik in Zukunft eher zu Gunsten einer Teilnahme am Minutenreservemarkt auswirken. Zum einen da erwartet wird, dass durch die Einspeisung von grenzkostenfreiem Wind- und PV-Strom die Preisspannen am Spotmarkt weiter sinken werden (Matthes 2011). Dadurch werden die Erlösmöglichkeiten von Einsatzstrategien, die auf das Ausnutzen von Preisschwankungen setzen, sinken. Zum anderen dürften in diesem Kontext der Bedarf insbesondere an der Vorhaltung, aber auch an der Abrufhäufigkeit von Minutenreserve steigen. Insbesondere ein häufigerer Abruf würde bei heutigen durchschnittlichen Arbeitspreisen (2010: ca. 50-100 €/MWh) für negative Minutenreserve die ökonomischen Vorteile des Spotmarkts (über)kompensieren.

9.1.6 Unattraktive Preise am Minutenreservemarkt

Die im Jahr 2010 monatlich maximal erzielbaren Leistungspreise für negative Minutenreserve lagen zwischen etwa 7 und 33 € pro MW_{el} und 4-Blöcke, der Jahresdurchschnitt bei rd. 17 € (siehe Abb. 9-3 Bezogen auf eine Zeitscheibe von vier Stunden ohne Abruf entspricht dies einem erzielbaren Erlös von im Durchschnitt bzw. Maximum 4,3 bzw. 8,3 €/MWh für den eingespeisten Strom. Dies liegt deutlich unter den Erlösen der anderen zuvor dargestellten Optionen (Eigenstromnutzung, Verkauf zum üblichen Preis oder am Spotmarkt). Eine möglichst häufige bzw. unregelmäßige Teilnahme am Minutenreserve ist daher nicht wirtschaftlich. Der Sprung in die Wirtschaftlichkeit könnte nur erreicht werden durch wenigstens eine Größenordnung höhere durchschnittliche Leistungspreise als heute und/oder durch häufigeren Abruf, der im Jahr 2010 eine zusätzliche Arbeitspreisvergütung von 50-100 €/MWh eingebracht hätte.

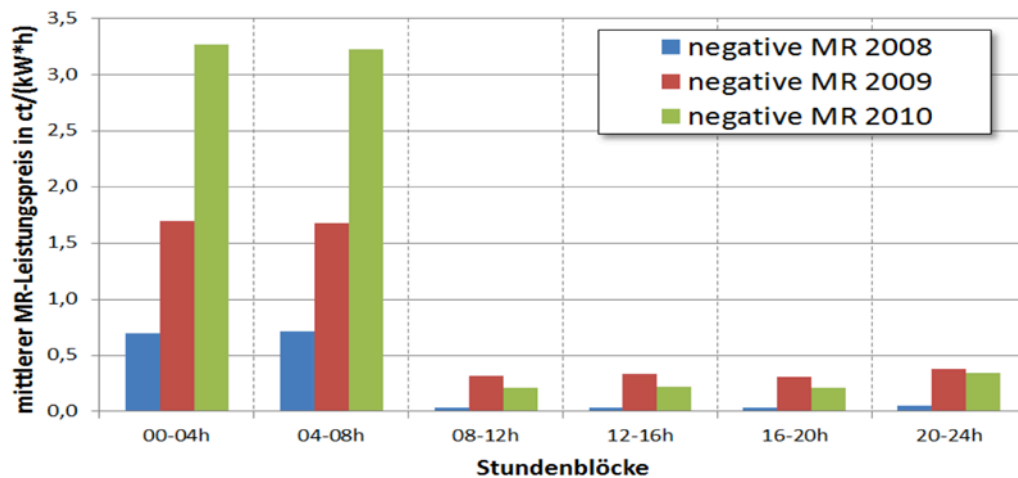
Abb. 9-3: Monatliche Leistungspreise für negative Minutenreserve (2009-11/2011)



Quelle: (BalancePower 2012)

Die ökonomische Bewertung ändert sich jedoch, wenn die Entwicklung differenziert nach Zeitscheiben über den Tag betrachtet wird. Demnach hat sich der durchschnittliche Leistungspreis für negative Minutenreserve bezogen auf die Zeitscheiben 0-4 und 4-8 Uhr zwischen 2008 und 2010 von Jahr zu Jahr etwa verdoppelt und ist von ca. 7 €/MW · h (2008) bis auf ca. 33 €/MW · h (2010) angestiegen (siehe Abb. 9-4; (FFE 2010)). Diese Zeitscheiben sind für BHKW-Anlagen mit ausreichendem Speicher in der Regel gut für eine Vorhaltung und besonders gut auch für einen Abruf von negativer Minutenreserve geeignet. Der Wärmebedarf ist in dieser Zeit überwiegend niedrig, steigt zum Ende hin aber an, so dass eine Beladung des Speichers ohnehin sinnvoll ist und im Abruffall die Anlage ohne Kesseleinsatz heruntergefahren werden kann. Allerdings dürften steigende Angebote zu diesen Zeiten, z. B. durch BHKW, zugleich preisdämpfend wirken und damit den möglichen Vorteil selber kompensieren.

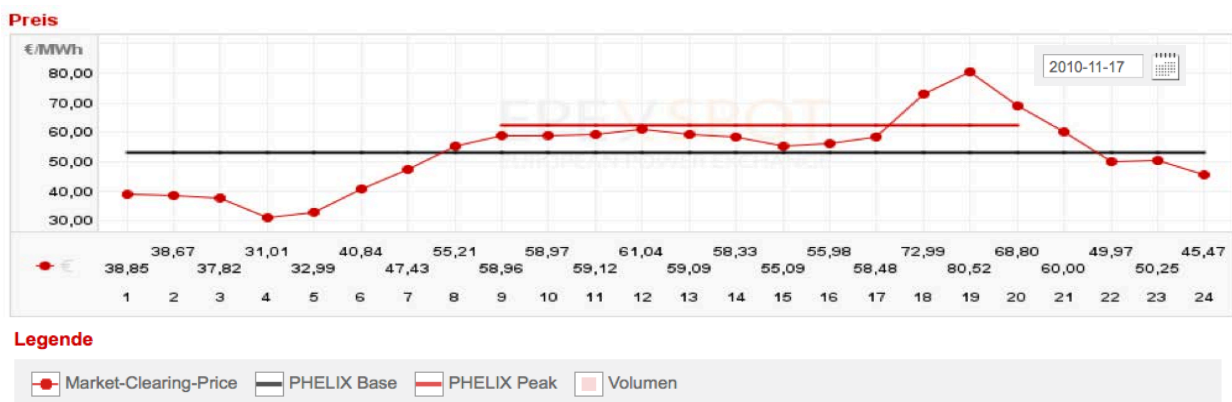
Abb. 9-4: Durchschnittliche Leistungspreise für negative Minutenreserve nach Zeitscheiben (2008-2010)



Quelle: (FFE 2010)

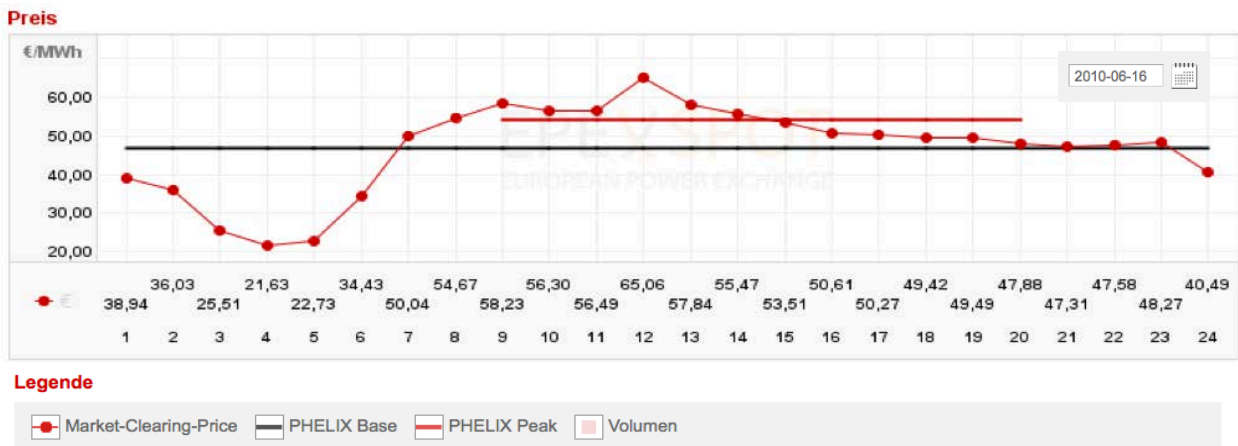
Abb. 9-5: Beispielhafte tägliche Entwicklung des Spotmarktpreises (market-clearing-price) an einem dritten Mittwoch im November 2010

Die im Jahr 2010 in diesen beiden Zeitscheiben (von 0-8 h) im Jahresdurchschnitt erzielbaren direkten Erlöse von knapp über 30 €/MW · h sind deutlich attraktiver und können mit den zeitgleichen – in der Regel relativ tiefen - Preisen am Spotmarkt (besser) konkurrieren. Dazu sind in der Abb. 9-5 und Abb. 9-6 exemplarisch die Tagesverläufe des market-clearing-price am Spotmarkt der EEX für einen Tag im Juni und im Dezember 2010 dargestellt, die zwischen 0 und 8 mit ca. 20 bis 40 €/MWh jeweils deutlich unter dem *base*-Preis liegen.



Quelle: (EEX 2012)

Abb. 9-6: Beispielhafte tägliche Entwicklung des Spotmarktpreises (market-clearing-price) an einem dritten Mittwoch im Juni 2010



Quelle: (EEX 2012)

9.2 Technische Hemmnisse

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird in technischer Hinsicht im Wesentlichen durch folgende Hemmnisse erschwert:

- Bisherige Auslegung und wärmegeführter Betrieb
- Teilweise fehlende Einbaumöglichkeiten für Flexibilisierungsmaßnahmen
- Fehlende Fernwirktechnik für kleine BHKW*
- Teillastbetrieb*
- Häufigeres An- und Abfahren*
- Niedriger Deckungsgrad im Sommer ("Sommerloch")
- Mögliche Restriktionen im Rahmen der Netzanschlussregelungen.

Die mit dem * markierten Hemmnisse sind zwar zunächst technischer Natur, wirken sich aber besonders ökonomisch aus und wurden daher bereits im Kapitel 9.1 diskutiert.

9.2.1 Bisherige Auslegung und wärmegeführter Betrieb

Die bestehenden BHKW-Systeme sind in Deutschland bisher in der Regel auf die Deckung der thermischen Grundlast (ca. 30 % der max. Heizlast) ausgelegt und werden wärmegeführt betrieben. Dies beinhaltet, dass die Wärmespeicher häufig nur so groß sind, dass sie eine Stunde lang Wärme im Nennlastbetrieb aufnehmen können. Eine einzelne Anlage mit ausreichender Mindestgebotsgröße könnte daher negative Minutenreserve bei mangelndem Wärmebedarf (z. B. nachts) entweder gar nicht oder nur mit 25 % der Leistung anbieten, da die geforderte Gebotsdauer vier Stunden beträgt. Ein hinreichend großer Anlagenpool würde das Hemmnis überwinden, er müsste aber im Vergleich zu (einem Pool von) Anlagen mit vier mal so großem Speicher wenigstens vier mal so viele Anlagen umfassen. Das technische Minutenreservepotenzial für BHKW wird durch ihre bisher übliche Auslegung stark begrenzt (vgl. Kapitel 5.3).

Neben den technischen Restriktionen dürfte die bisherige „gelebte“ Praxis auch als soziales „Trägheitsmoment“ hemmend wirken (siehe Kap. 7.5).

9.2.2 Teilweise fehlende Einbaumöglichkeiten für Flexibilisierungsmaßnahmen

Flexibilisierungsmaßnahmen, wie z. B. eine Vergrößerung der Anlage und/oder des Wärmespeichers, können das technische Potenzial von BHKW zur Teilnahme am Minutenreservemarkt deutlich erhöhen (siehe Kapitel 7.7). Insbesondere in Wohngebäuden und hier bei Einfamilienhäusern, kann dies jedoch durch räumliche Beschränkungen erschwert oder verhindert werden. Dabei wirken neben der begrenzten Stellfläche (inklusive des benötigten Platzes für Wartung und Montage) insbesondere die Deckenhöhen und Türbreiten als begrenzende Faktoren. Eine Vergrößerung des Pufferspeichers ist hiervon besonders betroffen, da in Wohngebäuden bei den üblichen lichten Deckenhöhen von etwas mehr als 2 m in der Regel nur eine Kaskade von 2 oder 3 Speichern nebeneinander in Frage kommt. Neben der Platzfrage ist weiterhin zu klären, ob die Statik des Gebäudes die hohe zusätzliche Belastung aushält. Ein üblicher Speicher (rd. 3.500 l) für ein BHKW mit 50 kW_{el} hat etwa ein Gewicht von 4,5 t auf 1,5 qm und weist damit eine etwa 4,3 mal so hohe statische Belastung wie das BHKW-Modul auf (BHKW-Consult 2012b).

Der Flächenbedarf für BHKW-Anlagen ist im Vergleich zur üblichen Speichergroße zwar höher, nimmt aber mit steigender Leistung weniger stark zu: Er beträgt etwa 3-5 qm für ca. 5 kW_{el} (Dachs von Senertec), 7-8 qm für 50 kW_{el} und 10-12 qm für 110 kW_{el} (jeweils von Sokratherm) (BHKW-Consult 2012b). Je kleiner das Gebäude bzw. die vorhandene Nutzfläche desto schwieriger wird eine Flexibilisierung von BHKW. Dies betrifft vor allem Einfamilien- und kleine Mehrfamilienhäuser. In großen Mehrfamilienhäusern, Hochhäusern sowie Nichtwohngebäuden dürften die Restriktionen dagegen deutlich schwächer ausfallen.

Für einen Einsatz von Notkühlern (Flex3) würde weitere zusätzliche Stellfläche (inkl. Abstandsflächen zu den Wänden) benötigt, z. B. etwa 3-5 qm (8-10 qm) für eine Leistung von 30 kW_{th} (50-80 kW_{th}) bei Luftkühlung (BHKW-Consult 2012b). Weitere wichtige Hemmnisse sind ihr relativ hohes Gewicht (Statik- und Montageprobleme) und ihre Lärmbelästigung, die zu großen Akzeptanzproblemen insbesondere im Wohnbereich führen dürfte.

9.2.3 Niedriger Deckungsgrad im Sommer ("Sommerloch")

Der Anstieg der Lufttemperaturen führt besonders im Sommer und im Altbaubereich zu einem starken Rückgang des zu deckenden Wärmebedarfs und damit zu stark reduzierten Einsatzmöglichkeiten für die BHKW. Der Speicher behält einen hohen Füllstand und kann weniger zur Flexibilisierung beitragen. Das technische Potenzial zur Vorhaltung von Minutenreserve geht dadurch im Vergleich zum Winter um etwa mehr als die Hälfte zurück (siehe z. B. Abb. 6-5). Für Angebote über eine Zeitscheibe von vier Stunden müssen daher vorzugsweise mehr Anlagen gepoolt werden, um abwechselnd weiterhin mit Volllast betrieben werden zu können, oder die Anlagen können häufig nur mit Teillast angeboten werden. Damit steigt der Vermarktungsaufwand oder es kommt zu niedrigeren elektrischen (teilweise auch

thermischen) Wirkungsgraden⁵⁵ und höhere Betriebskosten. Das „Sommerloch“ stellt daher ein wesentliches Hemmnis für die potenzielle Teilnahme am Minutenreservemarkt dar.

Theoretisch böte es sich für den Sommer zwar an, nur bzw. überwiegend positive Minutenreserve anzubieten, da ein Abruf der Leistung bisher nur in geringem Umfang erfolgt. Das Angebot muss jedoch den Einsatz der Anlage über den gesamten Zeitraum (aktuell vier Stunden) garantieren können. Ansonsten lässt sich die hemmende Wirkung des „Sommerlochs“ nur durch eine zusätzlich angekoppelte Kälteerzeugung und/oder den Einsatz eines Notkühlers verringern.

9.2.4 Mögliche Restriktionen im Rahmen der Netzanschlussregelungen

Für den Netzanschluss an das Niederspannungsnetz gilt seit August 2011 die Richtlinie VDE-AR-N 4105. Sie schreibt eine neue maximale Spannungsänderung von $\pm 3 \%$ (zuvor $\pm 2 \%$) durch dezentrale Einspeiser vor. Diese Anhebung stellt eine Verbesserung für die Einspeisemöglichkeiten dar, da das Spannungsband nun weniger schnell verletzt werden kann. Es wird aber vereinzelt über Probleme beim Verfahren und der Umsetzung berichtet: In der Praxis werden laut [energyconsulting 2011] „Einzelfallprüfungen, ob negative Auswirkungen für die Stromverbraucher zu erwarten sind ... von den Verteilnetzbetreibern nicht zugelassen“. Zudem werde in einzelnen, explizit genannten Fällen im Vergleich zur Entnahmeleistung nur eine deutlich kleinere Einspeiseleistung zugelassen. Eine solche Handhabung der Richtlinie könnte besonders für die Flexibilisierungsoption „Größere Anlagenleistung“ ein Hemmnis darstellen. Die Wirkungstiefe des möglichen Hemmnisses kann aufgrund der wenigen bekannten Einzelfälle nicht abschließend beurteilt werden, erscheint aber eher gering. Letztlich dürfte es um die Frage zu gehen, wie die regelkonformen Ansprüche von kleinen, dezentralen Einspeisern besser durchgesetzt werden können und inwiefern die Regelung daraufhin ggf. verbessert werden kann.

9.3 Ökologische Hemmnisse

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird in ökologischer Hinsicht im Wesentlichen durch folgende Hemmnisse erschwert:

- Höhere CO₂-Emissionen beim Übergang vom wärmegeführten zum netzgeführten Betrieb
- Teils leicht höhere CO₂-Emissionen beim Übergang vom netzgeführten zum flexibilisierten Betrieb
- Verlust des „Umweltfreundlichkeits-Bonuses“ durch sinkenden thermischen Deckungsbeitrag und bei Notkühlereinsatz.

9.3.1 Höhere CO₂-Emissionen beim Übergang vom wärmegeführten zum netzgeführten Betrieb

Durch den Übergang vom wärmegeführten zum netzgeführten Betrieb nimmt die Wärme- und Stromerzeugung aus den BHKW deutlich ab. Dies wird durch erhöhten Spitzenkessel-Einsatz

⁵⁵ Die elektrischen Wirkungsgrade von BHKW sinken bei Reduktion auf 50 % der Nennlast um mehrere Prozentpunkte (z. B. bei Buderus-Anlagen um etwa 5 Prozentpunkte; (BHKW-Consult 2012c).

und zusätzlichen Strombezug aus dem Netz kompensiert und führt damit zu höheren CO₂-Emissionen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb. Dadurch fällt die mögliche CO₂-Einsparung durch die netzgeführten BHKW-Systeme im Vergleich zum jeweils ungekoppelten Referenzsystem für die betrachteten Versorgungsfälle um ca. 7 bis 11 Prozentpunkte geringer aus als für den wärmegeführten Betrieb (vgl. Kapitel 8.2f). Dies bedeutet etwa eine Halbierung der möglichen Einsparungen und schmälert damit deutlich die ökologischen Vorteile der BHKW, was dazu führen kann, dass eine Teilnahme am Minutenreservemarkt aus energie-/umweltpolitischer Sicht als nicht opportun eingestuft und demzufolge eher behindert als gefördert wird. Als Referenz wird aber künftig, zwecks besserer Integration von EE-Strom, zunehmend eine stromgeführte Betriebsweise herangezogen werden müssen, die im Vergleich zu heute ebenfalls mit höheren CO₂-Emissionen einhergehen wird. Die Relevanz des Hemmnisses wird dadurch gemindert.

Zudem ist die o.g. Bewertung der CO₂-Emissionen methodisch bedingt (s.u.) noch nicht vollständig. Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt kann dazu beitragen, thermische Kraftwerke ohne Wärmenutzung von diesem Markt zu verdrängen. Im diesem Fall können BHKW die CO₂-intensiveren Regelleistungskapazitäten ersetzen und damit die CO₂-Emissionen des Minutenreservemarktes reduzieren helfen. Dafür könnte der netzgeführte BHKW-Einsatz eine CO₂-Gutschrift erhalten. Eine quantitative Bewertung ist aber aufgrund fehlender Kenntnis der CO₂-Emissionen des Regelleistungsmarktes und ohne detaillierte Modellberechnungen bezogen auf die genannten Zusammenhänge und möglichen Entwicklungen des Gesamtsystems nicht möglich.

9.3.2 Teils höhere CO₂-Emissionen beim Übergang vom netzgeführten zum flexibilisierten Betrieb

Auch ein Wechsel vom netzgeführten zum flexibilisierten Betrieb führt in wenigen der betrachteten Fälle zu einem deutlichen weiteren Anstieg der CO₂-Emissionen. Dazu gehört hauptsächlich der Notkühlereinsatz (Flex-3) bei den BHKW für den Wohngebäudetyp 1 (EFH-Altbau) und 5 (kl. MFH-EnEV2007) mit einem Anstieg um etwa 24 und 16 % sowie für den Wohngebäudetyp 2 (kl. MFH-Altbau), mit einem Anstieg von ca. 6 % (vgl. Kapitel 8.2f). Dies liegt in den ersten beiden Fällen speziell an der niedrigen SKZ der Stirlingmaschine und kann prinzipiell anlagenseitig, z. B. durch Einführung von Brennstoffzellen mit höherer SKZ, kompensiert werden.

Ansonsten liegen die CO₂-Mehremissionen für die betrachteten Wohngebäude zum größten Teil unter 2 % und bei den Nichtwohngebäuden sämtlich unter 1 %. Allerdings können die CO₂-Emissionen durch die Vergrößerung der Anlagenleistung (Flex-1) im Vergleich zum netzgeführten Betrieb auch deutlich gesenkt werden, bei Nichtwohngebäuden um 4 bis 6 % und bei Wohngebäuden bis auf zwei Ausnahmen um 1 bis 6 %.

Die aus der betrachteten Flexibilisierung resultierenden CO₂-Mehremissionen stellen daher nur in Ausnahmefällen ein wesentliches (zusätzliches) Hemmnis dar. Gleichwohl sollten bei einem Paradigmenwechsel von wärmegeführter zu netzgeführter bzw. zu flexiblierter Fahrweise tendenziell vorrangig solche BHKW-Systeme zum Einsatz kommen, die pro kW·h bereitgestellter Minutenreserve möglichst geringe CO₂-Mehremissionen gegenüber der wärmegeführten Basisvariante aufweisen (vgl. Abb. 8-8, Abb. 8-15, Abb. 8-19 und Abb. 8-23).

9.3.3 Verlust des „Umweltfreundlichkeits-Bonus“ durch sinkenden thermischen Deckungsbeitrag und Notkühlereinsatz

Der Vorteil der KWK liegt in ihrer umweltfreundlichen Bilanz, wenn Wärme und Strom mit insgesamt hohem Wirkungsgrad erzeugt und genutzt werden können. Dafür ist eine hohe Auslastung vorteilhaft. Der Übergang vom wärmegeführten zum netzgeführten Einsatz führt jedoch – außer im Fall einer Auslegung auf die thermische Spitzenlast (siehe Lichtblick-Modell, Tab. 4-8) – zu einem geringeren Deckungsbeitrag der betrachteten BHKW an der Wärmeversorgung der Objekte sowie an der Gesamtstromerzeugung. Dies läuft den aktuellen politischen KWK-Ausbauzielen (25 % Anteil an der Nettostromerzeugung im Jahr 2020) zu wider und erscheint wenig opportun mit der grundsätzlichen Erwartung eines hohen KWK-Anteils. In der Darstellung nach außen kommt erschwerend hinzu, dass der sinkende Deckungsbeitrag offensichtlicher wird und quantifiziert werden kann, während der Zusatznutzen für die Integration von Strom aus erneuerbaren Energien via Bereitstellung von Minutenreserve nur mittelbar dargestellt und nicht quantifiziert werden kann.

Der Einsatz eines Notkühlers führt – wenn auch überwiegend nur in geringem Umfang – zur Aufhebung des KWK-Prinzips. Es wird gezielt in Kauf genommen, Wärme zu produzieren, die dann „weggekühlt“ werden muss (ineffiziente Ressourcennutzung), um mehr Minutenreserve anbieten zu können. Zum einen wird damit die zentrale Argumentation (Umweltfreundlichkeit, Ressourcen- und Energieeffizienz) für den Ausbau und die Nutzung von KWK geschwächt, während der potenzielle einschlägige Nutzen zur EE-Strom-Integration nur schwer darzulegen ist. Zum anderen sind dann kleine BHKW ($\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$) nicht mehr gemäß § 8 (2) KWKG von der monatlichen Mitteilungspflicht über die eingespeiste Strommenge befreit. Die Anlagenbetreiber erhalten zudem für den Strom ohne Wärmenutzung keine KWK-Zuschlag mehr. Damit sind Einnahmenverluste und ein erhöhter bürokratischer Aufwand verbunden, wodurch ein Notkühlereinsatz auch in ökonomischer und sozialer Hinsicht deutlich gehemmt werden dürfte.

Beide Faktoren können die allgemeine Akzeptanz und Motivation für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt stark hemmen. Dies gilt zudem in rechtlicher und politischer Hinsicht besonders für einen Einsatz von Notkühlen zur Steigerung der Flexibilität.

9.4 Politische und rechtliche Hemmnisse

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird in politischer, gesetzlicher bzw. förderrechtlicher Hinsicht im Wesentlichen durch folgende Hemmnisse erschwert:

- Fehlende Regelungen im KWKG zu netzgeführter Einsatzweise und zu virtuell miteinander verbundenen BHKW
- Unklare (und abweichende) Anforderungen an einen stromgeführten Betrieb bei der neuen, seit 2012 bestehenden, Förderung von Mini-KWK-Anlagen
- Falsche Anreize bei Zuschlägen für (größere) Wärmespeicher (Flex-2) im KWKG 2012
- Zu wenig Anreize durch die Wahlmöglichkeit für die Dauer der KWK-Zuschläge
- Wegfall der Stromsteuer-Erstattung für virtuell gekoppelte BHKW mit einer Gesamtleistung über 2 MW_{el} .

9.4.1 Fehlende Regelungen im KWKG zu netzgeführtem Betrieb und virtuell miteinander verbundenen BHKW als Regelkraftwerke

Das novellierte KWKG (BKWK 2012) enthält explizit weder Definitionen noch Regelungen zum Thema netzgeführte BHKW und virtuelle BHKW-Kraftwerke. Die damit verbundenen Unsicherheiten und die jetzigen relativ weichen Anforderungen an die Steuer- und Regelung der Anlagen stellen ein Hemmnis bzw. Risiko für neue Geschäftsmodelle dar. Aktuell wird allein die Zuschlaggewährung für den Neu- bzw. Ausbau von Wärme- und Kältespeichern⁵⁶ (§ 5b KWKG) u.a. an die Bedingung geknüpft, dass „... die KWK-Anlage über Informations- und Kommunikationstechnik verfügt, um Signale des Strommarktes zu empfangen und technisch in der Lage ist, auf diese zu reagieren...“. Diese Anforderung kann von den Herstellern und Betreibern unterschiedlich ausgelegt werden und wird in einfachen Fällen (unidirektionale Kommunikation verbunden mit ferngesteuerter Ein- und Ausschaltung) den Anforderungen von virtuellen (Regel-)Kraftwerken nicht genügen. Minimallösungen dürften jedoch aus Kostengründen häufig bevorzugt werden, so dass technologische Fehlsteuerungen möglich sind.

Es gibt somit einerseits aktuell insgesamt zu wenig Anreize und konkrete Anforderungen, um neue oder modernisierte BHKW bereits heute hinreichend für einen künftig möglicherweise sinnvollen netzgeführten Anlagenbetrieb vorzubereiten. Andererseits erscheint es aufgrund der volkswirtschaftlichen und systemtechnischen Unsicherheiten über den Bedarf an netzgeführten BHKW und der uneinheitlichen technischen Anforderungen an die Fernwirktechnik auch noch zu früh, hierzu konkretere Regeln vorzugeben. Die Wirkungstiefe dieses Hemmnisses kann daher gegenwärtig nicht näher bewertet werden.

9.4.2 Unklare Anforderungen an stromgeführten Betrieb bei der neuen Förderung von Mini-KWK-Anlagen

Die neue „Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW_{el}“ setzt für eine Förderung von Anlagen ab 3 kW_{el} voraus, dass diese über eine Steuer- und Regelung für stromgeführten Betrieb und eine „definierte Schnittstelle“ für externe Leistungsvorgaben verfügt. Diese Anforderungen weisen zwar auch für einen netzgeführten Betrieb in die richtige Richtung, lassen aber die genaue technische Ausgestaltung (s.o.) offen bzw. zu unspezifiziert. Die Regelung kann daher nicht ausreichend sicherstellen, dass die dementsprechend (neu) zum Einsatz kommende Technik bereits so ausgeführt wird, dass sie auch den künftigen Anforderungen an netzgeführte Betriebsweisen genügt bzw. gut angepasst werden kann. Hinzu kommt, dass die Vorgaben von denen im KWKG abweichen, was zusätzlich zu Unsicherheiten bzw. Zurückhaltung bei den Entwicklern und Herstellern führen könnte.

⁵⁶ Anlagenbetreiber, die keinen Speicherzuschlag beantragen, müssen demnach auch keine fortschrittlichere Fernwirktechnik einbauen und vorweisen, als diejenige die für Anlagen > 100 kW_{el} für das Einspeisemanagement ohnehin vorgeschrieben oder vom Hersteller als Basisausstattung bereits integriert ist.

9.4.3 Falsche Anreize bei Zuschlägen für (größere) Wärmespeicher (Flex-2) im KWKG 2012

Die Einführung von Zuschüssen für den Neu- und Ausbau von Wärmespeichern soll zur Erhöhung der Flexibilität von KWK-Anlagen und zu einer stärkeren Nutzung von stromgeführten Betriebsweisen beitragen. Die geltenden Regelungen dürften aber zu kurz greifen, um diese Ziele tatsächlich bzw. in größerem Umfang realisieren zu können. Dazu werden zum einen zu unspezifische Anforderungen an die zu verwendende Fernwirktechnik vorausgesetzt, die Gefahr laufen, die falschen technologischen Weichen zu stellen (vgl. Kapitel 9.1.2). Eine Entwicklung von geeigneter Fernwirktechnik für einen netzgeführten Betrieb wird dadurch nicht gezielt adressiert. Zum anderen werden Mindestgrößen⁵⁷ definiert, die für die meisten Anlagen (ca. ab 7 kW_{el}) bei heute üblicher Auslegung (1 Vollbenutzungsstunde) keine neue Herausforderung, d. h. Vergrößerung der Speicherkapazitäten, bedeuten. Für die Mitnahme der Zuschläge besteht also nur bei sehr kleinen Anlagen ein Handlungsdruck zur Erhöhung des Speichervolumens, bei allen anderen Anlagengrößen reicht dafür grundsätzlich der „zusätzliche“ Einbau von einfacher Fernwirktechnik aus. Eine Erhöhung der anlagenbezogenen Speicherkapazitäten ist dadurch zwar auch nicht ausgeschlossen, erscheint aber wenig wahrscheinlich und sie dürfte zudem tatsächlich wesentlich stärker von den verfügbaren Aufstellbedingungen (siehe Kapitel 9.2.2) abhängen als von möglichen höheren Zuschüssen. Daher ist zu erwarten, dass die Regelung eher einen Neubau oder eine Vergrößerung der Speicher bei großen (Fernwärme-)KWK- bzw. BHKW-Anlagen als bei kleinen BHKW anreizt. Im Hinblick auf die zeitlichen Anforderungen (Mindestgebotsdauer 4 Stunden) für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt fehlt es zudem an einer entsprechenden – zumindest richtungsweisenden – Anforderung, die Speichergröße an Vollbenutzungsstunden zu koppeln.

9.4.4 Zu wenig Anreize durch die Wahlmöglichkeit für die Dauer der KWK-Zuschläge

Betreiber von BHKW mit Leistungen bis 50 kW_{el} haben bei Antragstellung der Förderung einmalig die Wahl, ob sie die KWK-Zuschläge über einen Zeitraum von 10 Jahren oder von 30.000 Vollbenutzungsstunden erhalten möchten. Diese Option soll strom- bzw. netzgeführte Betriebsweisen unterstützen und anreizen, da die Wahl von Vollbenutzungsstunden den Ausfall von KWK-Zuschlägen (siehe Kapitel 9.1.3) als Folge niedrigerer Laufzeiten (<3.000 h/a) kompensieren hilft. Allerdings wird dadurch der *cash-flow* zeitlich gestreckt und fällt in den ersten 10 Jahren unverändert niedriger aus, als wenn die Anlage mit höherer Auslastung betrieben würde. Die Kompensation findet damit erst zum betrieblichen Ende hin statt, was für einen (Erst-)Betreiber aber wesentlich unattraktiver als eine frühe(re) Kompensation sein dürfte. Es bestehen für ihn diesbezüglich mehr Unsicherheiten durch mögliche Anlagenausfälle und bei einem Verkauf der Anlage an Dritte (Restwertfrage).

Hinzu kommt, dass die Entscheidung zu Beginn des Anlagenbetriebs getroffen werden muss. Angesichts der heutigen Unsicherheiten über die Wirtschaftlichkeit von strom- und netzgeführten BHKW ist zu erwarten, dass dies nur durch sehr wenige Betreiber mit dezidierten Geschäftsmodellen erfolgt. Ansonsten werden Anlagen bisher in der Regel für

⁵⁷ Wärmespeicher mit einem Wasservolumenäquivalent von mindestens 1 m³ oder 0,3 m³/kW_{el}

Vollbenutzungsstunden (deutlich) größer als 3.000 h/a ausgelegt. Bis zum Zeitpunkt einer breiten Änderung der Auslegung (Paradigmenwechsel) wird die Wahlmöglichkeit voraussichtlich keinen großen Effekt erzielen.

9.4.5 Wegfall der Stromsteuer-Erstattung für virtuell gekoppelte BHKW mit einer Gesamtleistung über 2 MW_{el}

Ende September 2011 trat eine Änderung der Energie- und Stromsteuer-Durchführungsverordnung in Kraft (BHKW-Consult 2012d), die unter bestimmten Bedingungen zu einem Wegfall der Stromsteuererstattung bei virtuell miteinander gekoppelten BHKW (> 2 MW_{el}) führen kann. Dies führt zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit und kann daher den Aufbau entsprechend großer virtueller Kraftwerke hemmen. Allerdings sind hiervon gemäß der Ausgestaltung nicht alle Geschäftsmodelle bzw. Akteure gleichermaßen betroffen.

Nach der neuen Verordnung gelten Stromerzeugungseinheiten an unterschiedlichen Standorten nur dann als eine Anlage zur Stromerzeugung⁵⁸, sofern:

- die einzelnen Stromerzeugungseinheiten zentral gesteuert werden,
- der Betreiber zugleich der Eigentümer der Stromerzeugungseinheiten ist,
- er die ausschließliche Entscheidungsgewalt über die Einheiten besitzt und
- der erzeugte Strom zumindest teilweise in das Versorgungsnetz eingespeist werden soll.

Während die erste Bedingung für alle entsprechenden Geschäftsmodelle gleichermaßen gilt, wird die Wirkung durch die weiteren Bedingungen stark differenziert. Modelle, in denen der BHKW-Strom in einem "räumlichen Zusammenhang" an Endkunden vermarktet wurde bzw. wird, verlieren nunmehr die Erstattung, wenn die Summen-Leistung 2 MW_{el} übersteigt. Davon betroffen sind vor allem Energiedienstleister und Energieversorger (besonders Stadtwerke), die in einer Stadt mehrere eigene Anlagen zentral regeln und ggf. den Strom lokal vermarkten. Bereits eine größere BHKW-Anlage kann dann in Verbindung mit vielen Kleinanlagen dazu führen, dass wegen Überschreitung der 2 MW-Grenze die Stromsteuerbefreiung für alle KWK-Anlagen hinfällig wird. Wenn dagegen fremde Anlagen zentral gesteuert und lokal vermarktet werden, dann gilt die Regelung nicht.

Für Akteure und Modelle, die den BHKW-Strom allgemein über (einen) Bilanzkreis(e) verkaufen (z. B. Lichtblick), ändert sich an der Wirtschaftlichkeit nichts, da die Stromsteuer für den Endkunden in diesem Fall bereits unabhängig von der Anlagengröße anfällt.

Mit Schreiben vom 30. März 2012 erläuterte das BMF (BHKW-Consult 2012d) gegenüber den Bundesfinanzdirektionen die Begrifflichkeiten sowie die Vorgehensweise in Bezug auf die neue Anlagenbegrifflichkeit. Dabei wurde u. a. klar gestellt, dass nur Fälle erfasst werden sollen, in denen eine zentrale Steuerung erfolgt, um im Ergebnis die Wirkung eines größeren Kraftwerkes zu erzielen. Demnach ist die Steuergröße entscheidend. Wenn mehrere KWK-Anlagen zentral gesteuert werden, aber es sich um eine wärmegeführte Betriebsweise handelt,

⁵⁸ In diesen Fällen gilt die Summe der elektrischen Nennleistungen der einzelnen Stromerzeugungseinheiten als elektrische Nennleistung im Sinn des § 9 Absatz 1 Nummer 3 des Gesetzes.

werden diese KWK-Anlagen aufgrund der Tatsache einer zentralen Steuerung in Bezug auf den Anlagenbegriff der Stromsteuer nicht als eine Anlage betrachtet. Demnach entfällt die Stromsteuer nur bei zentraler Steuerung und stromgeführter Betriebsweise (in einer Hand), nicht aber zentral wärmegeführten BHKW.

9.5 Soziale Hemmnisse

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird in sozialer Hinsicht im Wesentlichen durch folgende Hemmnisse erschwert:

- „Bisherige Denke und Erfahrungen“
- Mangelnde Akzeptanz gegenüber externen Zugriffen auf die eigene BHKW
- Mangelnde Motivation und Verständnis des Regelleistungsmarktes
- Mangelnde Akzeptanz gegenüber höherem Platzbedarf bei Flexibilisierung.

9.5.1 „Bisherige Denke und Erfahrungen“

Das Hemmnis bezieht sich auf die bis heute übliche Planung und Auslegung auf den wärmegeführten Betrieb (vgl. Kapitel 9.2) sowie die Betriebsweise selber und steht für das Beharrungsvermögen, welches aus dieser Gewohnheit und den gesammelten (positiven) Erfahrungen entsteht. Dies wirkt insbesondere dann, wenn es (noch) nicht durch ökonomisch bessere Aussichten überwunden werden kann (vgl. Kapitel 9.1). Dadurch werden neue Entwicklungen, wie eine Teilnahme am Minutenreservemarkt, je nach Ausprägung mehr oder weniger stark gehemmt, in dem die Akteure nicht bereit sind diese in Erwägung zu ziehen, auszuprobieren und zu realisieren. Ohne weitere Analysen (wie z. B. Umfragen und Interviews) kann die Wirkungstiefe dieses Hemmnisses allerdings nicht genauer beurteilt werden. Es sollte jedoch nicht unterschätzt werden. Bei wirtschaftlichem Erfolg und steigendem Bekanntheitsgrad der neuen Betriebsweise dürfte das Hemmnis dann aber zunehmend schwächer werden.

9.5.2 Mangelnde Akzeptanz gegenüber externen Zugriffen auf die eigene BHKW

Der netzgeführte Betrieb zur Teilnahme am Minutenreservemarkt wird in der Regel durch eine externe Stelle via Fernwirktechnik erfolgen. Dafür ist die Anlage mit entsprechender Technik aus- oder nachzurüsten, die Erlaubnis zu erteilen und ggf. ein eigener Vertrag abzuschließen. Neben einer möglichen mangelnden Motivation dafür, kann dies auch an (subjektiven) Vorbehalten und Unsicherheiten demgegenüber scheitern, unabhängig von der Berechtigung. Dazu gehören z. B. Fragen nach Haftungsrisiken, Sicherheit der Wärmeversorgung, Daten- und Hackerschutz sowie zusätzlicher (bürokratischer) Aufwand beim Eigentümer bzw. Betreiber. Auch dieses Hemmnis ist ohne weitere Analysen, wie z. B. Umfragen und Interviews, an dieser Stelle nicht genauer zu bewerten, jedoch sicherlich nicht zu unterschätzen.

9.5.3 Mangelnde Motivation und Verständnis des Regelleistungsmarktes

Motivation und Verständnis der Hintergründe und Wirkungen gehören zu den wesentlichen Treibern (nicht nur) für Innovationen wie netzgeführte BHKW. Klassische Motive wie höhere Rendite, höhere Unabhängigkeit bzw. Sicherheit und/oder Komfortqualität können dafür nicht (bei Rendite noch nicht) bedient werden. Es bleiben die nicht unwichtigen Faktoren, dadurch

mehr für die Umwelt tun zu können oder ein innovativer Vorreiter zu sein. Der mögliche zusätzliche Beitrag von netzgeführten BHKW für die Umwelt ist jedoch indirekter Natur, beruht auf komplexen Zusammenhängen und ist damit nicht einfach erklärbar. Die Vorreiterrolle allein dürfte nicht für eine breite Akzeptanz und Nachfrage ausreichen. Zudem sind noch folgende Fragen offen, deren Einschätzungen in diesem Kontext entweder treibend oder hemmend wirken werden:

- Wie groß wird künftig der (zusätzliche) Bedarf an Minutenreserve werden? Wird es zu Engpässen kommen?
- Inwiefern ist die Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt im Vergleich zu neuen, größeren Gaskraftwerken (Turbinen und GuD) sinnvoll(er)?
- In welchem Umfang können netzgeführte BHKW zur Integration von erneuerbaren Energien beitragen und wie schneidet dieser Einsatz im Vergleich zur stromgeführten Betriebsweise ab?

Im Unterschied zu den noch offenen Fragen ist der Rückgang der eigenen Wärme- und Stromerzeugung sowie ein Anstieg der CO₂-Emissionen als Folge eines Wechsels zum netzgeführten Betrieb offensichtlicher und dürfte eher zu einer (breiten) Ablehnung beitragen. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass es momentan an ausreichender Motivation und am Verständnis der Zusammenhänge für eine erfolgreiche Markteinführung von netzgeführten BHKW mangelt, so dass beides zumindest in der Anfangsphase ein Hemmnis darstellen wird. Daher erscheint es wichtig, eine mögliche Markteinführung argumentativ und kommunikativ gut vorzubereiten.

9.5.4 Mangelnde Akzeptanz gegenüber höherem Platzbedarf bei Flexibilisierung

Eine Steigerung des Minutenreservepotenzials von BHKW kann unter anderem durch eine Vergrößerung des Gesamtsystems oder der Speicher erfolgen (siehe Kapitel 7.6). Dafür wird mehr Aufstellfläche und –raum benötigt. Die Umsetzung der Optionen kann daher an mangelndem Platz, eventuell zusätzlich erforderlichem (Umbau-)Aufwand bzw. an fehlender Akzeptanz dafür scheitern. Die Wirkungstiefe dieses Hemmnisses ist schwer zu beurteilen, da sie eher individueller Natur sein wird. Generell dürfte aber gelten, je mehr Platz bereits vorhanden ist bzw. je geringer der zusätzliche Bedarf gehalten werden kann desto kleiner ist das Hemmnis und umgekehrt. Mehrfamilienhäuser dürften zudem eher mehr akzeptable Möglichkeiten bieten als (selbst genutzte) Einfamilienhäuser. Da die Flexibilisierungsoptionen für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt zwar vorteilhaft, aber nicht notwendig sind, wird der Aspekt im Vergleich zu den technischen und ökonomischen Hemmnissen als moderat eingestuft.

9.6 Zusammenfassung Hemmnisse

Für eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wurden unterschiedliche Hemmnisse in den Bereichen Technik, Ökonomie, Ökologie, Politik und Soziales mit verschiedenen starken und zum Teil im Rahmen des Projekts nicht genauer bewertbaren Wirkungen identifiziert. Dabei wurden nur solche Hemmnisse betrachtet, die direkt mit netzgeführten Betriebsstrategien in Verbindung gebracht werden können. Hemmnisse, die den Ausbau und die Nutzung von BHKW im allgemeinen behindern, wurden dagegen nicht explizit berücksichtigt, sie spielen aber mittelbar auch eine sehr wichtige Rolle, weil das Regelleistungspotenzial ohne starken BHKW-Ausbau niedrig bleiben wird.

Die weiteren Analysen und die auf dem Projekt-Workshop durchgeführte ad-hoc Bewertung (siehe Kapitel 13) zeigen, dass die ökonomischen Hemmnisse und die geltende Mindestgebotsdauer für Minutenreservegebote am stärksten bzw. am dringlichsten zu überwinden sind. Zu den wesentlichen ökonomischen Hemmnissen gehören die noch zu teure Fernwirktechnik für kleinere BHKW und die größere wirtschaftliche Attraktivität besonders der Eigenstromnutzung sowie auch eines gezielten Stromverkaufs am Spotmarkt, um dort höhere Erlöse im Vergleich zum üblichen Preis erzielen zu können.

Die bisher übliche Auslegung der BHKW auf die thermische Grundlast und der Wärmespeicher auf etwa eine Stunde Nennlastbetrieb schränken das technische Potenzial für Minutenreserveangebote stark ein. Der starke Rückgang des Wärmebedarfs im Sommer verstärkt diesen Effekt. Für Flexibilisierungsmaßnahmen, die diese Einschränkungen kompensieren können, wird es besonders in Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern häufig an Platz fehlen. Zudem können größere Pufferspeicher und Notkühler aufgrund ihrer hohen Gewichte an baustatischen Anforderungen scheitern.

Ein Wechsel vom wärmegeführten zum netzgeführten Betrieb führt zu höheren CO₂-Emissionen, was etwa eine Halbierung der CO₂-Einsparungen im Vergleich zum ungekoppelten Referenzsystem bedeutet. Die stellt in ökologischer und umweltpolitischer Hinsicht ein wesentliches Hemmnis dar. Die Mehremissionen können zwar insbesondere durch eine Vergrößerung der Anlage kompensiert werden, dies ist jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass zur besseren Integration von EE-Strom künftig ohnehin verstärkt mit einem stromgeführten Einsatz und damit verbunden höheren CO₂-Emissionen im Vergleich zu heute zu rechnen ist. Der Anstieg der Emissionen fällt diesbezüglich geringer aus.

Im KWKG und der Förderrichtlinie zu Mini-KWK-Anlagen fehlen Begriffe und Regelungen zu netzgeführten und zu virtuell miteinander verbundenen BHKW. Die dort enthaltenen Anforderungen an die Ausstattung mit Fernwirk-, Informations- und Kommunikationstechnik sind zu wenig spezifiziert und unterschiedlich ausgeführt, so dass diesbezüglich Unsicherheiten bestehen und Fehlentwicklungen möglich sind. Die Vorgaben an die Zuschüsse für die Errichtung größerer Speicher können von den meisten Anlagen (ab ca. 7 kW_{el}) mit üblicher Auslegung erfüllt werden und daher kaum die gewünschte Wirkung entfalten. Ebenso wenig dürfte die Wahlmöglichkeit über den Zeitraum für die KWK-Zuschläge bei kleinen BHKW (< 50 kW_{el}) zu mehr strom- oder netzgeführten Betriebsweisen führen, da die Vorteile erst gegen Betriebsende wirksam werden.

Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt wird nicht zuletzt durch verschiedene soziale Faktoren, wie die bisher übliche Praxis (wärmegeführte Auslegung und Betrieb), die mangelnde Akzeptanz von Eigentümern gegenüber externen Zugriffen, die mangelnde Motivation und das mangelnde Verständnis des Regelleistungsmarkts gehemmt.

10 Empfehlungen

8.1 Grundsätzliche Aspekte/Energiewirtschaftliche Einordnung

Mit der vorliegenden Untersuchung wird gezeigt, dass

- eine Teilnahme von (kleinen) BHKW am Regelleistungsmarkt für Minutenreserve technisch umsetzbar ist,
- die betrachteten Anlagen im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand (2010) zusammen etwa 7 % (netzgeführt) bis 10 % (Flex-1) der im Jahr 2010 angebotenen Minutenreserve hätten abdecken können,
- das technische Potenzial (netzgeführt) durch einen starken BHKW-Ausbau deutlich wächst, z. B. auf bis zu 42 % im Jahr 2020 bezogen auf den Minutenreservemarkt des Jahres 2010,
- zusätzliche Steigerungen durch Flexibilisierungsmaßnahmen realisiert werden können,
- die CO₂-Emissionen trotz deutlicher Erhöhung durch den Wechsel zur netzgeführten Betriebsweise noch um 4 % bis 16 % unter denen des ungekoppelten Referenzsystems liegen.

Diesen vielversprechenden Ergebnissen stehen aber auch eine Reihe von wesentlichen Hemmnissen gegenüber. Dazu gehören vor allem hohe Kosten und hoher Aufwand für die Umsetzung von netzgeführten Betriebsweisen insbesondere für kleine BHKW, die Unsicherheit über ihre Wirtschaftlichkeit sowie über den künftigen Bedarf an Minutenreserve und ihre volkswirtschaftlich optimale Deckung. Daher wird vor der Ableitung und Diskussion von Empfehlungen kurz aus energiewirtschaftlicher und systemtechnischer Sicht die grundsätzliche Frage erörtert, inwiefern (z. B. bis zu welcher Anlagengröße) es sinnvoll erscheint, BHKW an den Minutenreservemarkt zu bringen.

Eine prinzipielle Notwendigkeit dafür besteht nicht, da steigender Bedarf an Minutenreserve weiterhin auch durch andere konventionelle Kraftwerkstechnik im Bestand bzw. durch Neubau von z. B. Gasturbinen gedeckt werden könnte. Obwohl letzteres nur eine von vielen Möglichkeiten darstellt, werden die Vor- und Nachteile von BHKW im folgenden hauptsächlich im Vergleich zu neuen Gasturbinen diskutiert, um eine erste stringente Einschätzung zu gewinnen. Dazu werden im Sinne einer quantitativen Annäherung auch die Fixkosten für neue Anlagen miteinander verglichen.⁵⁹ Die folgenden Aussagen stellen daher lediglich Anhaltspunkte dar. Für eine genauere Bewertung sind zusätzliche, vertiefende (Wirtschaftlichkeits-)Analysen erforderlich, die aber den Rahmen dieses Forschungsprojekts überstiegen hätten.

⁵⁹ Als Bezugsgröße wird dabei der aus der dena Netzstudie II folgende zusätzliche Bedarf an positiver Minutenreserve in Höhe von etwa 2.000 MWel bis zum Jahr 2020 herangezogen (vgl. Kapitel 3).

10.1.1 Energiewirtschaftliche Gründe für einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt

Gasturbinen als die investitionsgünstigste Neubauoption zur Regelennergiebereitstellung (siehe Abb. 10-1) sind aufgrund ihrer relativ hohen kurzfristigen Grenzkosten, der rückläufigen Spitzenlastpreise und zu großer Preisspannen am Strommarkt absehbar nicht betriebswirtschaftlich darstellbar. Ihr Ausbau wird daher ohne zusätzliche Unterstützung voraussichtlich nicht in dem erforderlichen Umfang erfolgen.⁶⁰ Um dieses Problem zu lösen, wird aktuell u.a. die Einführung von Kapazitätsmärkten (inkl. entsprechender Prämien) diskutiert (bne 2011). Mit einer solchen Lösung ist aber zumindest kurzfristig nicht zu rechnen, da hier noch großer Forschungs- und Klärungsbedarf besteht.⁶¹ Vor diesem Hintergrund stellen insbesondere jüngere und größere BHKW eine interessante Alternative dar. Sie könnten nachträglich relativ zügig und kostengünstig auf einen strom- bzw. netzgeführten Betrieb umgestellt werden und damit flexible Leistung für den Strom- bzw. Regelleistungsmarkt bereitstellen. Dadurch kann der bestehende Handlungsdruck sowohl bezogen auf den Kapazitätsausbau als auch auf die Gestaltung der Instrumente dafür vermindert werden.

Größere BHKW ($\geq 500 \text{ kW}_{el}$) sind, ohne Berücksichtigung der Vernetzungskosten, bezogen auf die Fixkosten (Bezugsjahr 2009) „nur“ um etwa bis zu einen Faktor 2 kostenintensiver als Gasturbinen (siehe Abb. 10-1). Allerdings haben sie im Vergleich zu den Gasturbinen in der Regel eine (deutlich) höhere Auslastung, erwirtschaften zusätzliche Erlöse am Wärmemarkt und benötigen (bisher) keine CO₂-Zertifikate. Aus diesem Grund dürften sie auch am Strommarkt wettbewerbsfähiger sein als Gasturbinen und dort mehr Erlöse erzielen. Bei einer Wirtschaftlichkeitsberechnung dürften ihre Differenzkosten im Vergleich zu den Gasturbinen sinken und könnten ggf. – je nach Marktumfeld und Betriebsstrategie – sogar negativ werden. Gasturbinen werden in der Regel aber auch nicht allein für den Regelleistungsmarkt gebaut, sondern sind z. B. Bestandteil von neuen GuD-Kraftwerken bzw. Fernwärmenetzen. Für eine genauere Bewertung sind daher quantitative, vertiefende Analysen nötig.

BHKW eignen sich zudem aus betriebswirtschaftlicher Sicht in Zeiten hohen Wärmebedarfs (Winter) besonders gut für das Angebot von negativer Minutenreserve. Dieser Marktteil und Zeitraum könnte somit gut als Einstieg für netzgeführte BHKW dienen. Sie sind dort aufgrund ihrer geringen Betriebskosten je nach Größe und Strategie ggf. heute schon als konkurrenzfähig gegenüber Gasturbinen anzusehen. Inwiefern dies auch z. B. im Vergleich zu steuerbaren Lasten in Industrie und Gewerbe gilt, die sich sehr gut für negative Minutenreservegebote eignen, lässt sich dagegen ohne vertiefende Analyse nicht bewerten.

Langfristig sind ökonomische Synergieeffekte im Kontext von smart grids und ggf. auch von (regenerativen) Kombikraftwerken vorstellbar, da sie Teile der benötigten Fernwirk- bzw. Informations- und Kommunikationstechnik einbringen können, die z. B. auch vom

60 Der Regelleistungsmarkt wird aufgrund seiner Eigenschaften (relativ kleines Volumen, schlechte Prognostizierbarkeit, hoher Teilnahmeaufwand) diesbezüglich auch keine ausreichenden Anreize setzen können (vgl. [BET 2012, S. 18])

61 Alternativ hat die Regierung nach Paragraph 53 EnWG die Möglichkeit geschaffen, neue Erzeugungskapazitäten im Sinne der Versorgungssicherheit auszuschreiben.

Netzbetreiber nutzbar sind. Hinzu kommt, dass die dann bestehenden BHKW-Kapazitäten einen Teil der erforderlichen gesicherten Leistung für eine überwiegend auf erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung übernehmen können. Die (zusätzliche) Vorhaltung von Gasturbinenleistung, die in der Regel nur an relativ wenigen Stunden im Jahr zum Einsatz kommen muss, wenn das Dargebot an Wind bzw. Sonne nicht zur Lastdeckung ausreicht, könnte dadurch reduziert werden.

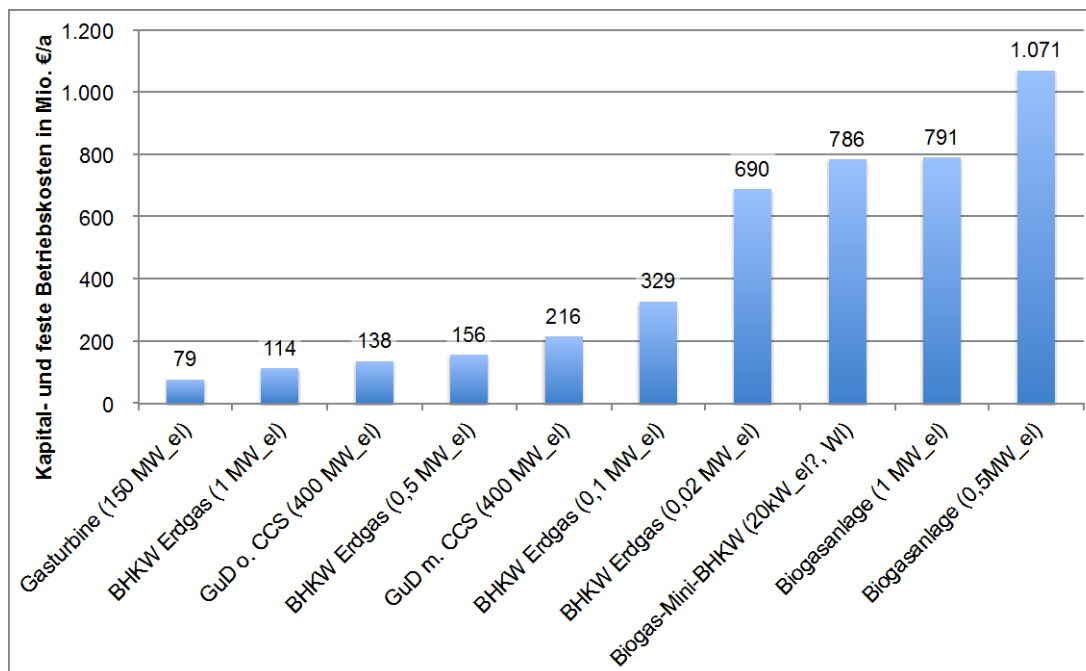
10.1.2 Energiewirtschaftliche Gründe *gegen* einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt

BHKW können durch eine hohe Eigenverbrauchsdeckung bzw. auch durch eine Stromvermarktung am Spotmarkt absehbar höhere Erlöse erzielen als durch einen netzgeführten Betrieb (siehe Kapitel 9.1). Inwiefern bzw. ab wann sich auch eine Umstellung auf einen netzgeführten Betrieb rechnen würde, um Zusatzerlöse zu generieren, konnte im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden.

Bis zum Jahr 2020 sind keine Deckungslücken bezogen auf den Bedarf an Minutenreserve erkennbar. Trotz einem altersbedingten starken Abgang an Kraftwerksleistung wird aufgrund der in Planung und Bau befindlichen Kraftwerke ein relativ konstanter konventioneller Kraftwerkssockel und eine ausreichend gesicherte Leistung erwartet (vgl. (bne 2011); (BMU 2012)). Die Deckung des Minutenreservebedarfs dürfte also auch ohne zusätzlichen Ausbau gegeben sein. Neue Geschäftsmodelle werden sich daher nur schlecht gegen etablierte Modelle mit zum Teil abgeschriebenen Kraftwerken behaupten können.

Falls (jedoch) zusätzliche Leistung für den Regelleistungsmarkt benötigt werden sollte, dann kann sie durch Gasturbinen aber auch durch GuD-Kraftwerke (mit und ohne CCS) zu deutlich geringeren fixen Jahreskosten für Kapital und Betrieb als durch kleinere BHKW bereitgestellt werden (siehe Abb. 10-1). Demnach sind Gasturbinen um mehr als einen Faktor 8 günstiger als kleinere BHKW ($\leq 100 \text{ kW}_{\text{el}}$) und dürften daher von Investoren bevorzugt werden. Gasturbinen eignen sich durch ihre niedrigeren Fixkosten zudem besser für das Angebot von positiver Minutenreserve als BHKW und werden damit einen Teil des Markts für sie „verschließen“. Allerdings stellt der Vergleich von fixen Kosten nur einen ersten groben Anhaltspunkt für eine bessere Einordnung dar. Für genauere Aussagen sind Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchzuführen (vgl. oben).

Abb. 10-1: Fixe jährliche Kapital- und Betriebskosten verschiedener Gaskraftwerkstechniken für eine Bereitstellung von 2.000 MW_{el}



Basisannahmen: Zinssatz 6 %; Abschreibungsdauer: 15 a (Biogas-Mini-BHKW), 20 a (BHKW Erdgas), 25 a (Gasturbine und GuD)
 Quelle: (BMU 2011); eigene Berechnungen und Annahme für Biogas-Mini-Leistungsgröße

Durch Gasturbinen können schneller bzw. verlässlicher größere Anlagenleistungen bereit gestellt werden als durch BHKW insbesondere mit kleinerer Leistung. Der o.g. Bedarf könnte z. B. durch 20 Gasturbinen à 100 MW_{el} zeitgerecht gedeckt werden. Dagegen wären alternativ – abhängig von ihren Wärmespeichergrößen – bis zum Jahr 2020 insgesamt mindestens 20.000-80.000 (100.000-400.000) kleinere BHKW-Anlagen mit einer Leistung von 100 (20) kW_{el} bzw. ein mittlerer jährlicher Zubau von 2.500-10.000 (12.500-50.000) solcher Anlagen notwendig. Ein solcher Ausbau ist zwar politisch zielkonform und scheint gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 (allein plus 2.500 MW_{el} bei BHKW < 50 kW_{el} bis zum Jahr 2020, siehe Tab. 3 1) und angesichts des aktuellen Marktvolumens an Wärmeerzeugern (ca. 600.000 pro Jahr) im Bereich des Möglichen zu liegen. Die demgegenüber bis zum Jahr 2010 verhalten verlaufene Marktentwicklung und die Größe des Bestands (2010: ca. 33.000 BHKW mit insgesamt ca. 3.500 MW_{el} (Gores, S. 2010)) lässt dies jedoch eher wenig realistisch erscheinen.

Gasturbinen und GuD-Kraftwerke benötigen aufgrund Ihrer Anlagenleistungen keinen zusätzlichen Aufwand (virtuelles Verknüpfen) für das Erreichen der Mindestangebotsgröße. GuD-Kraftwerke brauchen zudem „nur“ Kraftwerksscheiben anbieten und können die restlichen Kapazitäten anders vermarkten (Einsatzoptimierung).

Das technische Potenzial von BHKW bricht im Sommer ohne zusätzliche Flexibilisierungsmaßnahmen stark ein. Zur durchgängigen Deckung des Minutenreservebedarfs werden daher ggf. trotz netzgeführter BHKW zusätzliche konventionelle Regelkapazitäten benötigt. Da diese saisonal kaum Abhängigkeiten aufweisen, stehen sie durchgängig zur Verfügung. Der Aufbau von BHKW-Regelkapazitäten ohne ausreichende Flexibilisierung würde somit zu unnötigen Mehrkosten führen. Die Flexibilisierung könnte dies kompensieren, verteuert aber den Einsatz von BHKW und erhöht die fixen Differenzkosten zu konventioneller Technik.

Fazit aus energiewirtschaftlicher Sicht: Insgesamt sind derzeit mehr bzw. gewichtigere energiewirtschaftliche Gründe gegen eine verstärkte, breite Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt zu sehen. Dies gilt aber um so weniger je größer ihre Anlagenleistung ist, da sie in der Anschaffung dann wenig mehr kosten als Gasturbinen und GuD-Kraftwerke und zu relativ geringen Kosten „marktfähig“ gemacht werden können. Aufgrund ihrer zusätzlichen Erlösoptionen am Wärme- und Strommarkt dürften sie wettbewerbsfähig zu den konventionellen Alternativen sein. Der Aufwand für Ihre Verknüpfung zu ausreichend großer Mindestgebotsleistung ist viel geringer und wird zum Teil schon praktiziert. Der unabhängig vom Regelleistungsmarkt angestrebte und geförderte KWK-Ausbau baut ein Potenzial auf, dass einen separaten Ausbau an ungekoppelter flexibler Kapazität mittel- bis langfristig verringern hilft. Langfristig sprechen zudem weitere mögliche ökonomische Synergieeffekte z. B. mit *smart grids* auch für einen verstärkten Einsatz von kleinen BHKW. Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt erscheint daher beginnend bei großen (ab 100 kW_{el}), jüngeren bestehenden Anlagen mittels Nachrüstung sinnvoll und damit unterstützenswert, ebenso wie eine Vorbereitung von neuen größeren Anlagen. Für kleinere Anlagen (unter ca. 100 kW_{el}) sollten zunächst vertiefende Wirtschaftlichkeitsanalysen durchgeführt werden.

10.1.3 Systemtechnische Gründe *für* einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt

Der Minutenreservebedarf wird künftig als Folge des EE-Ausbaus voraussichtlich weiter steigen, während der Einsatz von Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen dadurch weiter verringert wird. Netzgeführte BHKW können die daraus möglicherweise langfristig entstehenden Lücken bei der Bedarfsdeckung ausfüllen helfen.

Viele verteilte, virtuell miteinander verkoppelte BHKW weisen eine höhere Ausfallsicherheit im Sinne des (n-1) Kriteriums auf und benötigen prinzipiell weniger Reservekapazitäten als größere Regeleinheiten, wie z. B. Gasturbinen. Sie helfen damit auch Kosten für den Ausbau größerer Reserveleistungen zu verringern.

Ihre Ausrüstung mit hochfunktionaler Fernwirktechnik und ihre Anbindung an Leitstellen ermöglichen verschiedene Synergieeffekte im Zusammenhang mit lokaler Versorgungsqualität, Netzüberwachung, Netzstützung im Stör-/Fehlerfall sowie allgemein einem Aufbau von smart grids. Sie können zudem die Basis für eine stabile Inselnetzbildung im Fall von Netzausfällen darstellen.

Langfristig können BHKW neben Gasturbinen und GuD-Kraftwerke generell eine wichtige Rolle im Rahmen einer Konvergenz von Strom- und Gasnetzen durch eine Umwandlung von überschüssigem EE-Strom in Wasserstoff oder synthetisches Methan, ihre Zwischenspeicherung im Gasnetz und in Gasspeichern und anschließender Rückverstromung spielen. Da es hierbei zu großen zusätzlichen Umwandlungsverlusten kommt, ist – neben vielen Fragen zur konkreten Umsetzung – allerdings noch offen, in welchem Umfang eine solche Nutzung vorteilhaft ist.

10.1.4 Systemtechnische Gründe *gegen* einen Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt

Es liegen noch keine Erfahrungen mit der Verknüpfung von sehr vielen kleinen Anlagen zu Regelkraftwerken vor. Bisher sind nur wenige Geschäftsmodelle bekannt, z. B. von Lichtblick und Vattenfall (siehe Tab. 4-8), die dezidiert (auch) auf den niedrigen 2-stelligen kW_{el}-Bereich abzielen. Der Nachweis über die Machbarkeit unter realen Bedingungen steht damit für sehr

kleine BHKW noch aus. Er kann in Abhängigkeit der weiteren Marktentwicklung durchaus kurzfristig erfolgen, von einem etablierten System wird man dann jedoch trotzdem erst nach einigen Jahren sprechen können, wenn ausreichend Erfahrungen gesammelt worden sind.

In diesem Zusammenhang sind Unsicherheiten bezogen auf die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der benötigten Informations- und Kommunikationstechnik in Abhängigkeit der verwendeten Technik zu nennen. Insbesondere bei Einbeziehung von *smart Metern* und Internetverbindungen könnte es zu einer höheren Anfälligkeit gegenüber Hackerangriffen kommen.

Die Freiheitsgrade für den Einsatz von kleinen BHKW sind aufgrund ihres Anschlusses an den unteren Netzebenen und den dort geltenden schärferen Anforderungen bezogen auf Spannungsschwankungen stärker eingeschränkt als größere Einheiten an höheren Netzebenen mit weniger scharfen Anforderungen. Demnach dürfen vor Ort nicht zu viele BHKW gleichzeitig eingesetzt werden, da sie ansonsten dort selber zu Netzproblemen führen. Das Problem könnte vor allem für Geschäftsmodelle mit starkem lokalem Bezug, wie es derzeit der Fall ist, besonders relevant werden. Zudem wird es in Regionen mit hohen PV-Anteilen verschärft, da diese das Netz zusätzlich belasten und die zulässigen Spannungsbänder tagsüber ggf. bereits ausschöpfen. Es ist daher ein zusätzlicher Aufwand für die Präqualifikation und eine sichere und intelligente Verteilung ihres Einsatzes unter Berücksichtigung anderer dezentraler Erzeuger nötig.

Fazit aus systemtechnischer Sicht: Aus heutiger Sicht sprechen – besondere für kleinere BHKW ($< 100 \text{ kW}_{\text{el}}$) – bestimmte systemtechnische Gründe zumindest mittelfristig eher gegen eine Teilnahme am Minutenreservemarkt. Dazu gehören vor allem die fehlenden Erfahrungen einer sicheren Verknüpfung, die kleineren zulässigen Spannungsbänder auf den unteren Netzebenen und damit verbunden die Konkurrenz zu anderen dezentralen Einspeisern, insbesondere Photovoltaik. Mit zunehmender bzw. ausreichender Erfahrung (d. h. Präqualifikation und Marktteilnahme) und steigenden sowie ausreichend verteilten Ausbau könnten dann jedoch die Vorteile überwiegen. Diese sind: höhere Ausfallsicherheit gegenüber großen, zentralen Kraftwerken, Bereitstellung von flexibler Reserveleistung, Synergieeffekte mit lokalem Netzbetrieb und *Power-to-Gas* Strategien. Eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt erscheint daher aus systemtechnischer Sicht grundsätzlich sinnvoll, allerdings sollte sie mit Bedacht und ausreichend Zeit für den Aufbau von Know-how und Kompetenzen verfolgt werden. Größere Anlagenleistungen sind dabei vorteilhafter und daher vorzugsweise zu adressieren als kleinere BHKW.

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend zunächst für drei ausgewählte und als besonders wichtig eingestufte Hemmnisse (vgl. Kapitel 13.5) Empfehlungen gegeben und diskutiert. Ergänzend dazu werden dann abschließend weitere spezifische als auch allgemeine Empfehlungen bezogen auf netzgeführte BHKW abgeleitet.

10.2 Empfehlungen – Fernwirktechnik (inkl. IKT)

Entscheidende technische Voraussetzung für eine netzgeführte Betriebsweise ist eine hinreichende Ausstattung der BHKW mit Fernwirktechnik (inkl. Informations- und Kommunikationstechnik). Die Marktverfügbarkeit und Kosten verschlechtern sich jedoch mit sinkender Anlagenleistung. Besonders für BHKW unterhalb des $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ -Bereichs gibt es noch keine adäquaten Standardprodukte, so dass eine Anschaffung nicht ökonomisch ist. Allerdings

sprechen auch die zuvor genannten Gründe nicht unbedingt für eine rasche und breite Erschließung von kleinen BHKW. Ferner bleibt es zunächst offen, bis zu welcher Anlagengröße dies in Zukunft sinnvoll sein könnte. Vor diesem Hintergrund sind die folgenden Empfehlungen zum Hemmnis Fernwirktechnik zu sehen.

Da es im KWKG und der neuen Mini-KWK-Richtlinie (siehe Kapitel 9.4) an konkreten und eindeutigen Regelungen diesbezüglich fehlt, sollten im Rahmen eines Forschungsprojekts als erstes technische Mindestanforderungen und -funktionalitäten an die Fernwirktechnik inklusive IKT für netz- und stromgeführte Betriebsweisen von verschiedenen großen BHKW erarbeitet werden. Die Federführung dafür sollte bei den zuständigen Ministerien (Bundswirtschafts- bzw. Bundesforschungsministerium) liegen. Für die Bearbeitung sind Experten aus einschlägigen Bereichen der Wissenschaft, der Industrie und der Übertragungsnetzbetreiber einzubeziehen. Dabei sollte die Projektgruppe selbst aus Effektivitätsgründen so klein wie möglich gehalten werden, die erzielten Zwischen- und Endergebnisse jedoch auf etwas breiter angelegten Experten-Workshops konsultiert und validiert werden. Der Beginn der Arbeiten sollte kurzfristig erfolgen und die Projektdauer so kurz wie möglich gehalten werden, um die bestehenden Unsicherheiten bezogen auf die Ausgestaltung dieser wichtigen technischen „Schnittstelle“ sowohl für netz- als aber auch für stromgeführte Betriebsweisen rasch zu beseitigen.

Die entwickelten technischen Mindestanforderungen sollten dann zügig und einheitlich – ggf. differenziert nach Anlagengröße – in die einschlägigen Gesetze und Förderrichtlinien übernommen werden. Parallel dazu ist ein Monitoring der Anforderungen und ihrer Wirkungen vorzubereiten, um sie zügig nach Inkrafttreten der neuen Anforderungen überprüfen zu können. Ziel ist es zu klären, inwiefern die Anforderungen greifen und ausreichend robust gegenüber absehbaren Veränderungen sind bzw. Anpassungen notwendig erscheinen.

Auf der Basis von Mindestanforderungen sollten der technische Stand, die kommerzielle Verfügbarkeit und Kostenreduktionspotenziale von Fernwirktechnik für verschieden große BHKW erfasst und ausgewertet werden. Dabei sind laufende einschlägige Pilotprojekte (z. B. E-Energy⁶²) und innovative Geschäftsmodelle (vgl. Tab. 4-8) zu berücksichtigen. Ziel ist es, die Lücken zwischen Technik und Anwendung und damit den Handlungsbedarf genauer zu ermitteln. Eine solche Untersuchung sollte allerdings nicht erst nach Abschluss, sondern während der Ableitung von Mindestanforderungen starten, um möglichst wenig Zeit für die Überwindung dieses Hemmnisses zu verlieren.

Die erzielten Ergebnisse sollten dann als Basis für die Entscheidung über Förderbedarf und dessen Gestaltung dienen. Weitergehende Empfehlungen zu diesem Hemmnis werden aufgrund der grundsätzlich noch offenen Fragen zu diesem Zeitpunkt als nicht sinnvoll angesehen.

62 Mehr Informationen unter www.e-energy.de/

10.3 Empfehlungen – Mangelnde Wettbewerbsfähigkeit und regulatorische Nachteile

Es gibt zwar nennenswerte technische Potenziale von BHKW für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt, diese sind aber aufgrund der niedrigen Minutenreserve-Marktpreise im Vergleich zur Eigenstromnutzung oder Teilnahme am Spotmarkt (day-ahead) derzeit nicht konkurrenzfähig (vgl. Kapitel 9.1). Dies gilt besonders für kleinere BHKW, da sie höhere spezifische Kosten und in der Regel auch höhere objektbezogene Bezugsstrompreise haben als größere Anlagen. Die Nachteile könnten auf Betreiberseite zwar grundsätzlich durch betriebswirtschaftlich optimierte Einsatzstrategien⁶³ zum Teil kompensiert werden, dies dürfte jedoch – wiederum besonders für kleinere Anlagen – absehbar nicht ausreichen.

Ferner erschwert die für Minutenreserve-Gebote geforderte Zeitscheibenlänge von vier Stunden den Einsatz und damit die Wettbewerbsfähigkeit bzw. Möglichkeit für Zusatzerlöse im Vergleich zum Spotmarkt. Sie wirkt zudem stark begrenzend auf das realisierbare Potenzial. Vor diesem Hintergrund und der Diskussion zu Beginn dieses Kapitels werden folgende Empfehlungen gegeben.

Im Hinblick auf steigende, prinzipiell verfügbare technische Regelleistungspotenziale im Zuge des angestrebten KWK-Ausbaus sollte u. a. auf der Basis dieser Arbeit eine ergänzende Bestimmung der, ökonomischen Potenziale von verschiedenen großen, strom- und netzgeführten BHKW sowie ihrer (langfristigen) energiewirtschaftlichen Bedeutung durchgeführt werden. Damit soll herausgefunden werden,

- ob bzw. unter welchen Rahmenbedingungen und Marktentwicklungen BHKW differenziert nach Anlagengrößen ökonomisch und energiewirtschaftlich sinnvoll auch netzgeführt eingesetzt werden können, und
- in welcher Höhe und welchem Umfang ggf. die Deckungslücken für einen wirtschaftlichen Betrieb liegen.

Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung sollten dann als Basis für Entscheidungen über mögliche Förderinstrumente für eine Markteinführung bzw. –verbreitung dienen. Dabei sollte die Untersuchung bei den marktnäheren, großen BHKW Anlagen beginnen. Auf der einen Seite ist dies aufgrund der beginnenden Geschäftsaktivitäten (vgl. Tab. 4-8) und günstigeren ökonomischen Ausgangslage nicht unbedingt nötig. Auf der anderen Seite könnten daher bereits geringe Anreize für eine Intensivierung ausreichen, um besser und zügiger mehr Erfahrungen zu sammeln, die später ggf. auch auf kleinere Anlagen übertragen werden können.

In diesem Sinne erscheint für eine kurzfristige Realisierung von mehr Pilotprojekten bzw. netzgeführten Anlagen eine zeitlich begrenzte (und ggf. gedeckelte) Einführung von einmaligen Zuschüssen für eine Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt prüfenswert. Diese könnten z. B. mit relativ wenig Aufwand an die Präqualifikation von Anlagen gekoppelt

⁶³ Denkbar sind z. B. eine vorrangige Abgabe von negativen Angeboten zwischen 0 und 8 Uhr im Winter und eher positive Angebote (tagsüber) im Sommer (vgl. Kapitel 9.1.6) bzw. Hybridstrategien aus strom- und netzgeführtem Einsatz.

werden, vom Umfang her gut gesteuert werden und bergen im Vergleich zu Boni oder zusätzlichen Einspeisevergütungen deutlich weniger Risiken für Fehlsteuerungen und Mitnahmeeffekte.

In regulatorischer Hinsicht sollte eine Aufwand-Nutzen-Analyse bezogen auf eine Verringerung der Zeitscheibenlänge für Minutenreserve-Gebote von vier auf zwei bzw. eine Stunde(n) durchgeführt werden. Eine solche Verkürzung würde auf der einen Seite die Teilnahmeflexibilität und das Angebotspotenzial (besonders im Sommer) und damit die Wettbewerbsfähigkeit von BHKW deutlich erhöhen. Da diese Maßnahme im Effekt etwa umgekehrt proportional einer Vergrößerung von Wärmespeichern entspricht, könnten dadurch entsprechende Investitionen und Aufwendungen in Form von Zuschlägen reduziert werden. Diese Einsparungen könnten dann theoretisch zur teilweisen Kompensation für den erhöhten organisatorischen und damit finanziellen Aufwand auf Seiten des Minutenreservemarktes eingesetzt werden. Auf der anderen Seite führt eine Verkürzung der Zeitscheiben auch zu höheren Transaktionskosten, da mehr Ausschreibungen, mehr Datenaustausch, mehr Abrechnungen und insgesamt mehr Organisation dafür notwendig ist. Zudem können Situationen mit einem Zeitscheibenwechsel kritisch sein, wenn Abfahr- und Anfahrvorgänge von Marktteilnehmern nicht exakt synchron sondern zeitversetzt verlaufen. Bei kurzen Zeitscheiben mit vielen potentiell wechselnden Anbietern können sich so ungewollte Leistungsspitzen oder -senken am Anfang bzw. Ende der Zeitscheibe ergeben.

10.4 Weitere Empfehlungen

Im Fall einer positiven Bewertung der ökonomischen und energiewirtschaftlichen Aussichten für netzgeführte BHKW sollte eine Unterstützung ihrer Markteinführung zunächst vorrangig bei den großen Anlagen⁶⁴ begonnen werden, da hier Potenzial und Nutzen im Verhältnis zu Aufwand und Kosten in der Regel am besten ausfallen. Dafür könnten angesichts der begonnenen Aktivitäten bereits einmalige bzw. zeitlich begrenzte Anreize wie z. B. Zuschüsse gekoppelt an die Präqualifikation oder Prämien gekoppelt an die nachweisliche Vorhaltung von Minutenreserve eine ausreichende Wirkung entfalten. Die geförderten Akteure bzw. Projekte sollten dafür an Evaluierungen teilnehmen, um Erfahrungen für die Weiterentwicklung sammeln zu können.

Ferner sollte eine Erschließung des Minutenreservepotenzials vorzugsweise im jüngeren Bestand größerer Anlagen begonnen werden, d. h. durch eine nachträgliche Umstellung von wärme- auf netzgeführten Betrieb. Auf diese Weise kann zu minimalen zusätzlichen Kosten das ohnehin vorhandene Potenzial gehoben und dadurch wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die sich später für einen weiteren Ausbau als vorteilhaft erweisen können.

⁶⁴ Welche Anlagengrößen dazu gehören sollten, kann hier ohne eine zusätzliche ökonomische Analyse nicht genauer angegeben werden. Es können jedoch folgende Hinweise gegeben werden: Anlagen mit Leistungen größer oder gleich der Mindestgebotsgröße von 5 MWel sowie Anlagen unter 100 kWel (mangelnde Fernwirktechnik) sollten zunächst nicht adressiert werden. Als noch vertretbare untere Grenze kann aus heutiger Markt-Sicht die Anlagenleistung der geplanten „Zuhause-Kraftwerke“ (ca. 20 kWel) von Lichtblick dienen.

Im Sinne einer Flexibilisierung zu möglichst geringen Zusatzkosten sollten neue BHKW vorzugsweise mit größeren Wärmespeichern als heute gebaut werden. Da die geltenden Bedingungen an die Zuschüsse nicht automatisch zu einer größeren Auslegung führen (siehe Kapitel 9.4.3) sollten sie zusätzlich an Mindestgrößen geknüpft werden. Als Kriterium dafür bietet sich – analog zur heutigen Planung – die mögliche Dauer des Nennlastbetriebs bis zur vollständigen Beladung des Speichers an. Hier erscheint eine Verdopplung der heute üblichen Auslegungsgröße (in der Regel eine Vollbenutzungsstunde) sowohl für einen netz- als auch stromgeführten Betrieb sinnvoll. Da bei einer Vergrößerung konventioneller Wärmespeichers der Platzbedarf und die Wärmeverluste ansteigen, sollte die Einführung eines „Technologie- oder Innovationsbonus“ für die erfolgreiche technische Reduktion der Speicherverluste durch bessere Dämmung (z. B. Vakuumdämmung) bzw. die platzsparende Erhöhung der Kapazität durch Einsatz von Latentwärmespeicher geprüft werden. Ein erfolgreicher Anstoß solcher Entwicklungen würde im Sinne einer *no regret* Maßnahme auch anderen umweltfreundlichen Wärmesystemen, wie z. B. Solarthermie und Wärmepumpe, zu Gute kommen.

Eine Unterstützung der Flexibilisierung durch Vergrößerung der Anlagenauslegung sollte aus ökonomischen Gründen und aufgrund der bestehenden offenen Fragen zunächst nicht unterstützt werden. Zuvor sind diesbezüglich in jedem Fall die Ergebnisse aus den empfohlenen Untersuchungen abzuwarten. Ein Einsatz von Notkühlern zur Überwindung der Potenzialsenke im Sommer ist dagegen im kleinen Anlagenbereich bzw. bei Wohngebäuden aus ökonomischen, ökologischen und technischen Gründen nicht empfehlenswert. Bei größeren Anlagen im Nichtwohngebäude- und Industriebereich erscheint ihr Einsatz – bei strenger Kopplung an den Regelleistungsmarkt – dagegen aufgrund des nur geringen Anstiegs der CO₂-Emissionen vertretbar, wenn dadurch neue konventionelle Regelleistungskapazitäten vermieden werden können. Eine (direkte) Förderung ist ohne vorherige ökonomische und energiewirtschaftliche Analysen jedoch nicht empfehlenswert.

Trotz der künftig vielversprechenden technischen Potenziale von BHKW am Minutenreservemarkt ist hierauf nicht die Priorität bei der Gestaltung der Rahmenbedingungen für BHKW zu legen. Anreize für einen verstärkten weiteren Ausbau von BHKW sollten Vorrang vor Anreizen für die Erschließung der zugehörigen Regelleistungspotenziale haben, da der Ausbau direkt mit zur Steigerung des technischen Gesamtpotenzials beiträgt. Dies gilt mittelbar auch für die Forcierung der energetischen Gebäudesanierung bei Bestandsanlagen, da dies nachträglich einer Flexibilisierung der Anlage entspricht und dadurch ihr Regelleistungspotenzial erhöht wird. Wenngleich zunächst nachrangig, wäre es vorteilhaft, wenn dabei bereits eine spätere Umstellung auf einen strom- bzw. netzgeführten Betrieb mit gedacht und vorbereitet würde.

In diesem Zusammenhang ist grundsätzlich zu klären, welche Rollen dezentrale Systeme wie BHKW in Zukunft übernehmen sollen (z. B. dezentrale Bereitstellung von Regelleistung). Dies geht beispielsweise aus dem Energiekonzept der Bundesregierung nicht hervor. In diesem Kontext ist auch die offene Frage zu sehen, welche Regelleistungsstrukturen (zentral, dezentral, hybrid) langfristig besser zur Transformation der Energieversorgung zu erneuerbaren Energien passen. Dies sollte ebenfalls wissenschaftlich untersucht werden.

10.5 Zusammenfassung Empfehlungen

Ein Einsatz von BHKW am Minutenreservemarkt ist nicht zwingend erforderlich, da es mittelfristig noch ausreichend konventionelle Regelkapazitäten geben dürfte und neuer Bedarf

schnell sowie fixkostengünstig durch Gasturbinen, GuD-Kraftwerke und auch abschaltbaren Lasten bereitgestellt werden kann. Die identifizierten energiewirtschaftlichen und systemtechnischen Nachteile von netzgeführten BHKW im Vergleich zu konventionellen Systemen fallen jedoch mit steigender Anlagengröße immer weniger ins Gewicht. Eine (breitere) Markteinführung von größeren Anlagen (ab ca. 100 kW_{el}) erscheint daher kurz- bis mittelfristig realistisch und auch sinnvoll. Bei kleineren Systemen wird dies neben ihrem Ausbau maßgeblich von der Entwicklung kleiner und kostengünstiger Fernwirktechnik, dem Nachweis ihrer Machbarkeit sowie von der weiteren Entwicklung des Minutenreservemarkts abhängen.

Vor diesem Hintergrund wurden folgende konkrete Empfehlungen für die drei Hemmnisse „fehlende Fernwirktechnik“, „mangelnde Wirtschaftlichkeit“ und „Minutenreserve-Gebotsdauer“ diskutiert:

- Aufstellung von konkreten, anwendungsspezifisch differenzierten sowie einheitlichen Mindestanforderungen an die Fernwirktechnik und ihre Aufnahme in das KWKG sowie die Mini-KWK-Förderrichtlinie.
- Bestimmung von technischem Stand, kommerzieller Verfügbarkeit, Kosten und Kostensenkungspotenziale von Fernwirktechnik für BHKW.
- Bestimmung der ökonomischen Potenziale von netzgeführten BHKW differenziert nach Anlagengröße und Anwendungsbereich.
- Prüfung der Einführung von zeitlich begrenzten (und ggf. gedeckelten) einmaligen Zuschüssen für eine Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt gegen Nachweis der Präqualifikation.
- Durchführung einer Aufwand-Nutzen-Analyse zu einer Verringerung der Mindestgebotsdauer für Minutenreserveangebote von vier auf zwei bzw. eine Stunde.

Abschließend wurden folgende weitere „generelle“ Empfehlungen gegeben:

- Beginn einer Förderung bei großen Anlagen und vorzugsweise im neueren Bestand, wenn die ökonomischen und energiewirtschaftlichen Aussichten positiv bewertet wurden, zugleich aber noch keine ausreichende Wirtschaftlichkeit gegeben ist.
- Kopplung der Zuschüsse an die Errichtung von größeren Wärmespeichern anders als heute üblich an eine Mindestgröße wie z. B. zwei Stunden Nennlastbetrieb, dabei Prüfung der Einführung von Boni für besser gedämmte bzw. kompaktere Speicher mit hoher Kapazität.
- Keine Unterstützung eines Einsatzes von Notkühlern (Flex-3) und zunächst, d. h. vor den Ergebnissen aus den vorgeschlagenen Untersuchungen, auch nicht für Anlagenvergrößerungen (Flex-1).
- Priorität vor Unterstützungsmaßnahmen für netzgeführte BHKW sollten Maßnahmen zur Steigerung des weiteren BHKW-Ausbaus und zur Gebäudesanierung haben.
- Grundsätzliche Klärung der Frage, welche Rollen dezentrale Systeme wie BHKW in Zukunft übernehmen sollen (z. B. dezentrale Bereitstellung von Regelleistung) und welche Regelleistungs-Strukturen (zentral, dezentral, hybrid) langfristig besser zur Transformation der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien passen.

11 Zusammenfassung

Im Rahmen des weiteren Ausbaus der erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung ist aufgrund der fluktuierenden Eigenschaft von Photovoltaik- und Windkraftstrom mit einem Anstieg des Bedarfs an Regelleistung, insbesondere an Minutenreserve, zum Ausgleich von Prognoseabweichungen zu rechnen. Zugleich soll der Anteil der KWK an der Nettostromerzeugung bis zum Jahr 2020 auf einen Anteil von mindestens 25 % gesteigert werden. Hierfür bestehen besonders im Wohngebäudebereich mit derzeit mehr als 17 Millionen Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern noch sehr große bislang unerschlossene Potenziale für den Bau von BHKW. Diese sind flexibel bzw. steuer- und regelbar einsetzbar und können grundsätzlich – virtuell miteinander zu ausreichender Größe gekoppelt – Beiträge zur Deckung des Regelleistungsbedarfs und damit zur Integration von Strom aus erneuerbaren Energien leisten.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel dieser Untersuchung, das technische Regelleistungspotenzial von BHKW in Deutschland für die Jahre 2010, 2020 und 2030 zu bestimmen. Der Fokus lag auf den kleineren Leistungsbereich für die objektscharfe Versorgung von Wohngebäuden sowie von gewerblichen Objekten (Nichtwohngebäuden). Ergänzend wurde exemplarisch eine größere BHKW-Anlage mit Wärmenetz und ein industrieller Anwendungsfall untersucht. Ferner wurde betrachtet,

- in welchem Umfang verschiedene Flexibilisierungsmaßnahmen die Potenziale erhöhen,
- wie hoch die CO₂-Emissionen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb bzw. zu einem ungekoppelten Referenzsystem ausfallen sowie
- welche Hemmnisse die Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt erschweren und wie diese überwunden werden können.

Da der Regelleistungsmarkt in drei Teilmärkte (Primär-, Sekundär- und Minutenreserve) mit sehr unterschiedlichen Anforderungen gegliedert ist, wurde zunächst untersucht, welcher Teilmarkt am besten mit dem Einsatz von BHKW korrespondiert. Die Analyse der Vereinbarkeit von BHKW-Eigenschaften mit den jeweils geltenden Anforderungen für die Präqualifikation und dem Handelsablauf zeigte, dass derzeit der Primärreservemarkt nicht und der Sekundärreservemarkt nur bedingt und nicht in der Breite als Vermarktungsoption in Frage kommen. Zudem zielen viele der neuen einschlägigen Geschäftsmodelle auf die Bereitstellung von Minutenreserve ab. Daher wurde der Minutenreservemarkt als der aus technischer und regulatorischer Sicht am besten geeignete Regelleistungsmarkt für BHKW ausgewählt und vertieft untersucht.

Im Rahmen dieser Studie wurden vier BHKW-Anwendungsbereiche unterschieden: 1) Wohngebäude 2) Nichtwohngebäude 3) Wärmenetze und 4) Industrie. Für jeden Bereich wurden konkrete Objekte bzw. Gebäudetypen ausgewählt und dafür einschlägige Wärmebedarfsganglinien bestimmt. Auf dieser Basis wurden passende BHKW (inkl. Spitzenkessel und Speicher) zugeordnet und wie bisher üblich auf die thermische Grundlast (ca. 30 % der Spitzenlast) ausgelegt. Im Wohngebäudebereich wurden zehn Gebäudetypen verschiedener Größe sowie unterschiedlicher Effizienzstandards und im Nichtwohngebäudebereich fünf verschiedene Nutzungen mit hohem KWK-Potenzial ausgewählt. Die Bereiche Wärmenetze und Industrie wurden dagegen anhand von jeweils

einem Fallbeispiel exemplarisch untersucht. Die betrachteten Anlagengrößen liegen zwischen 1 und 50 kW_{el} (Wohngebäude), 20 und 1.200 kW_{el} (Nichtwohngebäude), bei 2.800 kW_{el} (Wärmenetz) und 50 kW_{el} (Industrie). Für Hochrechnungen der objektscharfen Ergebnisse für Wohn- und Nichtwohngebäuden auf den Bestand wurde der Entwicklungspfad des Szenarios A der EE-Langfristszenarien 2011 für BHKW in Deutschland herangezogen.

Die Bestimmung des technischen Minutenreservepotenzials der betrachteten BHKW erfolgte mit Hilfe eines eigenen Modells und Simulationsrechnungen für wärme- und netzgeführte Betriebsweisen in jeweils viertelstündlicher Auflösung über ein Jahr.

Die Ergebnisse für den netzgeführten Betrieb zeigen, dass im Jahresmittel etwa bis zu 68 % (Wohngebäude), 71 % (Nichtwohngebäude), 82 % (Wärmenetz) bzw. 71 % (Industrie) der installierten und verfügbaren BHKW-Leistung zur Bereitstellung von Minutenreserve genutzt werden können. Während etwa einem Drittel des Jahres kann bei niedrigen Außentemperaturen die volle verfügbare Anlagenleistung genutzt werden, während im Sommer das Regelleistungspotenzial stark einbricht. Gemäß Hochrechnung für die Wohn- und Nichtwohngebäude hätten die dort installierten BHKW etwa bis zu 7 % der im Jahr 2010 insgesamt real angebotenen Minutenreserve bereitstellen können. Unter der Annahme eines unveränderten Regelleistungsmarktes und eines BHKW-Ausbaus gemäß der EE-Langfristszenarien 2011 wäre im Jahr 2020 (2030) sogar ein Abdeckungsgrad von bis zu 42 % (54 %) bezogen auf den Minutenreservemarkt möglich.

Zusätzlich wurde der Einfluss von drei verschiedenen Flexibilisierungsoptionen auf das Minutenreservepotenzial untersucht: Eine Verdoppelung der Anlagengröße (Flex-1), eine Vervierfachung des Speichervolumens (Flex-2) und der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3). Die grundsätzlichen Wirkungen lassen sich am besten anhand der geordneten Jahresdauerlinie (JDL) für Minutenreservenangebote verdeutlichen:

- Eine Vergrößerung der Anlage verschiebt das Angebotsplateau der JDL nach oben zu einer höheren Leistung, der zeitliche Umfang wird dagegen kaum erweitert.
- Eine Vergrößerung des Speichers macht die Übergangszeiten besser nutzbar, verschiebt daher das Plateau der JDL weiter nach rechts und erhöht den zeitlichen Umfang für Minutenreservenangebote.
- Der Einsatz eines Notkühlers (Flex-3) entkoppelt die Minutenreservenangebote vom Wärmebedarf, so dass zu jedem Zeitpunkt die volle Leistung angeboten werden kann (konstantes Angebotsplateau).

Die tatsächliche Wirkung hängt jedoch stark von der BHKW-Auslegung ab: Bei einem relativ geringem Lastdeckungsgrad (z. B. WG 4) kann die Option Flex-1 das Minutenreservepotenzial stark erhöhen, bei einem bereits hohen Lastanteil (z. B. WG 1 oder WG 5) ist dagegen kein großer Effekt mehr zu erreichen. Für die Option Flex-2 verhält es sich in diesen Fällen genau umgekehrt.

Ein zusätzlicher Kosten-Nutzen-Vergleich zeigt, dass in den exemplarisch untersuchten Objekten die Vergrößerung des Speichers (Flex-2) in der Regel die geringsten Kosten pro zusätzlich generierte Regelleistung aufweist. Je nach Anlagenkonfiguration können jedoch auch mit den Optionen Flex-1 und Flex-3 ähnlich geringe Kosten wie bei Flex-2 erreicht werden.

Die Veränderungen der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von den verschiedenen BHKW-Betriebsweisen wurden mit Hilfe der Finnischen Allokationsmethode untersucht. Dabei wurde die ungekoppelte Erzeugung von Strom mittels GuD-Kraftwerk und von Wärme mittels Erdgaskessel als Referenzsystem berücksichtigt. Ein Wechsel von der heute üblichen wärmegeführten Betriebsweise hin zu einer netzgeführten Fahrweise trägt auf Objektebene zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen um 8 bis 16 Prozent⁶⁵ bei. Die Einsparungen gegenüber dem ungekoppelten Referenzsystem vermindern sich dadurch etwa um die Hälfte, von ursprünglich 15 bis 25 %⁶⁶ (wärmegeführt) auf dann 8 bis 13 %⁶⁷ (netzgeführt). Der netzgeführte Betrieb schneidet damit emissionsseitig und primärenergetisch immer noch signifikant besser ab als die getrennte Erzeugung.

Die Flexibilisierungsoptionen wirken sich im Vergleich zum netzgeführten Betrieb unterschiedlich auf die CO₂-Emissionen aus. Eine Verdopplung der Anlagengröße (Flex-1) führt in fast allen Fällen (mit Ausnahme von Wohngebäudetyp 1 und 5) zu niedrigeren Emissionswerten. Ein vierfach größerer Speicher (Flex-2) bewirkt bei Nichtwohngebäuden emissionsseitig kaum Veränderungen (< 0,2 %), bei Wohngebäuden, Wärmenetz- und Industrie-Beispiel kommt es jedoch überwiegend zu einer leichten Zunahme (< 4 %). Der Notkühlereinsatz (Flex-3) führt bei den Wohngebäudetypen 1, 5 und 2 aufgrund des dort eingesetzten Stirlingmotors mit geringer SKZ zu einem besonders hohen Anstieg der CO₂-Emissionen um 52 %, 34 % bzw. 14 %. In den übrigen Fällen bewirkt der Notkühler gegenüber der netzgeführten Variante nur einen leichten bis mäßigen Emissionsanstieg um 1 % beim Wärmenetz, durchschnittlich 3 % bei den NWG, durchschnittlich 5 % bei den WG (ohne WG 1, 2 und 5) und 8 % beim Industrie-BHKW.

Hochrechnungen für die betrachteten Wohn- und Nichtwohngebäude auf Basis des Mengengerüsts der EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) für das Jahr 2020 zeigen, dass die gesamten CO₂-Emissionen im WG-Bereich zwischen ca. 3,9 Mio. t (wärmegeführt) und 4,8 Mio. t (ungekoppelt) und im NWG-Bereich entsprechend zwischen ca. 9,1 Mio. t und 11,7 Mio. t liegen. Die insgesamt mögliche CO₂-Einsparung gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung verringert sich durch die Teilnahme am Minutenreservemarkt im günstigsten Fall (Flex 1) von 18 % auf 11 % (WG) und von 22 % auf 16 % (NWG). Im ungünstigsten Fall (Flex-3) reduziert sich die CO₂-Einsparung von 22 % auf 9 % (NWG) bzw. von 18 % auf minus 4 % (WG). Bei den Wohngebäuden findet unter Einsatz des Notkühlers also ein Vorzeichenwechsel statt und die Emissionen steigen gegenüber der ungekoppelten Referenz um 4 % an.

Neben den steigenden CO₂-Emissionen gibt es eine Reihe weiterer Nachteile bzw. Hemmnisse, die eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt behindern. Um diese zu erfassen, wurde aus technischer, ökonomischer, ökologischer, politisch-juristischer und sozialer Sicht analysiert, welche Aspekte direkt hemmend wirken (können). Die darauf aufbauende ad-hoc

65 netzgeführt vs. wärmegeführt: WG: 8 bis 16 % / NWG: 11 bis 15 % / Wärmenetz: 11 % / Industrie: 13 %

66 wärmegeführt vs. Referenz: WG: 15 bis 25 % / NWG: 19 bis 24 % / Wärmenetz: 19 % / Industrie: 22 %

67 netzgeführt vs. Referenz: WG: 8 bis 13 % / NWG: 10 bis 13 % / Wärmenetz: 10 % / Industrie: 11 %

Bewertung durch einschlägige Experten auf dem Projekt-Workshop im Mai 2012 sowie die weiteren eigenen Analysen zeigen, dass die ökonomischen Hemmnisse und die geltende Mindestgebotsdauer für Minutenreservegebote am relevantesten sind.

Zu den wesentlichen ökonomischen Hemmnissen gehören die noch zu teure Fernwirktechnik für kleinere BHKW und die größere wirtschaftliche Attraktivität besonders der Eigenstromnutzung als auch eines gezielten Stromverkaufs am Spotmarkt.

In technischer Hinsicht sind die bisher übliche wärmegeführte Auslegung der BHKW, fehlende Standards für die benötigte Fernwirk- und Kommunikationstechnik, der starke Rückgang des Wärmebedarfs im Sommer („Sommerloch“) und speziell im Wohngebäudebereich der mangelnde Platz für Flexibilisierungsmaßnahmen als relevante Hemmnisse zu nennen.

Im KWKG und der Förderrichtlinie zu Mini-KWK-Anlagen fehlen Begriffe und Regelungen zu netzgeführten und zu virtuell miteinander verbundenen BHKW sowie konkrete und einheitliche Anforderungen an die Ausstattung mit Fernwirk-, Informations- und Kommunikationstechnik. Die Vorgaben für die Zuschussgewährung an die Errichtung größerer Speicher und die Wahlmöglichkeit über den Zeitraum für die KWK-Zuschläge bei kleinen BHKW ($< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$) greifen zu kurz bzw. bieten zu wenig Anreize.

Nicht zuletzt behindern verschiedene soziale Faktoren, wie die bisher übliche Praxis (wärmegeführte Auslegung und Betrieb), mangelnde Akzeptanz von Eigentümern gegenüber externen Zugriffen, mangelnde Motivation und mangelndes Verständnis des Regelleistungsmarktes den Wechsel zu netzgeführten BHKW.

Trotz der – insbesondere in Zukunft – nennenswerten technischen Minutenreservepotenziale von BHKW ist ein solcher Einsatz nicht zwingend erforderlich. Die identifizierten energiewirtschaftlichen und systemtechnischen Nachteile von netzgeführten BHKW im Vergleich zu konventionellen Systemen (Gasturbine, GuD) fallen jedoch mit steigender Anlagengröße und fortschreitendem Zeithorizont immer weniger ins Gewicht. Eine (breitere) Markteinführung von größeren Anlagen (ab ca. $100 \text{ kW}_{\text{el}}$), die überwiegend von neuen Anbietern verfolgt wird, erscheint daher kurz- bis mittelfristig realistisch und auch sinnvoll. Bei kleineren Systemen wird dies neben ihrem Ausbau maßgeblich von der Entwicklung kleiner und kostengünstiger Fernwirktechnik, dem Nachweis ihrer Machbarkeit sowie von der weiteren Entwicklung des Minutenreservemarkts abhängen. Vor diesem Hintergrund wurden die folgenden Handlungsempfehlungen bezogen auf netzgeführte BHKW abgeleitet.

- Aufstellung von konkreten, anwendungsspezifisch differenzierten sowie einheitlichen Mindestanforderungen an die Fernwirktechnik und ihre Aufnahme in das KWKG sowie die Mini-KWK-Förderrichtlinie.
- Bestimmung von technischem Stand, kommerzieller Verfügbarkeit, Kosten und Kostensenkungspotenzialen von Fernwirktechnik für BHKW.
- Bestimmung der ökonomischen Potenziale von netzgeführten BHKW, differenziert nach Anlagengröße und Anwendungsbereich.
- Prüfung der Einführung von zeitlich begrenzten (und ggf. gedeckelten) einmaligen Zuschüssen für eine Teilnahme von BHKW am Regelleistungsmarkt gegen Nachweis der Präqualifikation.
- Durchführung einer Aufwand-Nutzen-Analyse hinsichtlich einer Verringerung der Mindestgebotsdauer für Minutenreserveangebote von vier auf zwei bzw. einer Stunde.

- Beginn einer Förderung bei großen Anlagen und vorzugsweise im jüngeren Bestand, falls die energiewirtschaftlichen Aussichten positiv bewertet wurden, zugleich aber noch keine ausreichende Wirtschaftlichkeit gegeben ist.
- Kopplung der Zuschüsse an die Errichtung von größeren Wärmespeichern als heute üblich an eine Mindestgröße wie z. B. zwei Stunden Nennlastbetrieb, dabei Prüfung der Einführung von Boni für besser gedämmte bzw. kompaktere Speicher mit hoher Kapazität.
- Keine Unterstützung eines Einsatzes von Notkühlern (Flex-3) im kleinen Anlagenbereich und zunächst, d. h. vor den Ergebnissen aus den vorgeschlagenen Untersuchungen, auch nicht für eine Anlagenvergrößerung (Flex-1).
- Priorität vor Unterstützungsmaßnahmen für strom- und netzgeführte BHKW sollten die Maßnahmen zur Steigerung des weiteren Ausbaus und Maßnahmen zur Gebäudesanierung haben.
- Grundsätzliche Klärung der Frage, welche Rollen dezentrale Systeme wie BHKW in Zukunft übernehmen sollen (z. B. dezentrale Bereitstellung von Regelleistung) und welche Regelleistungs-Strukturen (zentral, dezentral, hybrid) langfristig besser zur Transformation der Energieversorgung zu erneuerbaren Energien passen.

12 Quellen- und Literaturangaben

- 50 Hertz et al. (2011): Vergabe von Regelleistung. Veröffentlichung der ÜNB auf ihrer jeweiligen Homepage und auf www.regelleistung.net.
- 50 Hertz et al. (2012): Anbieterliste Regelleistung.
<https://www.regelleistung.net/regelleistungWeb/action/ausschreibung/abrufwerte/anbieterliste.do>
- Agas GmbH (2007): Verbrauchskennwerte 2007 - Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland.
- Arndt, U. (2008): Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation. München: Technischen Universität München. Abgerufen von URL: www.baufachinformation.de/literatur.jsp?dis=2008109008879.
- ASUE (Hrsg.) (2011): BHKW-Kenndaten 2011 - Module, Anbieter, Kosten.
http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/broschueren/bhkw_kenndaten_2011.html. Last access: 28 November 2012.
- Bachor, A.; et al. (2010): Abrechnungsvarianten - Stromerzeugung aus KWK-Anlagen in Mehrfamilienhäusern; BWK 62(7/8)47ff.
- BalancePower (2012): Minutenreserve.
<http://www.google.de/search?q=minutenreserve+balancepower&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:de:official&client=firefox-a>. Last access: 11 Juli 2012.
- Balzer, H. (o. J.): Erfahrungsbericht Virtuelles Kraftwerk.
- Banse, S. (2011): Das Thermoskannenprinzip. Sonne, Wind & Wärme (18/2011)72-74.
- BGW (2006): Praxisinformation P 2006 / 8 Gastransprt/Betriebswirtschaft - Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nicht-leistungsgemessener Kunden. Bonn: BGW Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft.
- BHKW-Consult (2011): Umfrage unter KWK-Anlagenherstellern.
- BHKW-Consult (2012a): Daten zum Industriebeispiel (Käserei); BHKW-Consult; um eigenen Annahmen ergänzt.
- BHKW-Consult (2012b): Persönliche Informationen zum Platzbedarf für die betrachteten Flexibilisierungen (Email); Gailfuss, M.
- BHKW-Consult (2012c): Buderus / Leistungen Wirkungsgrade für Teillast; persönliche Information durch M. Gailfuss.
- BHKW-Consult (2012d): Persönliche Informationen zum Stromsteuergesetz (Email), Gailfuss, M.
- BHKW-Forum (2012): 2. Wirtschaftlichkeit | BHKW-Infothek. <http://www.bhkw-forum.info/bhkw-informationen/wirtschaftlichkeit-foerderung/>. Last access: 24 August 2012.
- BKWK (2012): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft- Wärme- Kopplungsgesetz). http://www.kwkg-novelle.de/kwk-gesetz_download.html. Last access: 11 Juli 2012.

- BMU (2011): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: „Leitstudie 2010“. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf
- BMU (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Studie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. http://erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/doc/48514.php. Last access: 25 April 2012.
- bne (2011): KAPAZITATSMARKT – Rahmenbedingungen, Notwendigkeit und Eckpunkte einer Ausgestaltung (Studie). Aachen: Bundesverband Neuer Energieanbieter e.V. (Hrsg.).
- BNetzA (2006): Festlegung Minutenreserve Ausschreibung. Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/DE/DieBundesnetzagentur/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6/2006/2006_001bis100/BK6-06-012/BK6-06-012FestlegungMinutenrId7318pdf.pdf;jsessionid=9BEA2851BDE9E524372BFF4CC634F690?__blob=publicationFile. Last access: 07 Juli 2011.
- BNetzA (2009): Monitoringbericht 2009. Bonn: Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Presse/Berichte/2009/Monitoringbericht2009EnergieId17368pdf.pdf?__blob=publicationFile
- BNetzA (2010a): Monitoringbericht 2010. Bonn: Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Presse/Berichte/2010/Monitoringbericht2010Energiepdf.pdf;jsessionid=90ED64B360EEB08861F19A75959D518A?__blob=publicationFile
- BNetzA (2010b): Eckpunktepapier zur Weiterentwicklung der Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für die Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve. Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/DE/DieBundesnetzagentur/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6/2010/BK6-10-000bis100/BK6-10-097bis-099/Eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile. Last access: 06 Juli 2011.
- BNetzA (2011a): Beschluss in dem Verwaltungsverfahren wegen der Festlegung zu Verfahren zur Ausschreibung der Regelleistung. Bundesnetzagentur.
- BNetzA (2011b): Entscheidung in dem Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Primärregelleistung. Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1912/DE/DieBundesnetzagentur/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6/2010/BK6-10-000bis100/BK6-10-097bis-099/BK6-10-097_Beschluss.html?nn=54756#download=1. Last access: 06 Juli 2011.
- BNetzA (2011c): Entscheidung in dem Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelleistung. Bundesnetzagentur. http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1912/DE/DieBundesnetzagentur/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6/2010/BK6-10-000bis100/BK6-10-097bis-099/BK6-10-098_Beschluss.html?nn=54756. Last access: 06 Juli 2011.

- BRD (2012): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare Energien Gesetz – EEG) Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung; http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_2012_bf.pdf. Last access: 12 Juli 2012.
- Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M. (2004): Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Offenbach a. Main: Deutscher Wetterdienst.
- Dena (2010): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin: Deutsche Energie Agentur GmbH.
http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF. Last access: 28 Januar 2011.
- Diefenbach, N.; Born, R. (2007): Basisdaten für die Hochrechnung mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU. IWU.
www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flaechen_Gebaeudetypologie_07.pdf. Last access: 16 August 2011.
- Dittmann, A.; Sander, T.; Menzler, G. (2009): Die ökologische Bewertung von Wärme und Elektroenergie – ein Instrument zur Erhöhung der Akzeptanz der Kraft-Wärme-Kopplung. (VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Hrsg.) VIK Mitteilungen (Sonderdruck Juni 2009).
- Ebert, M.; Bohnenschafer, W.; Schüwer, D.; Venjakob, J. (2010): Potenziale der CO₂-Minderung durch Fernwärme - Fokus Neue Bundesländer (vorläufige Endfassung). vorläufiger Endbericht. Leipzig, Wuppertal, Dessau: IE Leipzig und Wuppertal Institut im Auftrag des Umweltbundesamt (UBA).
- EEX (2012): Stundenkontrakte Chart | Spotmarkt Stundenauktion. European Energy Exchange.
<http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Strom/Stundenkontrakte%20|%20Spotmarkt%20Stundenauktion/Stundenkontrakte%20Chart%20|%20Spotmarkt%20Stundenauktion/spot-hours-chart/2010-06-16/PHLIX/-/1d>. Last access: 11 Juli 2012.
- Emmerich, R. (2010): Analyse und Bewertung von KWK-Betreibermodellen im deutschen Wohngebäudesektor. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Karlsruhe.
- energate/e21.info (2012): Vattenfall erzeugt Regelenergie in BHKW.
- energy2market (2012): Das Grüne Kraftwerk, unser virtuelles Kraftwerk: E2M GmbH.
<http://www.energy2market.de/das-gruene-kraftwerk.html>. Last access: 24 August 2012.
- EU (2004): 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 Energie- binnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0050:DE:PDF>. Last access: 14 Juni 2012.
- EU (2011): Durchführungsbeschluss der Kommission vom 19. Dezember 2011 zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Entscheidung 2007/74/EG der Kommission. <http://eur->

- lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:343:0091:0096:DE:PDF. Last access: 14 Juni 2012.
- FFE (2010): Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- FFU - Forschungsstelle Für Umweltpolitik (2007): Zukünftiger Ausbau erneuerbarer Energieträger unter besonderer Berücksichtigung der Bundesländer. Endbericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin.
- Fritsche, U.; Rausch, L. (2008): Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme. UBA Climate Change 08/08. Dessau-Roßlau.
www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3476.pdf. Last access: 03 Mai 2010.
- Gailfuß, M. (2012): Kosten für KWK-Notkühler.
- Gailfuß, Markus (1998): CO₂-Minderungspotentiale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland. Frankfurt a.M.
- Gerhardt, N. (2011): Antw: Fragen zur KWK in der Leitstudie 2011 (persönliche Information per Email).
- Gerigk, U. (2012): Randbedingungen für Sekundärregel-Präqualifikation (Telefoninterview); [e2m/energy-to-market](http://e2m.energy-to-market).
- VDI Gesellschaft Energie und Umwelt (2008): VDI-Richtlinie 4655 „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“.
- Gores, S. (2010): Markt für Blockheizkraftwerke Absatz 2009 und aktuelle Entwicklung (Vortrag); Öko Institut. Berlin.
- Hanke, T. (2011): Wohnflächenentwicklung für 2144 (persönliche Information per Email).
- Hinz, J. H. (2011): Grundlagen - Nutzung von KWK-Strom: Eigenverbrauch, Einspeisung, Verkauf an Dritte und an die Strombörse. Gehalten auf der KWK-Workshop "Möglichkeiten der Vermarktung von Strom aus KWK-Anlagen, Leipzig.
- Hinz, A.-J. (2012): Daten zum Wärmenetz Teurershof (xls-Datei vom 16.05.12); Stadtwerke Schwäbisch Hall.
- Kampwirth, R. (2012): Persönliche Information zum Geschäftskonzept (Email); Lichtblick.
- Kurscheid, E. M. (2009): Zur Bereitstellung positiver Minutenreserve durch dezentrale Klein-KWK-Anlagen.
- Lichtblick AG (2011): Lichtblick ZuhauseKraftwerk. ZuhauseKraftwerk.
http://www.lichtblick.de/h/ZuhauseKraftwerk_285.php
- Matthes, D. F. C. (2011): Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung - Fortführung und Neu-Akzentuierung. Thesen und Hintergrunddaten für die Diskussion. Gehalten auf der MU/UBA-Workshop Kraft-Wärme-Kopplung, Berlin.
- Mauch, W.; Corradini, R.; Wiesemeyer, K.; Schwentzek, M. (o. J.): Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen (09/2010)12–14.

- Müller, J. et al. (o. J.): Energieberatung: Software für den Energieberater Marktübersicht, Methoden ... (Google Books).
<http://books.google.de/books?id=Lez9JzG9RPIC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=bhkw+takten+verschlei%C3%9F&source=bl&ots=6ktKoWRakg&sig=aEHy7rWQPH8fbPJRq9Z-ftuMPTs&hl=en#v=onepage&q=bhkw%20takten%20verschlei%C3%9F&f=false>. Last access: 10 Oktober 2012.
- Musall, E.; et al. (o. J.): Dezentrale Stromerzeugung im Kleinleistungsbereich als Beitrag zur Emissionsminderung im Gebäudebestand. Bergische Universität Wuppertal.
- MWEBWV NRW (2011): Zum Umgang mit großen innerstädtischen Einkaufszentren.
- Next Kraftwerke (2012): NEXTPOOL – STEIGERN SIE DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT IHRES BHKW – MIT NEXT! <http://www.next-kraftwerke.de/>. Last access: 24 August 2012.
- Ortlieb, O. (2012): Persönliche Informationen zur Fernwirktechnik (Telefonat und Email); Vaillant.
- Passivhaus Dienstleistung GmbH (o. J.): Gebaute Passivhaus-Projekte.
<http://www.passivhausprojekte.de/projekte.php?search=2>. Last access: 01 Dezember 2011.
- Pressemitteilung (o. J.): EPEX SPOT treibt die Marktintegration voran, Handelsvolumen wachsen weiter. http://www.epexspot.com/de/presse/press-archive/details/press/EPEX_SPOT_treibt_die_Marktintegration_voran_Handelsvolumen_wachsen_weiter. Last access: 03 Juli 2012.
- Scherbinski, M. (2012a): Systemdienstleistungen durch KWK-Anlagen - Regelenenergievermarktung im Rahmen Virtueller Kraftwerke (Vortrag). Vortrag, Gelsenkirchen.
- Scherbinski, M. (2012b): Persönliche Informationen zum E-Port (Email).
- Schneider, S. (2011): dezKWK-Datengerüst der EE-Leitstudie 2011 - aktualisiert (persönliche Information per Email).
- Schnieders, J. (2005): Dynamisches Verhalten und Wärmeübergabeverluste von Flächenheizungen. Passivhaus Institut (PHI).
www.passiv.de/01_dph/UntBH/BerFL/DynVer_FlHz%20.pdf. Last access: 22 August 2011.
- Simon, R. (2010): Zusätzliche Wertschöpfungspotenziale für dezentrale Anlagen im virtuellen Kraftwerk.
- TeraJoule Energy (2012): TeraJoule Energy - Willkommen im Grünen Internet der Energie.
<http://www.terajoule.de/>. Last access: 24 August 2012.
- Trianel GmbH (2011): Trianel Erzeugungsportfoliomanagement.
- UCTE (Hrsg.) (2009): UCTE Operation Handbook: Policy 1.
- Utesch, B. (2011): Virtuelle Kraftwerke – ideale Partner der Erneuerbaren Energien. Frankfurt a.M.
- Utesch, Bernd (2012): Virtuelle Kraftwerke mit BHKW: ideale Ergänzung zu Erneuerbaren Energien. Frankfurt a.M.

VDI (2008): VDI 4608 Blatt 2. Energiesysteme - Kraft-Wärme-Kopplung - Allokation und Bewertung. (VDI Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag.
www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-4608-blatt-2/103361048. Last access: 14 Juni 2012.

VDN (2007): TransmissionCode 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber.

VIK (2006): CO₂-Kennzeichnung von Strom aus KWK-Anlagen - Brennstoffzuordnung auf elektrische- und thermische Energie. Entwurf. Essen.
www.vik.de/fileadmin/vik/Sonst_info/Brennstoffzuordnung_KWK.pdf. Last access: 03 Mai 2010.

WM-BaWü (2009): Blockheizkraft – Kleine Blockheizkraftwerke Technik, Planung und Genehmigung. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.

13 Anhang – Dokumentation des Experten-Workshops „Regelleistungspotenziale von BHKW“

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „KWK dez. ...“ fand am 8. Mai 2012 in Berlin ein Workshop mit Experten aus den Bereichen Wissenschaft, Beratung, Hersteller, Anwender und Energiemarkt statt. Dieser hatte das Ziel, die bis dahin ermittelten Ergebnisse, vorläufigen Schlussfolgerungen und zugrunde liegenden Annahmen erstmalig einem breiteren Expertenkreis vorzustellen und diese kritisch hinterfragen und diskutieren zu lassen. Der Workshop leistet damit auch einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Qualität und zur Aussagekraft der Forschungsergebnisse.

Es standen die folgenden Leitfragen der Auftragnehmer im Zentrum der Diskussion:

- Wie wird die Bedeutung des Minutenreservemarktes für BHKW langfristig eingeschätzt?
- Welche Versorgungsobjekte bieten die größten Potenziale für netzgeführte KWK?
- Wie sind Aufwand und Nutzen der verschiedenen Flexibilisierungsoptionen (jeweils und im Vergleich miteinander) zu bewerten?
- Inwiefern ist ein Einsatz von Notkühlern als Flexibilisierungsoption empfehlenswert?
- Welche Flexibilisierungsoption ist zur Erhöhung des Regelleistungspotenzials am besten geeignet?
- Wie können CO₂-Emissionen von Regelenergiekraftwerken angemessen bilanziert werden?
- Welche Hemmnisse sind hinsichtlich einer Teilnahme von BHKW am Minutenreserve- bzw. Regelenergiemarkt am stärksten?
- Ab wann und für welche Art der KWK (Größe der Anlage etc.) ist eine Teilnahme am Regelenergiemarkt angezeigt?

Eingangs wurde die sogenannte „Chatham House Rules“⁶⁸ vereinbart. Demnach finden sich nachfolgend keine Zuordnungen von Aussagen zu Teilnehmern und keine Teilnehmerliste.

13.1 Diskussionen und Ergebnisse des Workshops

Der Workshop war in folgende vier Blöcke unterteilt: 1) Annahmen 2) Modell und Ergebnisse 3) CO₂-Emissionen und 4) Hemmnisse. Die folgende ergebnisorientierte Zusammenfassung lehnt sich daran an. Sie wurde von den Auftragnehmern erstellt und im Nachgang dem Auftraggeber und den Teilnehmern zwecks Feedback vor der Veröffentlichung zur Verfügung gestellt.

68 Diese Regel stammt aus dem Royal Institute of International Affairs in London und besagt, dass „... die Teilnehmer frei (sind), die erhaltene Information zu verwenden, jedoch dürfen sie weder die Identität noch die Zugehörigkeit eines Sprechers oder die irgendeines anderen Teilnehmers preisgeben.“ (Wikipedia: Chatham House Rule; Zugriff am 20.06.12)

13.1 Annahmen

Die Rückfragen und Diskussionen bezogen sich im Wesentlichen auf den Fokus BHKW, die Auslegung von Anlagen, den Minutenreservemarkt (Methodik und Bedeutung) sowie auf anderen Marktoptionen.

Die vorgestellten Annahmen und später auch die Ergebnisse betrafen alle, bis auf eine Ausnahme (die 1,2 MW_{el} Anlage für Krankenhäuser), „nur“ relativ kleine KWK-Anlagen mit elektrischen Leistungen < 100 kW_{el}. Es wurde gefragt, warum keine größeren Anlagen, insbesondere Fernwärme-KWK, untersucht wurden? Diese würden eher noch bessere Potenziale aufweisen und auch mit weniger Aufwand und unter attraktiveren Randbedingungen am Regelleistungsmarkt teilnehmen können. Dies ist sicherlich richtig. Gleichwohl spricht für den gewählten Fokus und Untersuchungsrahmen, dass Anlagen je größer sie sind eher schon ohnehin auch am Regelleistungsmarkt teilnehmen und dass es für die BHKW im Vergleich zur zentralen KWK die noch größeren unerschlossenen Potenziale gibt. Ein stärkerer Ausbau dezentraler Anlagen wird zudem allgemein häufig als ein wichtiges Merkmal für die Energiewende angesehen und politisch unterstützt. Daher ist es wichtig zu wissen, ob, in welcher Höhe und in welchem Umfang auch dezentrale Anlagen Systemdienstleistungen erbringen können. Um bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse falsche Rückschlüsse auf die gesamte KWK zu vermeiden, sollen ihre Bezugspunkte und der dezentrale Fokus besonders betont werden.

In diesem Zusammenhang wird der sehr ambitionierte Entwicklungspfad für die BHKW kritisch hinterfragt, insbesondere der starke Anstieg insgesamt bis zum Jahr 2020 und derjenige für den Wohngebäudetyp 2 (kleines Mehrfamilienhaus Altbau). Die für die Hochrechnung verwendete Studie EE-Langfristszenarien 2011 (BMU 2012) wurde von einem Teilnehmer als ungeeignet angesehen. Daher erscheint bezogen auf die Hochrechnungen der ermittelten Potenziale eine Diskussion der Hemmnisse und der möglichen Auswirkungen von anderen Entwicklungspfaden angezeigt. Dies soll durch einen Verweis auf die separate Hemmnisanalyse und durch einen Hinweis, dass es sich „nur“ um eine beispielhafte Hochrechnung auf der Basis eines ausgewählten Szenarios handelt, aufgefangen werden. Eine Diskussion von Varianten und ihren Auswirkungen soll dagegen nicht erfolgen, da die Charakteristika der normierten Potenziale auf Anlagenebene szenariounabhängig sind und die Entwicklung und Analyse von KWK-Szenarien nicht zum Gegenstand dieser Untersuchung gehören.

In Dänemark werden BHKW auf Lastanteile deutlich über 50 % ausgelegt, so dass viele Lastspitzen vollständig durch die KWK abgedeckt und Wärmebedarfsdeckungsanteile von 80 bis 90 % erreicht werden können. Sie sind daher sehr gut für das Angebot von Regelleistung geeignet und dürften größere Potenziale als die hier betrachteten netzgeführten Anlagen bieten. Dies ist allerdings generell auf die bisher unterschiedliche Auslegungs-„Philosophie“ von KWK-Anlagen und die verschiedenen Marktbedingungen in Dänemark und Deutschland zurückzuführen. BHKW werden in Deutschland bisher in der Regel auf die thermische Grundlast (Lastanteil ca. 1/3) und einen wärmegeführten Betrieb ausgelegt, um sie mit möglichst hohen Volllaststunden betreiben zu können. Leistung und Speichervolumen sind daher im Vergleich zu den dänischen Anlagen kleiner und damit auch ihr potenzieller Beitrag zur Regelleistung bei einem Übergang auf einen netzgeführten Betrieb. Eine Annäherung an die dänische „KWK-Philosophie“ findet aber durch die betrachteten Flexibilisierungsoptionen (größere Anlagen- und Speicher, größere Speicher und Notkühlereinsatz) statt (siehe

Kapitel 7.6). Die Regelleistungspotenziale lassen sich dadurch bei gleichen Marktbedingungen unterschiedlich stark steigern.

Für die Nichtwohngebäude-KWK werden zum Teil zu hohe Volllaststunden angegeben, die in der Praxis nicht zu erwarten sind. Das liegt daran, dass für die Auslegung synthetische Gasbezugsprofile zugrunde gelegt wurden. Diese und damit auch die Jahresdauerlinien weisen weniger Gradienten auf als reale Profile von einzelnen Gebäuden. Der damit verbundene systematische Fehler ist jedoch bekannt und wird zur besseren Einordnung (Überschätzung der Potenziale) dargestellt (siehe Kapitel 6.5).

Der Minutenreservemarkt wird für die Potenzialanalysen sowohl bezogen auf die geltenden Regeln⁶⁹ als auch bezogen auf sein reales Verhalten bezogen auf Angebot und Abruf im Jahr 2010 (ex-post Analyse) berücksichtigt. Das bedeutet, dass mögliche Praxis-Abweichungen vom Regelwerk wie z. B., dass die Minutenreserve nach 60 Minuten noch nicht abgelöst wird, automatisch beachtet werden. Die Einsatzoptimierung zielt dabei darauf ab, dass möglichst hohe Beiträge von der angebotenen Regelleistung durch KWK erbracht werden, und nicht, dass möglichst hohe Erlöse erwirtschaftet werden können. Ökonomische Anreize wie z. B. Preisunterschiede im Tagesverlauf beeinflussen den Einsatz der BHKW daher nicht. Dies wäre ein wichtiger ergänzender Untersuchungsschritt, der aber den Rahmen dieser Untersuchung sprengen würde. Der Minutenreservemarkt wird deterministisch betrachtet

Bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die Jahre 2020 und 2030 ist kritisch anzumerken, dass auch diese auf den Marktdaten aus dem Jahr 2010 basieren, der Minutenreservemarkt dann jedoch vermutlich sowohl von seiner Höhe als auch besonders in seinem zeitlichen Verlauf deutlich davon abweichen wird. Diese methodische Herangehensweise ist allerdings unvermeidbar, da zwar Prognosen über die grobe zeitliche Entwicklung des Gesamtbedarfs nicht aber für den konkreten Bedarf zu jedem Zeitpunkt möglich sind. Daher werden die Ergebnisse entsprechend eingeordnet und mögliche ausgewählte Veränderungen des Minutenreservemarktes – wie z. B. ein häufigerer Abruf – qualitativ diskutiert werden.

Die Frage nach der langfristigen Bedeutung des Minutenreservemarktes für die BHKW wurde eingangs zunächst durch ein „optisches Stimmungsbild“ der Teilnehmer „beantwortet“. Zur Auswahl für die eigene Positionierung standen die drei qualitativen Bewertungen: Hoch, Mittel und Niedrig, die an verschiedenen Säulen im Tagungsraum befestigt waren. Die Mehrzahl der Teilnehmer (ohne Auftragnehmer) stellten sich bei der Bewertung „Mittel“ und zwischen „Mittel“ und „Niedrig“ auf, drei Teilnehmer entschieden sich für Hoch und zwei für Niedrig, der Bereich zwischen Mittel und Hoch wurde nicht besetzt. In Ergänzung wurden von einigen Teilnehmern folgende Begründungen für Ihre Bewertung abgegeben.

Für eine hohe Bedeutung spreche demnach, dass BHKW gut geeignet seien, dass insbesondere die nötige Flexibilität bereits vorhanden sei und diese daher auch genutzt werden solle. Zudem

69 Eine Ausnahme stellt das zeitliche Vorziehen der Mindestangebotsgröße von 5 MWel dar, die offiziell erst ab dem 03.07.12 gültig ist. Für den Minutenreservemarkt 2010 galt noch eine Größe von 15 MWel als Minimum.

werde sich der Markt ohnehin ändern (müssen), was dem entsprechenden Einsatz von BHKW zu Gute kommen werde.

Als Gründe für eine mittlere Bedeutung wurden angeführt, dass die Kosten für die Etablierung am Markt zu hoch seien und, dass die Option Minutenreserve (bzw. allg. Systemdienstleistungen) anzubieten, in starker Konkurrenz zu der bisher vorrangig verfolgten Optimierung der Eigenstromnutzung stehe. Diese werde jedoch in Zukunft aus ökonomischen Gründen eher noch wichtiger werden. Die mögliche Rolle der BHKW hänge stark von ihrer tatsächlichen Marktentwicklung ab, die aber aktuell nur mit hohen Unsicherheiten einzuschätzen sei. Zudem werde sich die KWK auch auf andere neue Märkte begeben, wie z. B. dem (evtl. lukrativeren) Spotmarkt und dort stärker werden. Der Fokus werde also sicherlich nicht allein auf dem Minutenreservemarkt liegen.

Eine niedrige Bedeutung wird damit begründet, dass die Minutenreserve in ihrer Bedeutung überschätzt würde und der Spotmarkt im Vergleich dazu ein wichtigerer Faktor für die Integration von EE-Strom sei. Die Bedeutung bzw. die Chancen von stromgeführter KWK sind daher im Vergleich zur hier betrachteten netzgeführten KWK als deutlich höher anzusehen. Zudem würden die Entwicklungen und Verbesserungsmöglichkeiten auf dem Minutenreservemarkt selber zu wenig diskutiert und beachtet, hier sei noch viel Dynamik möglich. Ferner würde die Einsatzoptimierung von kleinen KWK-Anlagen bevorzugt auf das Versorgungsobjekt im Sinne einer möglichst hohen Abdeckung des eigenen Stromverbrauchs ausgerichtet, eine verstärkte Ausrichtung auf die Minutenreserve sei daher nicht zu erwarten.

Fazit der Auftragnehmer: Eine hohe (als auch niedrige) Bedeutung des Minutenreservemarkts für die BHKW wird nur von einer Minderheit gesehen. Insgesamt wird die Bedeutung der Minutenreserve für BHKW überwiegend als mittel eingeschätzt. Die mittlere Bedeutung wird mit den günstigen technischen Eigenschaften und der Notwendigkeit von mehr Flexibilitäten im Strommarkt begründet. Gegen eine hohe Relevanz werden vor allem ökonomische (Zusatzkosten bzw. Erlöseinbußen) und wettbewerbliche Gründe (Markt- und Nutzungskonkurrenzen) angeführt.

Zusätzlich zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt gibt es weitere Optionen für die Erbringung von Systemdienstleistungen. BHKW können – entsprechend ausgestattet – helfen die Netze zu überwachen, in dem sie geeignete Mess- und Informationstechnik ins Netz einbringt. Dies kann besonders für die Verteilnetze vorteilhaft sein, die bisher wenig bis gar nicht damit ausgestattet sind. Zudem kann können die Anlagen selbständig Blindleistung bereitstellen und damit lokal zur Spannungsregelung und –qualität beitragen.

13.3 Modell und Ergebnisse

Die Rückfragen und Diskussionen zur Vorstellung des Modells und der Ergebnisse bezogen sich im Wesentlichen auf den Modellansatz der Poolung, auf den Umgang mit ökonomischen Aspekten und auf die Flexibilisierungsoptionen.

Das verwendete Modell simuliert für jedes betrachtete Versorgungsobjekt einen Pool von BHKW. Dazu wird unterstellt, dass der BHKW-Pool durch ein ideales Poolmanagement beliebig modulierbar ist. Dies beinhaltet im Vergleich zu einem realen Poolmanagement eine Überschätzung des Potenzials. Die spätere Hochrechnung bezieht sich auf den optimierten Pool-Einsatz und nicht auf optimierte BHKW-Anlage. Ein Grund für den gewählten Modellansatz ist, dass die Bestimmung der Wärmebedarfsprofile bei Wohngebäuden und

Nichtwohngebäuden auf den synthetischen Gasbezugsprofilen des BDEW beruhen. Diese entsprechen einem „typischen“, d. h. durchschnittlichen Profil eines Gebäudepools an Wohngebäudetypen.

Ein anderer Ansatz ist, die Modellierung auf Anlagenebene für das gemessene Wärmebedarfsprofil eines konkreten Gebäudes durchzuführen und diese Ergebnisse mittels statistischer Methoden (Monte-Carlo-Simulation) auf einen Pool hochzurechnen. Dieser Ansatz würde ein realistischeres Poolmanagement abbilden und ließe im Vergleich zu den gezeigten Potenzial-Ergebnissen, Einbußen von schätzungsweise bis zu 20 % gegenüber der Poolmodellierung erwarten.

Es wurde kritisiert, dass der Einsatz nicht nach ökonomischen Faktoren optimiert wurde und dass positive Abrufe in der Nacht und negative Abrufe am Tag die ökonomische Realität nicht adäquat widerspiegeln. Das werfe daher die Frage auf, ob und inwiefern der Einsatz von BHKW ökonomisch überhaupt sinnvoll sei. Die Klärung ist ein wichtiger nächster Schritt, geht aber über den Untersuchungsrahmen des Vorhabens hinaus. Im Rahmen der noch ausstehenden Hemmnisanalyse wird sie aber gleichwohl qualitativ diskutiert (siehe auch Kapitel 13.5). Eine Bestimmung der (kleineren) ökonomischen Potenziale gehört zu den anschließenden offenen Forschungsfragen.

Aus Gründen der Systemsicherheit werden KWK-Anlagen in Zukunft stromgeführt betrieben werden müssen. Dabei können so genannte Flexibilisierungsstrategien, wie z. B. größere Speicher, allgemein eine wichtige Rolle spielen, nicht nur für eine Teilnahme am Minutenreservemarkt. Die verschiedenen Flexibilisierungsoptionen werden aber zum Teil von den Teilnehmern unterschiedlich bewertet.

In Dänemark sind bereits heute schon – zumindest für große Anlagen – größere Speicherauslegungen mit einer Kapazität für ca. 8-10 h Nennlastbetrieb die Regel. Dies bedeutet im Vergleich zu der heute in Deutschland üblichen Praxis (Speicherkapazität ca. 1 h) für die betrachteten kleinen Anlagen eine erheblich höhere Flexibilität. KWK-Anlagen in Hochhäusern haben dagegen größere Speicher, um die „Dusch-Spitzen“ aufzufangen und sind damit bereits flexibler als KWK-Anlagen für Ein- und (kleine) Mehrfamilienhäuser.

Die Flexibilität steigt bei gleicher Speichergröße aber auch durch eine gute energetische Sanierung des Gebäudes, wegen dann niedrigeren Vor- und Rücklauftemperaturen, die eine größere Temperaturspreizung (z. B. 40°C statt 25°C, ca. Faktor 1,6) im Speicher ermöglichen. Die energetische Sanierung des Altbaubestandes sowie der Neubau von hocheffizienten Häusern tragen damit implizit zu einer Flexibilisierung von KWK-Anlagen bereits bei. Die Speicher brauchen in dem Fall prinzipiell weniger stark vergrößert werden, um einen bestimmten Flexibilisierungsgrad zu erreichen.

Der Einsatz von Notkühlern als Flexibilisierungsoption wurde kontrovers diskutiert, insgesamt aber eher kritisch gesehen. Durch seinen Einsatz würden die BHKW zu schlechten kleinen Kondensationskraftwerken werden und damit ihren Effizienzvorteil und -bonus verlieren. Zudem sei die Integration von Notkühlern bei kleinen BHKW technisch schwierig. Andererseits sei die technische Integration (z. B. bei Einfamilienhäusern auf dem Dach) nicht wirklich ein Hemmnis und BHKW mit Notkühlern am Minutenreservemarkt seien generell besser als Netzersatzanlagen, deren Wärme gar nicht genutzt wird.

Als sinnvollere Alternative zum Notkühler wurde von manchen Teilnehmern der Einsatz von Heizstäben angesehen, der die Flexibilisierung ebenfalls deutlich steigern könne, aber nicht zu

unnötigen Wärmeverlusten führen und im Gegenzug helfen kann, dass z. B. überschüssiger Windstrom nicht abgeregelt werden muss, sondern wenigstens für die Wärmeproduktion genutzt werden kann. Eine entsprechende Kopplung des Einsatzes an die Integration von EE-Strom sei aber nicht immer nachweisbar und stelle damit ein wesentliches „Akzeptanz-Hemmnis“ dar. Es kann z. B. aufgrund von Netzengpässen trotz Einsatz des Heizstabes zur Abregelung von EE-Anlagen kommen und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Heizstab immer ab einem niedrigeren Strompreis im Vergleich zum Erdgas zum Heizen eingesetzt wird, ohne dass automatisch zusätzlich EE-Strom integriert wird.

Ein weiteres, rechtliches Hemmnis stelle ggf. die EnEV dar, da die Verwendung eines Heizstabes zu höherem Primärenergieeinsatz führt und dadurch die Anforderungen der EnEV verletzt werden können. Insgesamt wird ein Heizstab aus Sicht von strom- bzw. netzgeführter KWK als eine weitere, sehr interessante Flexibilisierungsoption angesehen, während er aus exergetischer, rechtlicher und umweltpolitischer Sicht eher als wenig opportun erscheint.

Angesichts der Vielzahl von möglichen Flexibilisierungsoptionen und -strategien wurde im Sinne einer generellen Prioritätensetzung vorgeschlagen, zuerst große Anlagen zu flexibilisieren und erst dann sukzessive auch die Kleineren. Dabei seien die Speicher eine sehr wichtige Option. Eine weitere generelle Priorität solle die Umstellung der vielen bereits vorhandenen und in der Regel wärmegeführten BHKW auf den strom- bzw. netzgeführten Betrieb haben. Allein damit ist, wie gezeigt werden konnte, ein kleines aber nennenswertes Potenzial für die Bereitstellung von Minutenreserve erschließbar. Der Speicher könne dann bei Bedarf bzw. günstigeren (ökonomischen) Rahmenbedingungen und/oder im Falle von Erneuerung zusätzlich vergrößert werden.

Insgesamt sei darauf zu achten, dass besonders bezogen auf die kleinen BHKW anfangs nicht gleich zu viele neue bzw. zu hohe Anforderungen an Auslegung und Betrieb gestellt werden, weil dies sonst die – ohnehin schwierige – Markteinführung behindert. Dieser Markt und die neuen Marktoptionen bräuchten noch Entwicklungszeit, unter anderem um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Von daher sei es jedenfalls im kleinen Leistungsbereich nicht vorteilhaft, die Flexibilisierung zu ambitioniert voranzutreiben.

13.4 CO₂-Emissionen

Die Rückfragen und Diskussionen zur Vorstellung der resultierenden CO₂-Emissionen für die verschiedenen Betriebsstrategien von BHKW im Wohngebäudebereich im Vergleich zum ungekoppelten Referenzfall (Strom aus GuD und Wärme aus Brennwertkessel) bezogen sich im wesentlichen auf die Annahmen zum gewählten Referenzrahmen.

Für die vergleichende Betrachtung der CO₂-Emissionen aus den BHKW mit einem Referenzsystem ohne KWK wird die so genannte „Finnische Methode“ benutzt (siehe Kapitel 8.1). Demnach sind bestimmte Referenztechniken auf Basis des gleichen Primärenergieträgers (hier Erdgas) anzulegen; für die Stromerzeugung ein GuD-Kraftwerk und für die Wärme ein Brennwertkessel. Da hier nicht nur die Stromgewinnung sondern auch die Teilnahme am Minutenreservemarkt zu bewerten ist, wird das GuD-Kraftwerk auch diesbezüglich als Referenz für die Berechnungen verwendet. Die Annahmen für den Wirkungsgrad von GuD-Kraftwerk (47,5 %) und Brennwertkessel (90 %) sind nach der verwendeten Methode aus der EU-KWK-Richtlinie 2004/8/EG zu übernehmen. Die darin tabellierten Werte sollten laut entsprechenden Durchführungsbeschluss 2011/877/EU den EU-Durchschnitt abbilden. Sie entsprechen jedoch nicht den realen Wirkungsgraden für GuD in

Deutschland, die deutlich höher liegen. Darauf sollte bei der Vorstellung der Methodik und der Ergebnisse hingewiesen werden.

Dieser Vorgehensweise wurde überwiegend zugestimmt, da sie zum einen methodisch konsistent sei und zum anderen weil es sich damit um eine konservative Betrachtung handelt. Wenn zum Vergleich eine andere Kraftwerkstechnik (z. B. Dampf- oder Gasturbine) – mit Ausnahme von CCS – und/oder andere fossile Primärenergieträger angelegt würde, dann würden die BHKW beim CO₂-Emissionsvergleich noch besser abschneiden. Allerdings gelte es einschränkend zu bedenken, dass die GuD bei positivem Angebot oder negativem Abruf von Regelleistung im Vergleich zur reinen Stromerzeugung einen schlechteren Wirkungsgrad aufgrund des Teillastbetriebes aufweisen.

Es wurde jedoch auch eingewendet, dass es praxisnäher sei einen plausiblen Strommix anzunehmen als allein gegen Strom aus einem GuD-Kraftwerk zu rechnen. Dabei stelle sich die interessante Frage, was würde durch den netzgeführten BHKW-Einsatz tatsächlich im Strom- und besonders im Regelleistungsmarkt verdrängt. Da diese Frage nicht trivial sei und im Rahmen des Vorhabens nicht beantwortet werden kann, sei es wichtig, bei den Ergebnissen zu den CO₂-Emissionen auf die zuvor genannten Sachverhalte und den möglichen zusätzlichen Vorteil durch die von BHKW erbrachte Minutenreserve hinzuweisen.

13.5 Hemmnisse

Für die Diskussion über Hemmnisse wurde zunächst ein Überblick über die vom Auftragnehmer identifizierten Hemmnisse in den Kategorien „Technisch-betrieblich“, „Ökologie“, „Ökonomie“, „Politik“ und „Soziales“ gegeben. Die Teilnehmer ergänzten diese um weitere Hemmnisse und führten anschließend ad-hoc eine grobe Bewertung der Prioritäten mittels Punktevergabe durch, wobei jeder Teilnehmer maximal drei Punkte – auch mehrere für ein Hemmnis – vergeben konnte.

Das Ergebnis ist in der Tab. 13-1 integriert. Demnach wurden 14 von 37 Hemmnissen mit Punkten versehen und damit von den Teilnehmern relevanter als die nicht mit Punkten versehenen Hemmnisse angesehen. Die höchste Punktzahl (jeweils sieben Punkte) erhielten die folgenden drei Hemmnisse, die damit gemäß der ad-hoc Bewertung eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt am stärksten behindern:

- Bisherige Auslegung wärmegeführter Betrieb
- Unattraktives Marktpreisniveau {am Minutenreservemarkt}
- KWKG-Novelle: Kaum Anreize für dezentrale Anlagen

Als „mittelstarke“ Hemmnisse können diejenigen angesehen werden, die mehr als einen Punkt erhielten. Dazu gehören in absteigender Reihenfolge:

- Fehlende IKT
- Zusätzliche Investitions- und Betriebskosten
- Zeitscheiben und Mindestgebotsgröße Minutenregelleistung
- Zu teure IKT
- Akzeptanz geringere Wirtschaftlichkeit
- KWKG-Novelle: Keine expliziten Regelungen für Poolung

- Eigenstromnutzung vs. Regelleistungsteilnahme.

„Last but not least“ sind die folgenden weiteren Hemmnisse (mit jeweils einem Punkt) zu berücksichtigen, die aber im Vergleich zu den zuvor genannten Hemmnissen ggf. „nur“ nachrangig gelöst werden müssen:

- Ressourcenverschwendung durch Notkühler
- Netzführung: weniger Einnahmen
- Mangelnde Motivation und Verständnis des Regelenergiemarktes
- Nur geringe Anreize durch das Mini-KWK Impulsprogramm.

Tab. 13-1: Überblick über einschlägige Hemmnisse gegenüber einer Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt und ihre Bewertung (Punktevergabe) durch die Teilnehmer

Technisch-Betrieblich		Ökologie		Ökonomie	
Bisherige Auslegung wärmegeführter Betrieb	7	CO ₂ -Belastung durch Flexibilisierung	/	Wirtschaftlichkeit „kleiner KWK“	/
Teillastbetrieb unerwünscht	/	Mehr CO ₂ durch netzgeführten Betrieb	/	Zusätzliche Investitions- und Betriebskosten	4
Häufigeres An- und abfahren	/	Luftschadstoffemissionen	/	Netzführung: weniger Einnahmen	1
„Sommerloch“	/	Sinkender thermischer Deckungsbeitrag	/	Wegfall Stromsteuerbefreiung	/
Fehlende IKT	4	Ressourcenverschwendung durch Notkühler	1	Geringere Energiesteuererstattung	/
		Fehlende CO ₂ -Werte für Regelenergie	/	Volatilität der Marktpreise	/
		Offene CO ₂ -Bilanz dezentral vs. zentral	/	Unattraktives Marktpreisniveau	7
				Zeitscheiben und Mindestgebotsgröße MRL	3
				Zu teure IKT	3

Soziales		Politik		Ergänzte Hemmnisse	
„Bisherige Denke“	/	KWKG-Novelle: Kaum Anreize für dezentrale Anlagen	7	Anforderungen am PR&SR-Markt => Regulatorisch	/
Akzeptanz externe Zugriffe	/	KWKG-Novelle: Keine expliziten Regelungen für Poolung	2	Höherer Leistungsbezug bei nicht planbarer Stromerzeugung => (System-)Technisch	/
Akzeptanz geringere Wirtschaftlichkeit	2	Hohe Stromkennzahlen vs. EEWärmeG (zu hoher KWK-Anteil)	/	Verschiedene Regelungen für EE- und Nicht-EE-KWK => Politik	/
Mangelnde Motivation und Verständnis des Regelenergiemarktes	1	Nur geringe Anreize durch das Mini-KWK Impulsprogramm	1	Eigenstromnutzung vs. Regelleistungsteilnahme => Ökonomie	2
Akzeptanz: höherer Platzbedarf	/	StromsteuerG: Befreiung entfällt	/	Bürokratieaufwand => Ökonomie	/
				Fehlende Marktanreize => Ökonomie / Politik	/

Quelle: Eigene Darstellung

Die ad-hoc Bewertung zeigt ferner, dass mit deutlichem Abstand die meisten der als relevant eingestuften Hemmnisse (6 von 14) auf die Kategorie Ökonomie entfallen. Insgesamt entfallen auf diese Kategorie 20 Bewertungspunkte. Dabei könnten noch weitere, sehr stark angrenzende

Hemmnisse aus anderen Kategorien wie zu wenig Anreize durch das KWKG oder für die Akzeptanz dazu gezählt werden. An zweiter Stelle folgt die Kategorie Politik mit drei Hemmnissen und 10 Bewertungspunkten, während ökologische Hemmnisse mit insgesamt nur 1 Punkt von den Teilnehmern im Vergleich als am wenigsten relevant eingestuft wurden. Eine Lösung der ökonomischen Hemmnisse sollte demnach bei Bedarf oben auf der Agenda stehen.

13.6 Ausblick und Empfehlungen

Am Ende des Workshops zogen die Teilnehmer im Rückblick auf die vorgestellten Ergebnisse und die Diskussionen ihr persönliches Fazit und gaben zum Teil Empfehlungen ab. Die Aussagen sind nachfolgend verkürzt, mit eigenen Worten und ohne Anspruch auf Vollständigkeit zusammengefasst.

- Ein Markt muss her und weitere Impulse setzen, dazu muss das KWKG genügend Anreize für kleine flexible Anlagen schaffen.
- Die technischen Potenziale sind nun bekannt, doch es bleibt offen, inwiefern es auch wert und notwendig ist, diese auch zu erschließen. Wenn ja, dann sollten adäquate Anreize gesetzt und die richtigen politischen Weichen gestellt werden.
- Es sollte als Nächstes untersucht werden, ob und unter welchen Bedingungen eine Teilnahme von BHKW am Minutenreservemarkt ökonomisch sinnvoll ist. Wenn dies nicht gezeigt werden kann, dann sollte diese Option nicht unterstützt werden, da dafür dann zu viele Anreize notwendig werden.
- Auf dem Regelleistungsmarkt müssen Preisspitzen zugelassen werden, die dann als Knappheitsindikator stimulierend für den Markteintritt wirken können. Es darf keine Überregulierung des Marktes oder der netzseitigen Anforderungen stattfinden.
- Die dezentralen Erzeuger müssen sich am Systembedarf ausrichten und damit auch auf andere Märkte. Eine adäquate Anlagenauslegung schafft dafür die Voraussetzung. Optimierungen sollten nicht mehr auf lokaler Ebene erfolgen sondern mit Fokus auf den gesamten Systembedarf. Demnach sollte der neue Markteinstieg bei größeren Anlagen erfolgen und nicht runter bis zur kleinsten Ebene stattfinden.
- Vor Überlegungen zu weiteren einschlägigen Untersuchungen und Förderungen sind Grundsatzentscheidungen zu treffen. Ist eine stärkere dezentrale Ausrichtung überhaupt Konsens? Welche politischen Motive und welche (systemtechnischen) Argumente sprechen dafür? Warum viele kleine Anlagen für Systemdienstleistungen einsetzen wollen, wenn es ggf. wenige große Anlagen wie z. B. GuD und Gasturbinen besser könnten?
- Die KWK soll insgesamt die Integration von erneuerbare Energien fördern, dazu muss immer das Gesamtsystem betrachtet werden.
- Genormte Schnittstellen für die Kommunikation und automatische Fernsteuerung sind notwendig für eine Teilnahme an den Strom- und Regelleistungsmärkten. Dabei stellt die Nachrüstung von Bestandsanlagen ein relevantes Problem dar. Hierfür sind frühzeitig Lösungen vorzubereiten.
- Die Erdgas-KWK ist eine Brückentechnologie. Ohne Ausgleichsfunktionen wird sie künftig keine Daseinsberechtigung mehr haben. Die KWK wird in einem *smart grid* weit

wichtiger werden als *demand-side-management*. Vor einer Teilnahme am Regelleistungsmarkt sollte die strommarktorientierte Einspeisung vorangetrieben werden.

- Regelleistung ist für die KWK ein sehr spezifischer Aspekt, die Beiträge zum Klimaschutz und zur Energiedeckung sind jedoch wichtiger. Mögliche Zusatzleistungen sind jedoch sehr willkommen. Die Märkte sollten sich dafür mehr öffnen. Es gibt Synergien zwischen den Flexibilisierungsoptionen für Regelleistung und anderen Einsatzzwecken. Der Fokus auf der Minutenreserve ist für kleine Anlagen nicht unbedingt richtig gesetzt.
- Der Regelleistungsmarkt ist gedeckt, daher sollte die KWK eher auf die Spotmärkte, *day-ahead* und *intraday*, gehen. Dagegen spricht jedoch, dass kleine KWK nur bei hohem Eigenstromverbrauch wirtschaftlich sind. Es sind aber auch andere, betriebswirtschaftlich günstigere Systemdienstleistungen möglich wie z. B. die automatische Netzüberwachung. Hierfür könnte bereits ein Systemdienstleistungsbonus einen ausreichenden Anreiz bieten.
- Die Entwicklungen von KWK und EE müssen Hand-in-Hand gehen.
- Der Schritt 1 (breiter Markteintritt kleiner KWK) fehlt vor dem Schritt 2 (Erbringung von Systemdienstleistungen durch kleine KWK).

13.7 Agenda

Abb. 13-1: Agenda des Experten-Workshops

Experten-Workshop Regelleistungspotentiale von dezentralen KWK-Anlagen

im Rahmen des UFOPLAN-Forschungsprojekts: "Klimapolitischer Beitrag
kohlenstoffarmer Energieträger in der dezentralen Stromerzeugung sowie ihre Integration
als Beitrag zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungssysteme" (KWK dez)

Datum: Dienstag 08.05.2012

Ort: Berlin, Bundesumweltministerium, Stresemannstraße 128-130, Raum 5.131

Wann	Dauer	Was	Wer
10:30	00:10	Beginn, Begrüßung & Organisatorisches, Motivation	UBA
10:40	00:10	Projekt-Überblick: Ziele, Abgrenzung, Aufbau und Ablauf	WI
10:50		1. Block: Grundannahmen und Eingangsparameter	
10:50	00:30	Präsentation	WI
11:20	00:45	Verständnisfragen und Diskussion	Alle
12:05	00:50	Mittagspause	
12:55		2. Block: Modellierung/Regelleistungspotenzial	
12:55	00:40	Präsentation	WI
13:35	01:00	Verständnisfragen und Diskussion	Alle
14:35		3. Block: CO₂-Emissionen	
14:35	00:20	Präsentation	WI
14:55	00:30	Verständnisfragen und Diskussion	Alle
15:25	00:20	Kaffeepause	
15:45		4. Block: Schlußfolgerungen und Empfehlungen	
15:45	00:15	Präsentation	WI
16:00	00:30	Diskussion	Alle
16:30	00:15	Fazit und Ausblick	WI und UBA
16:45		Ende der Veranstaltung	