

F 2968

Georg Form, Marten F. Brunk, Christoph van Treeck

Regelstrategien zum wirtschaftlichen Einsatz von Wärmepumpen im bivalenten Betrieb

F 2968

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9679-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Regelstrategien zum wirtschaftlichen Einsatz von Wärmepumpen im bivalenten Betrieb

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Georg Form
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marten F. Brunk
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck

RWTH Aachen University
Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik (BGT)
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (e3D)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.21/ II 3-F20-10-1-156)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Aachen, 10.07.2015

INHALTSVERZEICHNIS

0 GLOSSAR.....	IV
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Einführung in die Thematik.....	2
1.2 Problemstellung und Lösungsansatz.....	3
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	4
2 WÄRMEPUMPEN IN GROSSANLAGEN	8
2.1 Hydraulische und regelungstechnische Einbindung	9
2.1.1 Hydraulische Einbindung von Wärmepumpen und Speichern.....	9
2.1.2 Betriebsweisen und regelungstechnische Einbindung von Wärmepumpen ..	11
2.2 Kennzahlen zum Vergleich unterschiedlicher Erzeugertypen.....	14
3 REGELUNGSANSÄTZE FÜR BIVALENTE WÄRMEPUMPENANLAGEN	17
3.1 Entscheidungskriterien in neuen Regelungsansätzen	17
3.1.1 Erzeugerwirkungsgrad und Primärenergieeinsatz	18
3.1.2 Energiekosten bzw. Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus einer Erzeugungsanlage.....	18
3.2 Gegenüberstellung einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung	19
3.2.1 Treibhausgasemissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung.....	20
3.2.2 Verhältnis von Energiepreisen und CO ₂ -Emissionswerten	22
3.2.3 Einfluss der CO ₂ -Emissionswerte und Energiepreise auf eine Systementscheidung	24
3.3 Beschreibung des neuen Regelungsansatzes.....	26
3.3.1 Definition des Regelungsansatzes	26
3.3.2 Vorhersage und Ableitung der Anlagenzustände	29
3.4 Anforderungen an Erzeugungsanlagen zur Umsetzung des neuen Regelungsansatzes	31
4 VORSTELLUNG DES SIMULATIONSMODELLS IN DER BASISVARIANTE A	34
4.1 Modellelemente der Wärme- und Kälteerzeugung	39
4.1.1 Brennwertkesselmodul	39
4.1.2 Wärmepumpenmodul	41
4.1.3 Kältemaschinenmodul	44
4.2 Ablaufstruktur (Regelungstechnik).....	46
4.3 Erdwärmequelle und Wärmesenke (Erdreichmodul)	50

4.4	Lastgang.....	52
4.5	Variablen und Parameter des Simulationsmodells	56
4.5.1	Variablen	56
4.5.2	Parameter.....	57
4.6	Wirkung der Regelstrategie in der Basisvariante A	60
5	EINFLUSSFAKTOREN UND ANWENDUNGSGRENZEN DES REGELUNGSANSATZES	67
5.1	Modellvarianten B: Temperaturen im Heizkreis	68
5.2	Modellvarianten C: Temperaturen des Erdreichmoduls.....	71
5.3	Modellvarianten D: Kennlinien des Wärmepumpenmoduls	79
5.4	Modellvarianten E: Energiepreise und CO ₂ -Emissionswerte	82
5.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Zwischenfazit	86
6	WETTERPROGNOSEN UND AKTIVE ERDREICHBEWIRTSCHAFTUNG	91
6.1	Effekt von Wetterprognosen auf den Regelungsansatz.....	91
6.1.1	Anbieter von Wettervorhersagen	91
6.1.2	Verwendungsmöglichkeiten von Wetterprognosen in der Gebäudetechnik...	92
6.1.3	Effekt von Wetterprognosen in bivalenten Wärmepumpensystemen	93
6.2	Prognose der Erdreichtemperaturen und aktive Bewirtschaftung	94
7	ZUSAMMENFASSUNG, FAZIT UND AUSBLICK	98
7.1	Zusammenfassung der Arbeitsschritte und des Lösungsweges.....	98
7.2	Fazit und Ausblick	99
7.2.1	Anlagenmonitoring und Umsetzbarkeit des Regelungsansatzes.....	100
7.2.2	Energiepreisentwicklung und CO ₂ -Emissionswerte	101
7.2.3	Vorteile der Systementwicklung und Umsetzungsempfehlung	103
	ANHANG.....	105
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	124
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	126
	FORMELVERZEICHNIS	128
	TABELLENVERZEICHNIS	129
	LITERATURVERZEICHNIS	132

0 Glossar

Ablaufstruktur¹ beschreibt die „logische Verknüpfung der Modellelemente“ und das resultierende Modellverhalten.

Arbeitszahl² oder Jahresarbeitszahl (JAZ)

$$\beta = \frac{W_{\text{Nutz}}}{W}$$

Formel 1

β Jahresarbeitszahl

W_{Nutz} abgegebene Wärmemenge innerhalb eines Jahres [kWh]

W zugeführte Energiemenge innerhalb eines Jahres [kWh] z. B. elektrische Arbeit W_{el} .

Das Verhältnis von abgegebener Wärmemenge zur zugeführten Energie (bei Kompressionswärmepumpen elektrische Energie) innerhalb eines bestimmten Zeitraums, die Jahresarbeitszahl ist auf ein Jahr bezogen und kann den Energieaufwand von Nebenantrieben enthalten.

Die Arbeitszahl ist ein Mittelwert der Leistungszahlen im Betrachtungsintervall.

Attribut³ „Eigenschaft eines Modellelements“

Aufbaustruktur⁴ beschreibt den Aufbau eines Modells. Hierzu gehört die Untergliederung in Modellelemente und die Beziehung zwischen diesen.

Ausgangsmodell Simulationsmodell, welches eine Realanlage abbildet. Mittels Realdaten konnte das Ausgangsmodell attribuiert und validiert werden.

Basisvariante auch Basisvariante A (Kurzbezeichnung: A) genannt, entspricht mit kleinen Modifikationen dem Ausgangsmodell und bildet damit eine Realanlage ab. Für Auswertungen neuer Regelstrategien sind mit dem Ausgangsmodell vergleichbare Ergebnisse zu erwarten. CO₂-Emissionen und Energiekosten sowie die Wirkung eines neuen Regelungsansatzes werden in Kapitel 4.6 ausgewertet.

¹ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 3.

² Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H244.

³ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 3.

⁴ Vgl. ebd.

Betrachtungs- zeitraum	Im Betrachtungszeitraum (oder Auswertungszeitraum) werden die Ergebnisse ausgewertet. Dieser beginnt am 01.05.2010 und endet am 12.05.2013.
Betriebsart (der WP)	Im Zusammenhang mit der reversiblen Wärmepumpe existieren hier drei Betriebsarten. Die Wärmepumpe kann durch Wärmeentzug aus dem Erdreich heizen. Sie kann durch Erwärmen des Erdreichs Kälte erzeugen. Die dritte Betriebsart ist der simultane Heiz- und Kühlbetrieb, in der das Erdreich unbelastet bleibt.
Bivalent ⁵	Bezogen auf die Heizungstechnik stehen zwei unterschiedliche Erzeuger zur Wärmeerzeugung zur Verfügung. Die Kombination verschiedener Erzeuger ist möglich.
CO ₂ -Ausstoß	(bzw. CO ₂ -Emissionen) entstehen u. a. durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Verschiedenartige Treibhausgase können in CO ₂ -Äquivalente umgerechnet werden, damit ein direkter Vergleich klimawirksamer Effekte erfolgen kann. Vereinfacht wird in diesem Forschungsbericht nur von CO ₂ -Ausstoß bzw. CO ₂ -Emissionen gesprochen. Tatsächlich sind jedoch die CO ₂ -Äquivalente gemeint.
COP ⁶	Coefficient of Performance, Leistungszahl im Heizbetrieb $\text{COP} = \frac{P_H}{P_E} \left[\frac{\text{W}}{\text{W}} \right]$ Formel 2 P_H Heizleistung [W] vom Gerät je Zeiteinheit an den Wärmeträger abgegebene Wärme P_E effektive Leistungsaufnahme [W]
EER ⁷	Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl im Kühlbetrieb $\text{EER} = \frac{P_C}{P_E} \left[\frac{\text{W}}{\text{W}} \right]$ Formel 3 P_C gesamte Kühlleistung [W] vom Wärmeträger je Zeiteinheit an das Gerät abgegebene Wärme P_E effektive Leistungsaufnahme [W]

⁵ Vgl. Vaillant (Hrsg.), Heiztechniklexikon – Bivalent, 2015.

⁶ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), DIN EN 14511-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung, 2013, S. 7 f.

⁷ Ebd., S. 6 f.

Einschwingphase ⁸	Simulationsphase, welche nicht zur Auswertung herangezogen wird. Sie dient dazu, einen realistischen Anfangszustand zu errechnen. Variablen und Rechenalgorithmen müssen dazu mehrere Rechenschritte durchlaufen. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums sollte bei ausreichend langer Einschwingphase dann ein stabiler Modellzustand herrschen.
Energieeigenschaftsfaktoren	Energiepreis und CO ₂ -Emissionswert (von Gas und Strom)
Erzeuger	siehe Kälte- und Wärmeerzeuger.
Instandhaltung ⁹	umfasst die Maßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung.
Jahresarbeitszahl	siehe Arbeitszahl.
Kälteerzeuger	hier: Kompressionskältemaschine und reversible Wärmepumpe. Das Simulationsmodell besteht aus entsprechenden Modellelementen.
Kennlinie	„Abhängigkeit einer oder mehrerer Zielgrößen von einer oder mehreren Einflussgrößen“, die in einem Koordinatensystem dargestellt werden kann. ¹⁰ Hier stellen sie für die Erzeuger den numerischen Zusammenhang zwischen Rücklauftemperatur (Einflussgröße) und thermischer Leistung (Zielgröße) bzw. der Primärenergieleistungsaufnahme (Zielgröße) dar. Jedes Modellelement im Simulationsmodell bildet den jeweiligen Erzeuger mittels Kennlinien ab.
Klassische Regelungsvariante	Einsatz der Wärmepumpe als Grundlastherzeuger zur Wärme- bzw. Kälteherzeugung. Konventionelle Erzeuger (hier Brennwärtekessel und Kompressionskältemaschine) dienen als Spitzenlastherzeuger.
Konventionelle Erzeuger	hier: Brennwärtekessel und Kompressionskältemaschinen (kurz: Kältemaschine).

⁸ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 6 f.

⁹ Vgl. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung, 2012, S. 4.

¹⁰ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 10.

Lastgang stellt den zeitlichen Verlauf des Leistungsbedarfs für Wärme und Kälte dar. Hierzu gehören je zwei Temperaturverläufe, je einer berücksichtigt die erforderlichen Vorlauftemperaturen und je einer die resultierenden Rücklauftemperaturen. Für diesen Forschungsbericht gehören zum Lastgang implizit beide Verläufe des Leistungsbedarfs und die zugehörigen Temperaturverläufe (insgesamt vier Stück), auch wenn dies nicht immer explizit genannt wird. Die Temperaturverläufe werden vereinfacht auch Temperaturen des Lastgangs genannt. Im Zusammenhang der Wärme- oder Kälteerzeugung ist natürlich nur der entsprechende Teil des Lastgangs relevant.

Numerisch wird der Lastgang durch den jeweiligen Volumenstrom von Heiz- bzw. Kühlkreis des Gebäudes, kombiniert mit den zugehörigen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, berücksichtigt. Da Volumenstrom, Temperaturverläufe und Lastgang im direkten physikalischen Zusammenhang stehen, können anstelle des jeweiligen Durchflusses die Verläufe des Leistungsbedarfs dargestellt werden.

Der Lastgang deckt den Simulations- und Betrachtungszeitraum sowie die Einschwingphase ab. Für die Auswertungen ist er für die Zeit vom 01.05.2010 bis 12.05.2013 (Betrachtungszeitraum) relevant. Die Werte sind 15-minütig aufgelöst.

Lebenszyklus¹¹ „Zeitspanne vom Beginn bis zum Ende der Existenz des betrachteten Objekts oder Systems.“

Leistungszahl¹² entspricht dem Wirkungsgrad von Wärmepumpen und Kältemaschinen; der Wert ist per Definition größer 1.

$$\varepsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_0 + \dot{Q}_c}{P}$$

Formel 4

ε Leistungszahl

$\dot{Q}_0$ (genutzte) Kälteleistung [kW]

$\dot{Q}_c$ (genutzte) Wärmeleistung [kW]

P zugeführte Leistung [kW] (z. B. Strom P_E)

Hier wird der Begriff Leistungszahl für Kompressionsmaschinen allgemein verwendet, unabhängig von getrennter oder gleichzeitiger Nutzung der Kälte und Wärme.

¹¹ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik, 2013, S. 107.

¹² Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2013, S. 1598.

Modell ¹³	„Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“
Modell- element ¹⁴	auch Basiskomponente oder Modul genannt, „Komponente eines Modells“. Das Modellelement kann seinerseits aus untergeordneten Modellelementen zusammengestellt sein.
Modell- variante	„Modell, das durch die Veränderung einer oder mehrerer Eingabegrößen oder durch Veränderung der Modellstruktur entsteht“.¹⁵ Ausgehend von der Basisvariante A werden Modellvarianten zur Untersuchung von vier unterschiedlichen Änderungen am Simulationsmodell erstellt. Hiermit entstehen Modellvarianten B bis E (Kurzbezeichnungen: B, C, D bzw. E). Die unterschiedlichen Änderungen werden in mehreren Variationen (mit arabischen Ziffern gekennzeichnet) untersucht. Hierdurch entstehen Kurzbezeichnungen wie B.1, B.2 oder C.1. Für eine Änderung müssen i. d. R. mehrere Parameter des Simulationsmodells angepasst werden.
Modul	siehe Modellelement.
Monetäre Regelungs- variante	siehe ökonomische Regelungsvariante.
Optimierung	Anstelle der Grundlastregelung (klassische Regelungsvariante) soll ein neuer Regelungsansatz den Erzeugereinsatz optimieren. Die ökonomische bzw. ökologische Optimierung meint den Einsatz der ökonomischen bzw. ökologischen Regelungsvariante.
Ökologische Regelungs- variante	(auch ökologische Optimierung) Einsatz der Wärmepumpe zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung, wenn die CO ₂ -Emissionen geringer als die des entsprechenden konventionellen Erzeugers (hier Brennwertkessel bzw. Kältemaschine) sind. Anderenfalls wird der konventionelle Erzeuger primär eingesetzt.

¹³ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 11.

¹⁴ Ebd., S. 12.

¹⁵ Ebd.

Ökonomische Regelungs-variante	(auch ökonomische Optimierung) Einsatz der Wärmepumpe zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung, wenn die Erzeugungskosten geringer als die des entsprechenden konventionellen Erzeugers (hier Brennwertkessel bzw. Kältemaschine) sind. Anderenfalls wird der konventionelle Erzeuger primär eingesetzt.
Parameter	Vor einem Simulationslauf gesetztes für den Simulationslauf konstantes Attribut.¹⁶ Hier werden mehrere Parameter des Simulationsmodells funktional zu einem Parameter zusammengefasst. D. h. für eine funktional beschriebene Parameteränderung kann die Änderung mehrerer Parameter im Simulationsmodell erforderlich werden.
Parameter-variation	Mit Parametervariationen wird der Einfluss der einzelnen Parameter untersucht. Für jede Parametervariation wird eine Modellvariante erstellt.
P_E ¹⁷	effektive Leistungsaufnahme [W] „Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes innerhalb einer bestimmten Zeitspanne“, diese berücksichtigt die Leistungsaufnahme: - des Verdichters (inkl. Abtauvorgang); - der Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtung des Gerätes; - für den Transport der Wärmeträger im Gerät.
Regelungs-ansatz	Hier wird ein neuer Regelungsansatz untersucht, welcher an Stelle des klassischen Grundlasteinsatzes (klassische Regelungsvariante) eine Erzeugerwahl unter ökonomischen oder ökologischen Aspekten vornimmt. Unter Regelungsansatz ist dies allgemein zu verstehen, die ökonomische bzw. ökologische Regelungsvariante meint einen der beiden konkreten Aspekte.
Regelungs-variante	Drei unterschiedliche Regelungsvarianten werden verglichen: die klassische, ökonomische und ökologische Regelungsvariante.

¹⁶ Ebd., S. 14.

¹⁷ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), DIN EN 14511-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung, 2013, S. 7.

Reversible ¹⁸ Wärmepumpe	Eine Wärmepumpe, die zur Wärme- und Kältenutzung umgeschaltet werden kann.
Rücklauf ¹⁹	Verbraucher- oder Übergabeseite: „von einem Apparat abströmender Massenstrom“, Erzeugerseite: „zuströmender Massenstrom“ Kurz: der Massenstrom zu den Erzeugern hin (von den Verbrauchern, Erdsonden, Rückkühlwerken, etc.)
Simulations- modell	siehe Modell.
Simulations- ergebnis- daten	(auch Ausgangsdaten) sind „Daten, die über die während des Simulationslaufs erfolgten Zustandsänderungen der Modellelemente Auskunft geben.“ ²⁰ Hier entstehen Simulationsergebnisdaten insbesondere für die Temperaturabweichungen im Heiz- und Kühlkreis, Rücklauftemperaturen der Erzeugermodule, deren erzeugte Wärme- bzw. Kälteenergiemenge und Primärenergieverbrauch sowie Wirkungsgrad bzw. Leistungszahl der Erzeugermodule.
Simulations- zeitraum	Der Simulationszeitraum ist wie der Betrachtungszeitraum festgesetzt. Er beginnt am 01.05.2010 und endet am 12.05.2013. Die Simulation wird mit einer Einschwingphase am 30.04.2010 gestartet.
Sole	meint den Wärmeträger, welcher durch die Erdreichwärmequelle bzw. Wärmesenke (hier Erdsonden) bzw. durch das Erdreichmodul fließt.
Speicher	Die Wärme- und Kälteerzeuger speisen in je eine hydraulische Weiche (hier Speicher genannt). Das Simulationsmodell besteht aus entsprechenden Modellelementen. Weiterhin ist das Erdreichmodul aus drei Speichermodule zusammengestellt. Diese Speichermodule werden explizit als solche des Erdreichmoduls (insbesondere für dessen Beschreibung) beschrieben. I. d. R. sind mit den Speichern bzw. entsprechenden Modellelementen immer die hydraulischen Weichen gemeint.

¹⁸ Vgl. Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H245.

¹⁹ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik, 2013, S. 142.

²⁰ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2013, S. 17.

Validierung ²¹	„Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System, die sicherstellen soll, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt.“ Aufgrund von Abstraktion und Erfassungsungenauigkeiten ist eine vollständige Übereinstimmung von Modell und realem System nicht möglich.
Variante	siehe Modellvariante.
Vorlauf ²²	„der Nutzenübergabe zuströmender Massenstrom“ Kurz: der Massenstrom von den Erzeugern weg (zu den Verbrauchern, Erdsonden, Rückkühlwerken, etc.)
Wärme- erzeuger	hier: Brennwertkessel und reversible Wärmepumpe. Das Simulationsmodell besteht aus entsprechenden Modellelementen.
Wärme- leistung	Die Wärmeleistung eines Stoffstroms (Volumendurchsatz pro Zeiteinheit) mit Temperaturänderung beträgt:
Stoffstrom ²³	$\dot{Q} \text{ [J/s]} = c_p \text{ [J/(kg·K)]} \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot \dot{V} \text{ [kg/s]} \cdot \Delta\theta \text{ [K]}$ für Wasser mit: $c_p \approx 4.190 \text{ J/(kg·K)}$ $\rho \approx 1.000 \text{ kg/m}^3$ Hier: in einem hydraulischen Netz lässt sich die Leistung eines Erzeugers bzw. Abnahmeleistung eines Verbrauchers mit der Gleichung berechnen. Die Temperaturdifferenz ist dazu immer zwischen Vor- und Rücklauf zu bestimmen.

Formel 5

²¹ Ebd., S. 20 f.

²² Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik, 2013, S. 178.

²³ Koenigsdorff, R., Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, 2011, S. 27 ff.

- Wärmepumpenmodul** Das Wärmepumpenmodul bildet in den Simulationsmodellen eine reversible Wärmepumpe ab, welche heizen und/oder kühlen kann. Das Wärmepumpenmodul ist aus drei untergeordneten Modellelementen zusammengestellt. Das Wärmepumpenmodul WP-H bildet den Teil der Wärmeerzeugung und das Wärmepumpenmodul WP-K den Teil der Kälteerzeugung ab, dies geschieht jeweils gegen das Erdreichmodul. Das dritte untergeordnete Modellelement ist das Wärmepumpenmodul WP-S, dieses berechnet den simultanen Heiz- und Kühlbetrieb. Die Bezeichnungen Wärmepumpenmodul WP-H, WP-K bzw. WP-S meinen nur den Teil der entsprechenden Betriebsart des Wärmepumpenmoduls. Das Wärmepumpenmodul ohne weitere Ergänzung meint hier immer das Modellelement, welches die gesamte Wärmepumpe abbildet. Das Wärmepumpenmodul wird in Kapitel 4.1.2 in Aufbau und Funktion detailliert erläutert.
- Wärmeträger**²⁴ „Medium (z. B. Wasser, Luft), das ohne Zustandsänderung für den Wärmetransport eingesetzt wird“
- Wirkungsgrad**²⁵ „Verhältnis von Nutzleistung zu Leistungsaufnahme“

²⁴ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), DIN EN 14511-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung, 2013, S. 6.

²⁵ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik, 2013, S. 187.

1 Einleitung

Die Energiewende, mit dem Ziel des stärkeren Einsatzes regenerativer Energien, ist nicht nur in Deutschland das aktuelle Thema zu Beginn des dritten Jahrtausends. Steigende Energiekosten und der Klimawandel verursacht durch CO₂-Emissionen sind Gründe für die nicht zuletzt durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima beschleunigten Veränderungen. Diese betreffen insbesondere den Strom-, Wärme- und Verkehrssektor. Rund 40 % der CO₂-Emissionen in Deutschland werden durch die Nutzung von Gebäuden verursacht.²⁶ Ebenso hoch ist deren Anteil am gesamten Energieverbrauch für z. B. Heiz-, Kühl-, Belüftungs- und Beleuchtungszwecke.²⁷ Einsparmaßnahmen, die effizientere Erzeugung und Versorgung sowie die Substitution fossiler Brennstoffe und der Kernenergie durch regenerative Energien werden politisch gelenkt forciert.

Zur Reduzierung des Klimawandels und mit der Energiewende verfolgt die Bundesregierung das Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber 1990 um 40 % und bis 2050 um 80 % bis 95 % zu reduzieren.²⁸ Die Energieeinsparverordnung²⁹ (EnEV) stellt dazu primärenergetische Anforderungen für Neubauten und bei Sanierung von Bestandsbauten. Ziel ist ein „nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis zum Jahr 2050“³⁰ bei ganzheitlicher Betrachtung der Gebäudehülle und Anlagentechnik. Darüber hinaus verlangt das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz³¹ (EEWärmeG) für Neubauten und grundlegend renovierte öffentliche Gebäude einen Mindestanteil erneuerbarer Energien in der Wärmeerzeugung und anlagenabhängige Mindestkriterien. Für Neubauten können z. B. 50 % des Wärme- und Kälteenergiebedarfs aus Geothermie und Umweltwärme gedeckt werden, um die Anforderungen des EEWärmeG zu erfüllen.

In diesem Forschungsbericht wird ein die Versorgung von Gebäuden betreffender Regelungsansatz vorgestellt, welcher einerseits den Einsatz regenerativer Energien (Erdwärme) berücksichtigt und andererseits die Energieproduktivität (durch Steigerung der Anlageneffizienz) verbessert. Vom Bearbeiter des Forschungsvorhabens wird auch eine Dissertationsschrift veröffentlicht, in welcher einige Aspekte noch einmal detaillierter behandelt werden. Dieser Forschungsbericht besteht teilweise aus Auszügen dieser Dissertationsschrift³².

²⁶ Vgl. Niesing, B., Energie-Produzent Gebäude, 2011, S. 10.

²⁷ Ebd., S. 9.

²⁸ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, 2014, S. 6 f.

²⁹ O. V., EnEV 2014, 2013 und O. V., EnEV 2007, 2007.

³⁰ O. V., EnEV 2014 § 1 Abs. 1, 2013.

³¹ O. V., EEWärmeG, 2008.

³² Bibliographische Angaben sind bei Abgabe des Forschungsberichts noch nicht bekannt. Auskunft erteilt der Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen: www.e3d.rwth-aachen.de.

1.1 Einführung in die Thematik

Die Erdwärmenutzung durch Wärmepumpen stellt eine Möglichkeit des Einsatzes regenerativer Energien in Gebäuden dar. Die Wärmepumpe hat dabei die Aufgabe, durch Primärenergieeinsatz der Erdwärmequelle Energie zu entziehen und auf höherem Temperaturniveau Wärme (z. B. für ein Heizsystem) zur Verfügung zu stellen. Wärmepumpen kühlen und heizen also gleichzeitig, wobei oft nur die warme Seite genutzt wird. Je geringer der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, desto geringer ist der Primärenergieaufwand. Kompressionswärmepumpen sollten aus 1 kWh Strom mehr als 3 kWh Wärme erzeugen. Hierfür ist eine gute Planung sowohl der Verbraucher hinsichtlich ihrer erforderlichen Temperaturen als auch der Erzeugungsanlage wichtig. Allerdings ist nicht nur eine gute Planung der Versorgungsanlage erforderlich, sondern die gesamter Bauprojekte, derer die Versorgungsanlage ein Teil ist. Die durch ein Bauprojekt verursachten Kosten summieren sich über Planung, Bau, Nutzung und Rückbau. Die Beeinflussbarkeit dieser Kosten sinkt mit Projektfortschritt stark. In der Regel (i. d. R.) fallen über die gesamte Nutzungsphase in Summe die höchsten Kosten an. In der Versorgungsanlage sind dies insbesondere die Energiekosten.

Eine gut geplante und ausgeführte Erzeugungs- und Versorgungsanlage ist Grundvoraussetzung für den hier vorgestellten Regelungsansatz, da Folgen einer schlechten Planung und Ausführung mithilfe des hier vorgestellten Regelungsansatzes nicht korrigiert werden können. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass komplexere Anlagen eine Einregulierung und Betriebsoptimierung während der ersten Betriebsmonate erfordern. So verbrauchen beispielsweise Wärmepumpen, die häufig ein- und ausgeschaltet werden, beim Anlauf mehr Energie und verschleißten deutlich stärker. Auch zu hohe Temperaturspreizungen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, die zu einer schlechteren Leistungszahl der Wärmepumpe führen, erhöhen deren Energieverbrauch. Das Einsparpotential durch optimierte Temperaturdifferenzen und minimierte Schaltvorgänge ist oft deutlich höher als durch den hier vorgestellten Regelungsansatz.

In größeren Anlagen werden Wärmepumpen oft bivalent eingesetzt, d. h. mit einem weiteren, i. d. R. konventionellen Erzeuger kombiniert. Die Wärmepumpe wird dabei meist als Grundlasterzeuger eingesetzt. Falls ihre Leistung nicht mehr ausreicht, um den Bedarf alleine zu decken, wird sie durch den konventionellen Erzeuger unterstützt. Der Zuschaltzeitpunkt wird z. B. über feste Temperaturen (wie die Außentemperatur) oder Temperaturabweichungen zwischen Soll- und Ist-Temperatur bestimmt. In größeren Anlagen wird oft zusätzlich eine Kälteerzeugung durch die Wärmepumpe vorgenommen.

Temperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke schwanken im jahreszeitlichen Verlauf. Im Winter erfordern Heizsysteme höhere Vorlauftemperaturen als in der Übergangszeit. Unterschiedliche Verbraucher (z. B. Lüftungsanlage, statische Heizkörper, aktivierte Bauteile) differieren in Temperaturanforderung und Laufzeit. Erdwärmequellen

haben durch Nutzung und Klima beeinflusste Temperaturen. Diese instationären Temperaturzustände führen zu einer schwankenden Leistungszahl der Wärmepumpe. Sie kann punktuell soweit sinken, dass der Einsatz des konventionellen Erzeugers günstiger wäre.

Solche phasenweise ungünstigen Systemzustände bleiben i. d. R. unerkannt. In einigen (vermutlich sogar vielen) Anlagen fehlt gar das Messequipment, um diese überhaupt erkennen zu können. Der Umgang mit dem Thema Energiekosten und Anlageneffizienz ist stark vom verantwortlichen Betreiberpersonal abhängig. Einige werden einfache Benchmarks (z. B. flächenbezogene Energiekosten) auswerten. Andere können, wenn entsprechende Zähler eingebaut sind, in einfachen Anlagen immerhin die Jahresarbeitszahl berechnen. Diese setzt die erzeugte Wärmemenge ins Verhältnis zur eingesetzten Primärenergie und ist ein wesentlicher Indikator für die Anlageneffizienz. Die wenigsten werden ein detailliertes Anlagenmonitoring durchführen, um einzelne Betriebsphasen getrennt beurteilen zu können. Verschiedene Quellen sehen insbesondere für komplexe Anlagen die Notwendigkeit eines Monitorings: Die VDI 6012³³ fordert z. B. ein umfangreiches Monitoring für komplexere Systeme, während die VDI 6041³⁴ das technische Anlagenmonitoring genauer beschreibt.

1.2 Problemstellung und Lösungsansatz

Ungünstige Systemzustände können bei Wärmepumpen zu ineffizientem Betrieb führen und die Jahresarbeitszahl senken. Dies gilt insbesondere für zeitweise große Temperaturunterschiede zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. I. d. R. wird die Jahresarbeitszahl wieder durch günstige Systemzustände ausgeglichen, so dass ein akzeptabler Mittelwert entsteht. Gleichwohl würde die Selektion der günstigsten Phasen durch die Wärmepumpe zu einer höheren Jahresarbeitszahl führen. Ebenso senken instabile Systemzustände, welche zu häufigen Schaltvorgängen führen, die Jahresarbeitszahl, dies soll hier aber nicht weiter betrachtet werden.

Erzeugungsanlagen werden für die Wärmeerzeugung auf den kältesten Wintertag ausgelegt, so dass an wärmeren Tagen Leistungsreserven bestehen. In bivalenten Anlagen kann abhängig von Last und Erzeugerleistungsverteilung daher ein Teil, oft auch die gesamte Last, auf den zweiten Erzeuger verlagert werden. Idealerweise könnte dies erfolgen, um ungünstige Systemzustände³⁵ der Wärmepumpe zu vermeiden.

³³ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 6012-1.1 Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude, 2014, S. 28.

³⁴ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 6041 Entwurf, Technisches Anlagenmonitoring, 2015.

³⁵ Ungünstige Systemzustände sind jederzeit relativ zum alternativen Erzeuger zu verstehen.

In diesem Forschungsbericht wird hierzu ein Regelungsansatz für bivalente Großanlagen beschrieben und ausgewertet. Ziel des Regelungsansatzes ist ein effizienterer Wärmepumpeneinsatz durch die Wahl zwischen den beiden Erzeugern. Die Regelung soll unter

- ökonomischen oder
- ökologischen

Gesichtspunkten zwischen den Erzeugern entscheiden. Die Einsatzdauer der Wärmepumpe kann dadurch geringer ausfallen. Durch gezielte Verlagerung auf den konventionellen Erzeuger würde die Jahresarbeitszahl dann steigen und die Effizienz der Gesamtanlage besser ausfallen.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung eines Regelungsansatzes, welcher den bivalenten Einsatz einer Wärmepumpe dahingehend optimiert, dass Zeiträume ungünstigen Betriebs (geringe Leistungszahl) automatisiert erkannt werden, um auf günstigere Erzeuger umzustellen. Der Regelungsansatz sollte möglichst in einer realen Anlage erprobt sowie Wirkung und Anwendungsgrenzen mittels einfacher Simulation begleitend untersucht werden. Folgende Arbeitsschritte und Themenfelder sollten in diesem Kontext beleuchtet werden:

- Potentialanalyse für drei Objekte;
- Entwicklung und Erprobung für Objekte mit Erfolgspotential;
- Analyse der Einflussparameter und Kostenfunktionen;
- Untersuchung einer aktiven „Bewirtschaftung“ des Erdreichs;
- einfache numerische Simulation (VBA Excelanwendung);
- theoretische Untersuchung der Kombination mit Wetterprognosen;
- Erstellen eines Handlungsleitfadens zur allgemeinen Umsetzung.

Die Potentialanalyse zeigte für die drei Untersuchungsobjekte unterschiedliche Ergebnisse. Diese waren stark von den Temperaturschwankungen sowohl in den Erdreichsonden als auch den Verbraucherkreisen geprägt. Ein ausschließlich mit Fußbodenheizung beheiztes Objekt wies aufgrund der dauerhaft günstigen Betriebsbedingungen kein auf den Betrieb ausgerichtetes Optimierungspotential auf. Bei heterogener Verbraucherstruktur und zeitweise hohen Temperaturanforderungen wurde für die anderen Objekte ein Kosteneinsparpotential von bis zu 10 % prognostiziert.

Die Umsetzungsplanung führte dazu, dass von der geplanten Herangehensweise abgewichen wurde. Die Messdaten ließen erwarten, dass die Wirkung einer veränderten Anlagenregelung nur sehr unsicher auszuwerten ist. Wärme- und Kälteabnahme, sowie Temperaturanforderung in den beiden Objekten sind so heterogen und volatil, dass

längere vergleichbare Phasen mit der ursprünglichen Regelung und einer optimierten Regelung nicht zu erwarten bzw. sicher zu identifizieren sind.

Die weiterhin interessante Fragestellung konnte mittels komplexer Anlagensimulation zielorientierter bearbeitet werden als mittels Erprobung in einem der Objekte und begleitender einfacher Simulationen. Die Erkenntnisse aus den Messdaten der Realanlagen sollten daher auf die komplexe Anlagensimulation angewendet und mittels dieser die Fragestellung bearbeitet werden. Dafür wurden aus den verfügbaren Messdaten die Einflussparameter bestimmt und davon abhängige Erzeugerkennlinien berechnet. Ebenso entstanden Lastgänge inkl. deren Temperaturverläufe für die Objekte.

Die Auswertung mittels komplexer Anlagensimulation erlaubte einen direkten Vergleich identischer Lastzustände mit unterschiedlichen Regelungsvarianten. Sie bot weiterhin deutliche Vorteile in der Auswertung der Anwendungsgrenzen des Regelungsansatzes.

In der Simulationsumgebung IDA ICE ist eine reale Erzeugungsanlage abgebildet. Das Simulationsmodell wurde so attribuiert, dass das reale Anlagenverhalten nachgebildet werden kann. Das Simulationsmodell kann mit Solltemperaturvorgabe und Lastannahme betrieben werden. Weiterhin sind Temperaturverhalten und Verteilung der Leistung auf die Erzeugermodule überprüfbar. Dieser Zwischenschritt diente der Validierung des Simulationsmodells. Zur detaillierten Darstellung und allgemeineren Auswertung wurde das Simulationsmodell von der Realanlage losgelöst und in die Basisvariante überführt. Die anlagenspezifischen Erzeugerkennlinien wurden dazu durch Kennlinien aus Herstellerangaben ersetzt. Das Modellelement einer erdgekoppelten Kompressionswärmepumpe kann in dem Simulationsmodell heizen und kühlen. Zur Wärme- und Kälteerzeugung steht weiterhin je ein Modellelement eines konventionellen Erzeugers (ein Brennwärtekessel und eine Kompressionskältemaschine) zur Verfügung. Für den erarbeiteten Lastgang mit dem entwickelten Simulationsmodell in der Variante des Ausgangsmodells kann in der Wärmeerzeugung eine gute Übereinstimmung mit der Realanlage nachgewiesen werden. Somit bleibt die Aussagekraft der Ergebnisse erhalten.

Untersucht wurde die idealisierte Erzeugungsanlage mit einem mehrjährigen Lastgang. Der Fokus lag in der Bearbeitung des Forschungsvorhabens auf der Wärmeseite der Erzeugungsanlage.

In Kapitel 2 werden zunächst die erarbeiteten Grundlagen dargelegt. Der Status quo der hydraulischen wie regelungstechnischen Einbindung von Wärmepumpen in bivalenten Systemen wird erörtert. Geläufige Kennzahlen werden beschrieben und gegenübergestellt.

Im folgenden Kapitel 3 wird ein allgemeingültiger Regelungsansatz hergeleitet und definiert. Er soll eine optimierte Erzeugerwahl vornehmen. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren werden hinsichtlich ihrer Erfassbarkeit und Wirkung diskutiert. Der Regelungsansatz wird sowohl in ökonomischer wie auch ökologischer Hinsicht untersucht. Daher werden die relevanten Energiepreise und Treibhausgasemissionen genauer analysiert. Das Kapitel schließt mit den Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung in realen Erzeugungsanlagen.

Das verwendete Simulationsmodell (Basisvariante) wird in Kapitel 4 in Aufbau und Attribuierung beschrieben. Hierzu gehören insbesondere Regelung, Lastgang und Erzeugermodule mit deren Kennlinien. Sodann erfolgt eine Auswertung der Wirkung des Regelungsansatzes in der ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante.

Die Basisvariante dient in Kapitel 5 als Grundlage. Hier werden Modellvarianten zur Untersuchung von Parametern aus unterschiedlichen Bereichen erstellt. Die Parameter werden in mehreren Variationen untersucht, um die Wirkung und Anwendungsgrenzen des Regelungsansatzes (in der ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante) zu bestimmen. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit zu den Untersuchungen und der Wirksamkeit des Regelungsansatzes. Die Beschreibung, Validierung und Auswertung des Simulationsmodells der Realanlage ist in einem internen Bericht³⁶ des Autors erfolgt.

In Kapitel 6 werden eine aktive Erdreichnutzung und der ergänzende Einsatz von Wetterprognosen behandelt. Aufgrund der fehlenden Messwerte aus Sole-Zählern kann das Thema der aktiven Erdreichnutzung nur eingeschränkt ausgewertet werden.

Zuletzt wird in Kapitel 7 eine Zusammenfassung sowie ein Gesamtfazit mit Ausblick inkl. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung formuliert.

³⁶ Form, G., Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien, 2013.

Die folgende **Abbildung 1** stellt noch einmal den Zusammenhang zwischen der Realanlage und dem Simulationsmodell in seinen Varianten gegenüber.

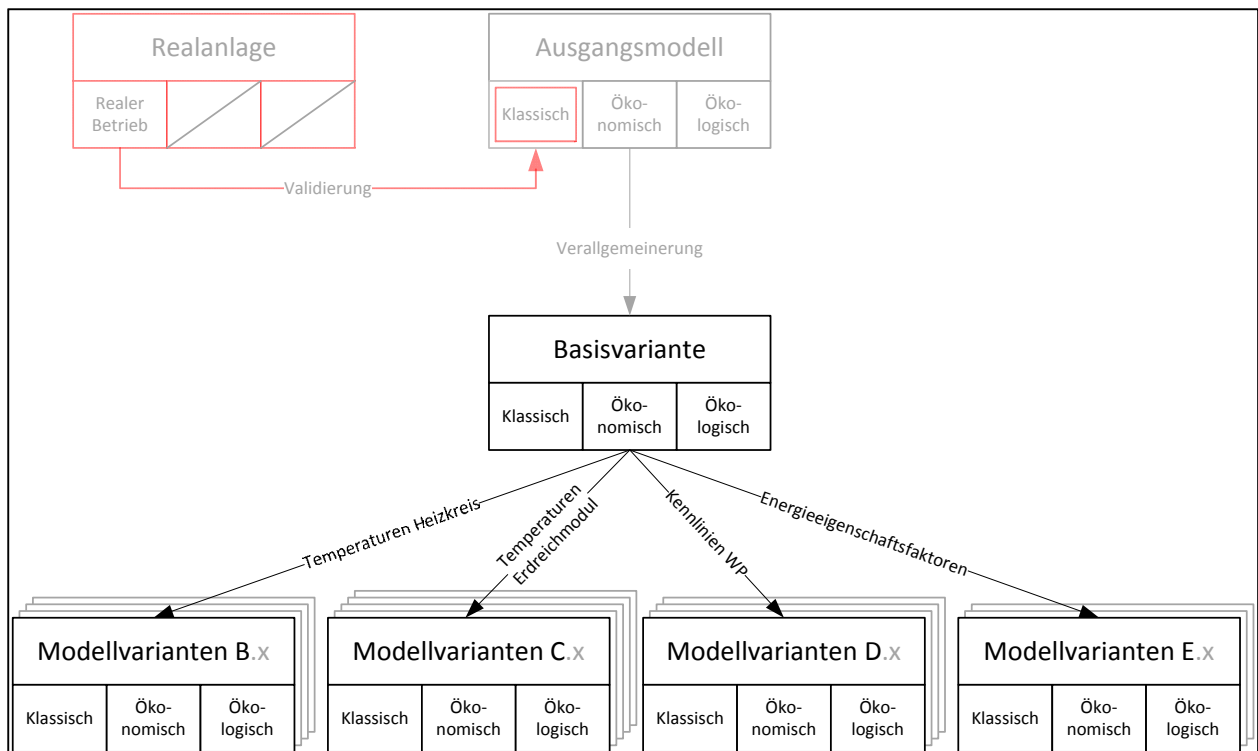


Abbildung 1: Zusammenhang Realanlage und Simulationsmodell in den Varianten

Mit dem Ausgangsmodell entstand im Vorfeld ein validiertes Simulationsmodell³⁷, welches in die verallgemeinerte Basisvariante überführt wurde.

Jede Variante des Simulationsmodells wird mit drei Regelungsvarianten berechnet, der klassischen, ökonomischen und ökologischen. Die Simulationsergebnisdaten dieser drei Regelungsvarianten werden hinsichtlich ihrer Wirkung vergleichend ausgewertet.

Dieses Vorgehen begründet auch die Möglichkeit von Vereinfachungen in der simulativen Abbildung. Die Basisvariante ist eine verallgemeinerte Variante eines validierten Simulationsmodells. Durch Parametervariationen entstehen weitere Modellvarianten. Es erfolgt aber nur ein Vergleich von Simulationsergebnisdaten jeweils einer Modellvariante mit unterschiedlichen Regelungsvarianten. Die für die Vergleiche herangezogenen Varianten des Simulationsmodells stimmen somit immer exakt überein, mit der Ausnahme, dass eine unterschiedliche Regelungsvariante per Parameter ausgewählt wird.

³⁷ Vgl. Form, G., Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien, 2013.

2 Wärmepumpen in Großanlagen

Wärmepumpen kommen zur Heizwärme- und zur Kälteenergieerzeugung zum Einsatz. Sie arbeiten nach dem thermodynamischen Carnot-Kreisprozess. An der Wärmequelle wird Wärme in den Prozess aufgenommen. Die Quelle (z. B. Erdreich oder Kühlkreis) kühlt dadurch ab. Auf der anderen Prozessseite kann auf höherem Temperaturniveau Wärme (z. B. an ein Heizsystem) abgegeben werden. Dazu wird der Aggregatzustand des Kältemittels der Wärmepumpe im Verdampfer auf niedrigem Druck- und Temperaturniveau durch die Wärmequelle verändert (flüssig → gasförmig). Durch Druckerhöhung im Kompressor wird das Kältemittel verdichtet, erwärmt sich dabei und wechselt bei Wärmeabgabe auf hohem Temperaturniveau seinen Aggregatzustand von dampfförmig wieder zurück zu flüssig. Für die Druckerhöhung bzw. Verdichtung ist Antriebsenergie erforderlich. Diese kann durch zwei bedeutende unterschiedliche Verfahren zugefügt werden: mittels Kompressor (Kompressionswärmepumpe) oder durch einen chemischen Lösungsmittelkreislauf (Absorptionswärmepumpe). Ersteres Verfahren ist gängiger und kommt in allen Leistungsklassen zum Einsatz. Als Antriebsenergie wird meist Strom verwendet. In größeren Anlagen (ab ca. 50 kW_{th.}) kann der Kompressor auch mittels Verbrennungsmotor angetrieben werden. Die Absorptionswärmepumpe ist deutlich träger. Sie kommt im hohen Leistungsbereich in einigen Fällen zum Einsatz. Der Lösungsmittelkreislauf wird durch Wärme auf hohem Temperaturniveau (z. B. aus Brennstoff oder Prozessabwärme) angetrieben. Im Gegensatz zum verschleißanfälligen mechanischen Kompressor ist die Absorptionswärmepumpe deutlich langlebiger.³⁸

Wärmepumpen werden von vielen Herstellern in verschiedenen Leistungsgrößen angeboten. In der Anschaffung sind sie teurer als konventionelle Wärmeerzeuger. Die Wärmequellenererschließung kann insbesondere bei Erdsonden weitere, nicht unerhebliche Kosten verursachen. Die Mehrinvestition sollte durch geringere Energieverbrauchs-kosten im Lebenszyklus zumindest ausgeglichen werden. Der Energieverbrauch ist gut auf Basis der Leistungszahl (Details siehe Kapitel 2.2) zu beurteilen. Er hängt maßgeblich von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ab. Diese Abhängigkeit kann direkt in der Leistungszahldefinition (vgl. Glossar) erkannt werden. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Kondensator und Verdampfer (im Nenner des Bruchs) ist, desto kleiner ist die Leistungszahl. Für den Heizkreis bedeutet dies, dass Flächenheizsysteme (Fußbodenheizung) und Niedertemperaturheizkörper günstig sind. Die Reduktion der Vorlauftemperatur um 1 K führt zu einer um ca. 2 %³⁹ höheren Leistungszahl. Als Wärmequelle kommen im wesentlichen Außenluft, Erdreich (Sonden o. ä.) und Grundwasser zum Einsatz. Während Außenluft einfach und günstig zu

³⁸ Vgl. Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H238 ff.

³⁹ Vgl. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), DIN EN 15450, Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen, 2007, S. 12.

erschließen ist, hat Erdreich insbesondere an kalten Tagen bessere Temperaturen zu bieten. Die wärmste Quelle ist i. d. R. Grundwasser, wobei die Nutzung aus technischen (z. B. Wasserqualität, Förderhöhe) und rechtlichen Gründen oft gar nicht möglich bzw. sinnvoll ist.⁴⁰

2.1 Hydraulische und regelungstechnische Einbindung

In der Planungs- und Bauphase (also vor der Inbetriebnahme) einer Wärmepumpenanlage werden sowohl durch die Hydraulik als auch Regelungstechnik wesentliche Grundlagen für den Betrieb der Anlage geschaffen. Diese wirken sich sowohl ökonomisch (insbesondere im Energieverbrauch) als auch betrieblich (Anlagentakten, Temperaturhaltung, usw.) in der Nutzungsphase aus.

Wärmepumpen werden insbesondere in Nichtwohngebäuden und größeren Wohngebäuden (Mehrfamilienhäuser) bevorzugt bivalent eingesetzt. D. h. sie werden mit einem weiteren Erzeuger, i. d. R. einem konventionellen, kombiniert. Die Wärmepumpe soll dann im ursprünglichen Sinne der Grundlastabdeckung (mit hohen Laufzeiten) und der konventionellen Erzeuger der Spitzenlastabdeckung dienen. Normalerweise stehen in bivalenten Systemen ausreichend Leistungsreserven zur Verfügung, denn die Anlagen werden heiztechnisch auf den kältesten bzw. kühltechnisch auf den wärmsten Tag ausgelegt. Die unterschiedlichen Betriebsweisen der Wärmepumpe werden in Kapitel 2.1.2 differenzierter erläutert.

2.1.1 Hydraulische Einbindung von Wärmepumpen und Speichern

Wärme- oder Kälteversorgungsanlagen bestehen immer aus (mindestens) einem Erzeuger und einem Verbraucher. Beide Seiten sind in Temperatur und Volumenstrom des Trägermediums (Wasser) voneinander abhängig. Auf der Verbraucherseite kann insbesondere für Heizzwecke von variablen Temperaturanforderungen, welche i. d. R. wetterabhängig sind, ausgegangen werden. Die Abnahmemenge und der hydraulische Abgleich des Verbrauchersystems beeinflussen Volumenstrom und Rücklauftemperatur. Die Verbraucherseite kann durch bauliche Maßnahmen (z. B. Dämmung) oder das Nutzerverhalten (z. B. Lüftungsverhalten, Thermostatventilstellung) verändert werden. Das Erzeugungssystem hat gleichwohl die Aufgabe, ausreichend Wärme bzw. Kälte zu erzeugen, damit die gewünschten Raumkonditionen unter verschiedenen Zuständen erzielt werden können.

⁴⁰ Vgl. Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H238 ff.

Mit unterschiedlichen Temperatur- und Volumenstromanforderungen können verschiedene Erzeugertypen unterschiedlich umgehen. Während z. B. moderne Gaskessel durch Brennermodulation gut auf unterschiedliche Volumenströme und Temperaturanforderungen reagieren können, erfordern insbesondere Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen mit nicht regelbaren Kompressoren konstante Volumenströme. Wichtig ist, hydraulisch auf den jeweils erforderlichen Mindestvolumenstrom am Erzeuger zu achten und diesen einzuhalten. Da die Erzeugergrundleistung z. B. in der Übergangszeit oft höher als die Abnahmeleistung ist, muss die Differenz gespeichert werden. Im einfachsten Fall übernimmt diese Funktion die Gebäudemasse (Trägheit der Baumasse und geringe Raumtemperaturschwankung) inkl. der Masse des Trägermediums im Verteilsystem. In größeren oder anspruchsvolleren Systemen kommen ergänzend Pufferspeicher zum Einsatz. In diesen wird erwärmtes bzw. gekühltes Wasser gespeichert und steht unabhängig vom Betrieb des Erzeugers zur Verfügung.

Für Wärmepumpen ist immer eine hydraulische Entkopplung von der Verbraucherseite erforderlich. Ausnahmen sind lediglich bei Kleinanlagen – welche in diesem Forschungsbericht nicht betrachtet werden – mit einem hohen Verhältnis von Heizwasservolumen zu Erzeugungsleistung sowie guter Speicherung im Objekt (z. B. durch Fußbodenheizung) möglich. Durch die Entkopplung sind die Volumenströme auf den beiden Seiten unabhängig. Der Differenzvolumenstrom muss durch einen Bypass geleitet werden. Der Bypass kann auch als Speicher ausgelegt werden.

Die Dimensionierung des Speichers ist anlagenspezifisch vorzunehmen. Speicher müssen neben der hydraulischen Entkopplung für Mindestlaufzeiten der Kompressoren sorgen. Diese sind zur Reduktion des Anlaufstromverbrauchs und für hohe Lebensdauern erforderlich. Größere Speicher können sinnvoll sein, falls längere Sperrzeiten der Energieversorgungsunternehmen (EVU) in sogenannten Wärmepumpentarifen überbrückt werden müssen. Aber auch die gezielte Verlagerung bei schwankenden Wärmequellentemperaturen (z. B. Außenluft oder Abwärmenutzung) oder die Nutzung von Eigenstrom aus Photovoltaik-Anlagen können Gründe sein.⁴¹

In bivalenten Systemen können Erzeuger parallel in den Speicher einspeisen oder in Reihe hinter der Wärmepumpe vorgesehen werden. In der Regel sollte der Speicher zwischen Wärmepumpe und konventionellem Erzeuger angeordnet werden, damit der Speicher nicht durch den konventionellen Erzeuger vollgeladen wird. In der praktischen Anwendung kommen beide Varianten vor.

⁴¹ Vgl. Baumgartner, T. et al., Wärmepumpen, 1993, S. 35 f.

2.1.2 Betriebsweisen und regelungstechnische Einbindung von Wärmepumpen

In der Planungsphase muss ein Energiekonzept erstellt werden. Dazu muss die benötigte Erzeugerleistung auf einen oder mehrere Erzeuger verteilt werden. Hierfür kommen fünf unterschiedliche Betriebsweisen, zwischen denen objekt- und erzeugerabhängig gewählt werden kann, infrage. Grundsätzlich wird zwischen monovalenten und bivalenten Systemen in Bezug zur eingesetzten Antriebsenergie bzw. dem Brennstoff unterschieden.

Die monovalente Betriebsweise kommt vorwiegend in kleinen Objekten zum Einsatz. Hier ist die Wärmepumpe alleiniger Erzeuger. Die Wärmepumpenanlage muss zwar auf den kältesten Tag ausgelegt werden und ist damit relativ teuer, jedoch können Kosten für Investition und Betrieb von z. B. Schornstein, Gasanschluss oder Brennstofflagerung eingespart werden. Schlechte Leistungszahlen (insbesondere bei der Wärmequelle Außenluft oder höheren Systemtemperaturen) an kalten Tagen müssen in Kauf genommen werden.⁴²

Eine Variante hierzu ist bei elektrisch betriebenen Kompressionswärmepumpen die monoenergetische, ein Sonderfall der bivalent-parallelen Betriebsweise. Ein Elektroheizstab übernimmt die Abdeckung der Spitzenlast an den kältesten Tagen bzw. die aus Hygienegründen erforderliche Erzeugung hoher Temperaturen für Trinkwarmwasser. Hierdurch können nicht nur die Investitionskosten gegenüber der monovalenten Variante reduziert, sondern auch längere Taktzeiten im Teillastbereich erreicht werden. Bei Betrieb des Elektroheizstabs fallen die Leistungszahlen jedoch noch geringer als im monovalenten Betrieb aus.⁴³

In größeren Anlagen oder bei Umbau von Bestandsanlagen kommt i. d. R. eine der drei bivalenten Betriebsweisen zum Einsatz. Ein konventioneller Erzeuger kann ergänzend oder alternativ eingesetzt werden. Hierdurch kann die Wärmepumpe kleiner ausfallen, erzielt höhere Laufzeiten und bringt weniger bzw. keine Leistung zu Zeiten schlechterer Leistungszahlen. In Bestandsanlagen können unabhängig von der Anlagengröße bestehende Anlagenteile für eine Umrüstung auf eine solche Betriebsweise sprechen. Der Zuschaltzeitpunkt des konventionellen Erzeugers wird Bivalenzpunkt (auch Dimensionierungspunkt der Wärmepumpe) genannt. Bei der in den folgenden Abbildungen idealisierten Abhängigkeit von Außentemperatur und Heizlast kann dieser anlagenabhängig einer fixen Außentemperatur zugeordnet werden. In der Praxis wird der Bivalenzpunkt aufgrund des Nutzerverhaltens um diesen schwanken, sofern er nicht regelungstechnisch vorgegeben ist oder eine technisch begründete Temperaturgrenze darstellt.

⁴² Vgl. Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H241 ff.

⁴³ Vgl. Koenigsdorff, R., Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, 2011, S. 157 f.

Die bivalent-parallele Betriebsweise sieht einen primären Betrieb der Wärmepumpe vor. Sollte die Leistung nicht ausreichen, unterstützt der konventionelle Erzeuger. Diese Variante ist in **Abbildung 2** dargestellt. Da kalte Tage bzw. hohe erforderliche Leistungen nur einen geringen Anteil der Heiztage ausmachen, kann mit einer gegenüber der monovalenten Betriebsweise kleineren Wärmepumpe ein großer Teil der Heizwärme erzeugt werden. Der Einbruch der in **Abbildung 2** dargestellten Wärmepumpenleistung ab dem Bivalenzpunkt ist auf die steigenden Systemtemperaturen bei kalten Außentemperaturen zurückzuführen.⁴⁴

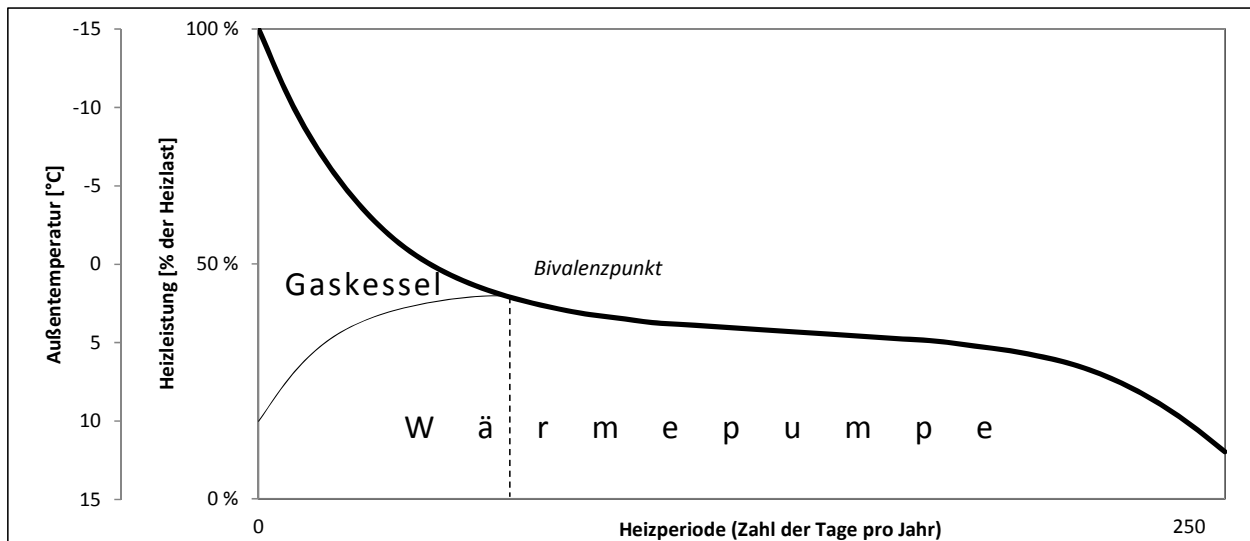


Abbildung 2: Beispiel bivalent-paralleler Betrieb, Zahlen exemplarisch⁴⁵

Der Leistungseinbruch in **Abbildung 2** links vom Bivalenzpunkt ist für den bivalent-parallelen Betrieb überzogen dargestellt, begründet aber den Einsatz der bivalent-alternativen Betriebsweise. Bei dieser wird im Bivalenzpunkt vollständig auf den konventionellen Erzeuger umgeschaltet. Diese Betriebsweise ist in **Abbildung 3** dargestellt. Sie kann aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen gewählt werden. Wirtschaftlich bedeutet dies, dass niedrigere Leistungszahlen aufgrund der betriebsbestimmenden Temperaturdifferenz zu erwarten sind. Die Wärmepumpe hat aber auch technische Grenzen. Je nach Modell und verwendetem Kältemittel können bestimmte Quelltemperaturen nicht unterschritten (insbesondere bei Außenluftwärmepumpen) oder zu hohe Temperaturspreizungen nicht erreicht werden.⁴⁶

⁴⁴ Vgl. u. a. ebd., S. 156.

⁴⁵ Darstellung in Anlehnung an Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H242.

⁴⁶ Vgl. u. a. Koenigsdorff, R., Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, 2011, S. 156.

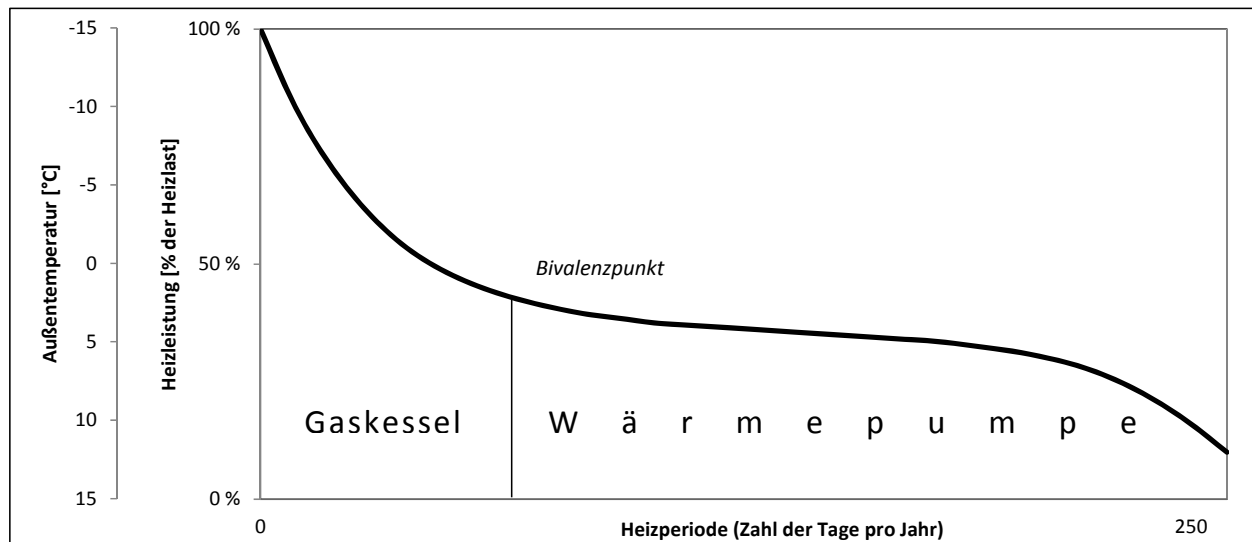


Abbildung 3: Beispiel bivalent-alternativer Betrieb, Zahlen exemplarisch⁴⁷

Die bivalent-teilparallele Betriebsweise (vgl. **Abbildung 4**) kann angewendet werden, wenn die Wärmepumpenleistung zu einem früheren Zeitpunkt, als die Wärmepumpe aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen abgeschaltet werden soll, nicht mehr ausreichend ist. Diese ist eine Mischform der bivalent-parallel und bivalent-alternativen Betriebsweisen. Im Bivalenzpunkt wird bei steigender Anforderung zunächst der konventionelle Erzeuger zugeschaltet (vgl. bivalent-parallel), weil die Leistung der Wärmepumpe nicht mehr ausreichend ist. Erst zu einem späteren Zeitpunkt wird die Wärmepumpe aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen (vgl. bivalent-alternativ) abgeschaltet.⁴⁸

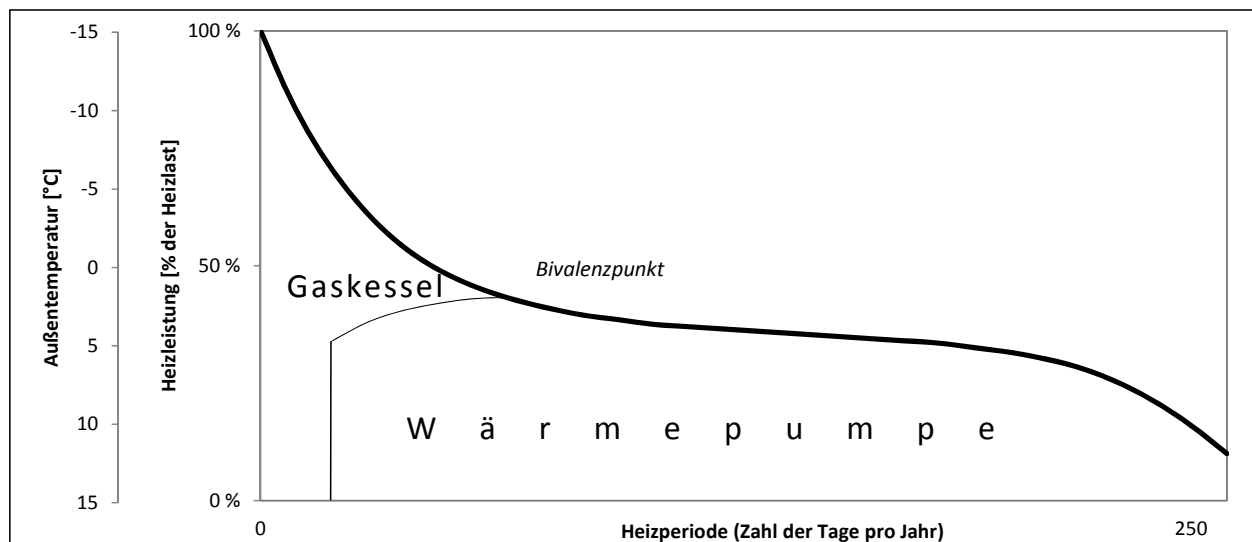


Abbildung 4: Beispiel bivalent-teilparalleler Betrieb, Zahlen exemplarisch⁴⁹

⁴⁷ Darstellung in Anlehnung an Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H242.

⁴⁸ Vgl. u. a. Koenigsdorff, R., Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, 2011, S. 156.

⁴⁹ Darstellung in Anlehnung an Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H242.

Die geplante Betriebsweise findet auch in der Anlagenregelung Berücksichtigung. Der Bivalenzpunkt kann anlagenspezifisch von verschiedenen Aspekten abhängig sein. Maschinentechnisch unpassende Temperaturen können genauso Einfluss nehmen wie Tarifmerkmale (Sperrzeiten) der EVUs. In der Praxis können auch nicht von der Außentemperatur abhängige Laständerungen entstehen (z. B. Wiederaufheizphasen, hoher Einfluss innerer Lasten oder Sonnenstrahlung). Die Wärmepumpe wird regelungstechnisch analog zu den beschriebenen Betriebsweisen als Grundlasterzeuger eingesetzt. D. h. solange sie ausreichend Leistung bringt oder der Bivalenzpunkt nicht erreicht ist, soll diese alleine arbeiten.

2.2 Kennzahlen zum Vergleich unterschiedlicher Erzeugertypen

Zum Vergleich verschiedenartiger Wärme- oder Kälteerzeuger können Kennzahlen dienen. Verschiedene Bewertungsverfahren (zur Ermittlung von Kennzahlen) betrachten unterschiedliche Bilanzräume, Bewertungszeiträume und haben verschiedene Prüfbedingungen oder abweichende Definitionen einer Kennzahl. Der Bilanzraum kann beispielsweise nur den Erzeuger, einzelne Komponenten (wie den Kompressor), Erzeuger mit Wärmequelle bzw. Wärmesenke (z. B. Erdsonden, Rückkühlwerk) oder das Erzeugungssystem unter Einschluss von Hydraulik, Speicher und Verbraucher umfassen. Der Bewertungszeitraum kann aus unterschiedlichen Zeiträumen wie z. B. einem Tag oder einem Jahr bestehen. Dies trifft jedoch nicht auf Kennzahlen zu, welche aus Momentanzuständen (Leistungszahlen) gebildet werden. Maschinen können unter definierten Prüfbedingungen im Labor oder im laufenden Betrieb bewertet werden. Bei der Definition der Kennzahlen kann zwischen der Betrachtung von zeitpunkt- und zeitraumbezogenen Kennzahlen unterschieden werden. Leistungszahlen sind auf einen Zeitpunkt bezogen und bilden das Leistungsverhältnis von Output und Input. Arbeitszahlen hingegen betrachten die kumulierte Arbeit über einen definierten Zeitraum.⁵⁰

Der Wirkungsgrad stellt die wesentliche Kenngröße für Maschinen dar. Er setzt Nutzen ins Verhältnis zum Aufwand. Hierfür wird i. d. R. von Werten kleiner eins ausgegangen. Der Wirkungsgrad von Wärmepumpen und Kältemaschinen fällt jedoch i. d. R. deutlich höher aus. Grund ist der Einsatz der nicht als Aufwand bewerteten Umweltenergie. Der Wirkungsgrad von Wärmepumpen wird daher Leistungszahl genannt.⁵¹

Die Leistungszahl für Wärmepumpen ist der COP (Coefficient of Performance), für Kältemaschinen der EER (Energy Efficiency Ratio). Beide Kennzahlen setzen die Nutzleistung (Wärme- bzw. Kälteleistung) ins Verhältnis zum Strombedarf (vgl. **Formel 2** und

⁵⁰ Vgl. Köberle, T.; Becker, M., Übersicht zu Energieeffizienzkenngrößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik, 2013, S. 55 ff.

⁵¹ Vgl. Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2013, S. 1598.

Formel 3 im Glossar). Da im vorliegenden Forschungsbericht Wärmepumpen betrachtet werden, welche simultan heizen und kühlen können, ist eine allgemeinere Betrachtung erforderlich. Die Leistungszahl ϵ setzt allgemein die Nutzleistung ins Verhältnis zur zugeführten Leistung (hier Strom). Die Nutzleistung ist dabei die Addition von Wärme- und Kälteleistung, da hier die Wärme- und die Kälteseite genutzt werden (vgl. **Formel 4** im Glossar).

Im Folgenden wird für Kompressionsmaschinen (Wärmepumpen und Kältemaschinen) vereinfacht immer von Leistungszahlen gesprochen. Damit kann teilweise auch der COP oder EER gemeint sein.

Im laufenden Betrieb untersuchte Erzeuger werden durch Betriebsfaktoren beeinflusst, die in Prüfstandsuntersuchungen nicht relevant sind. Die Erzeugerleistung (auch Teillastbetrieb) und Temperaturverhältnisse im System sind nicht oder nur bedingt zu beeinflussen. Stationäre Betriebszustände sind kaum zu erzielen. Verschiedene betriebs- und alterungsbedingte Faktoren nehmen Einfluss. So können Schmutzfänger oder Wärmetauscher verschmutzen oder letztere vereisen. Infolge sinken dann die Volumenströme des Wärmeträgers, was zu höheren Temperaturdifferenzen und folglich niedrigeren Leistungszahlen führt.⁵²

In der Praxis kommt oft erschwerend hinzu, dass die Bilanzgrenzen messtechnisch nicht exakt und einheitlich erfasst werden. Solepumpen können Bestandteil der Wärmepumpe sein und ihr Verbrauch über deren Stromzähler mit erfasst werden. Rückkühlwerke dagegen stehen i. d. R. weit entfernt und werden von anderer Stelle ohne separate Verbrauchsmessung versorgt. Je nach Gebäudehöhe können teilweise nicht unerhebliche Antriebsleistungen für Pumpen zum Erreichen der Rückkühlwerke erforderlich werden. Dabei wird der Stromverbrauch in den seltensten Fällen gesondert aufgezeichnet. Auch der Stromverbrauch der Regelungstechnik wird häufig aus Betriebs- und Installationskostengründen nicht erfasst bzw. kann in bivalenten Systemen gar nicht einem Erzeuger direkt zugeordnet werden.

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe bzw. Kältemaschine, berechnet aus dem Verhältnis der Wärme- bzw. Kälteleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme, ist nach dem idealen Carnot-Prozess bestimmt durch die Temperaturen und deren Differenz zwischen Verdampfer und Kondensator.⁵³ Für den Fall der Heizung mittels Wärmepumpe ergibt eine höhere Temperatur der Wärmequelle (z. B. Erdwärme) und eine niedrigere Vorlauftemperatur im Heizkreis eine günstigere Leistungszahl. Weiterhin ist

⁵² Vgl. Köberle, T.; Becker, M., Übersicht zu Energieeffizienzkenngrößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik, 2013, S. 57 f.

⁵³ Vgl. Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2013, S. 1598.

ein kontinuierlicher Betrieb bei möglichst stationären Betriebsbedingungen jedes einzelnen Kompressors von wesentlicher Bedeutung.

Für die Berechnung von Leistungszahlen sind in Realanlagen Annahmen zum Umgang mit Anlauf- bzw. Abschaltvorgängen zu treffen. Pumpen müssen vor- und nachlaufen, obwohl keine Leistung der Wärmepumpe erbracht wird. Stagnationstemperaturen können beim Anlaufen von Erzeugern zu unbrauchbaren Leistungsdaten führen. Ebenso können lange Leitungswege zwischen Erzeugern und Wärmemengenzählern zu Verzögerungen der Leistungserfassung (Totzeiten) führen. Aussagekräftige Leistungszahlen können nur bei relativ konstanten Rahmenbedingungen bestimmt werden. D. h. es müssen geringe Temperaturschwankungen vorliegen. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Messungen in Betriebsanlagen sollten möglichst keine Änderungen der Kompressorleistung und des Volumenstroms stattfinden.

Arbeitszahlen setzen die erzeugte Heizarbeit ins Verhältnis zum Energieverbrauch der Antriebe (vgl. **Formel 1** im Glossar). Für die Kompressionswärmepumpe sind dies die Heizwärmemenge und Stromaufnahme des Verdichters, zugehöriger Pumpen und der Regelungstechnik. Für die Auswertung von Betriebsanlagen sind jedoch keine eindeutigen Bilanzgrenzen definiert.⁵⁴ Bei der Betrachtung über ein Jahr wird dieses Verhältnis auch Jahresarbeitszahl (JAZ) genannt. Falls die Wärmepumpe einen eigenen Wärmemengen- und Stromzähler hat, ist diese einfach zu bestimmen. In komplexeren Anlagen, insbesondere mit Heiz- und Kühlfunktion der Wärmepumpe, ist eine Zuordnung der Energiemengen zu den unterschiedlichen Betriebszuständen erforderlich.

⁵⁴ Vgl. Miara, M. et al., Wärmepumpen, 2013, S. 26.

3 Regelungsansätze für bivalente Wärmepumpenanlagen

Im folgenden Kapitel wird eine neu entwickelte Regelstrategie für große bivalente Wärmepumpenanlagen vorgestellt und deren Wirksamkeit ab Kapitel 4 simulatorisch unter Beweis gestellt. Die Vorteilhaftigkeit dieses Regelungsansatzes wird an Mehrjahressimulationen auf Basis eigens erfasster Messwerte von Wärmepumpengroßanlagen im Realbetrieb dargelegt.

3.1 Entscheidungskriterien in neuen Regelungsansätzen

Die Entscheidung zwischen zwei Erzeugern kann unter verschiedenen Aspekten erfolgen. Rechtliche Einschränkungen, technische Grenzen und subjektive Vorgaben bleiben in der weiteren Diskussion unberücksichtigt und werden als Phasen der Nichtverfügbarkeit eines Erzeugers betrachtet. Abweichend vom konsequenten Grundlasteinsatz der Wärmepumpe können folgende Entscheidungskriterien verwendet werden:

- ökonomische auf Basis der momentanen Energiepreise;
- ökonomische unter zusätzlicher Berücksichtigung weiterer Kosten des Lebenszyklus;
- ökologische für den Energieverbrauch (z. B. CO₂-Ausstoß);
- ökologische unter Berücksichtigung weiterer Ursachen im Lebenszyklus.

Für ökonomische Betrachtungen unterteilt die VDI 2067⁵⁵ Kosten allgemein in vier Kostengruppen:

- kapitalgebundene Kosten – dies sind Investitions- und Instandsetzungskosten;
- bedarfsgebundene Kosten – hierunter fallen insbesondere die Primärenergiekosten inkl. zugehöriger Grundkosten, aber auch Kosten für Hilfsenergie oder Betriebsstoffe;
- betriebsgebundene Kosten – hierzu gehören u. a. Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Reinigung;
- sonstige Kosten wie z. B. Versicherungen, Steuern.

Die weitere Betrachtung kann zwar nicht vollständig auf Basis der Kostengruppen bzw. der Kosten erfolgen, da messtechnisch Energieverbräuche bzw. Energieflüsse erfasst werden; jedoch bildet die Einteilung eine gute Grundlage. Es ist erforderlich, die bedarfsgebundenen Kosten aufzuteilen. Die Primärenergiekosten (ohne Grundkosten) als wesentlicher Anteil sollen unabhängig von den restlichen bedarfsgebundenen Kosten betrachtet werden. Ansonsten wird die vorgenannte Einteilung im Weiteren verwendet. Die ökologische Betrachtung sollte unter analoger Einteilung erfolgen, zumal keine andere vergleichbare Unterteilung bekannt ist. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass (mit Ausnahme bei den sonstigen Kosten) die kostenverursachenden und

⁵⁵ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 2067-1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, 2012, S. 13 ff.

CO₂-verursachenden Punkte im Wesentlichen übereinstimmen und nur in den relativen Höhen differieren.

3.1.1 Erzeugerwirkungsgrad und Primärenergieeinsatz

Alle o. g. Aspekte berücksichtigen die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Erzeuger. Im Falle des Einsatzes gleicher Energieträger kann über die Wirkungsgrade für jeden Zeitpunkt eine eindeutige Wahl zum Einsatz der Erzeuger gefällt werden. Diese ist ökonomisch wie ökologisch bezogen auf den Primärenergieverbrauch (als Teil der bedarfsgebundenen Kosten) eindeutig. Im Großteil der Fälle werden jedoch unterschiedliche Primärenergieträger zur Anwendung kommen, i. d. R. Strom für eine Kompressionswärmepumpe und ein Brennstoff wie Gas oder Öl für den konventionellen Erzeuger. Wirkungsgrad des konventionellen Erzeugers und Leistungszahl der Wärmepumpe sind mit der bezogenen Primärenergie zu verknüpfen. Der Energiepreis ist für die ökonomische Betrachtung ausschlaggebend. Die europäischen Klimaschutzziele und damit auch die der BRD verlangen eine Senkung der Treibhausgasemissionen und damit im Wesentlichen von CO₂.⁵⁶ Im Falle der ökologischen Betrachtung ist es daher naheliegend, den CO₂-Ausstoß bezogen auf den Primärenergieverbrauch zu verwenden.

Der Vergleich zwischen zwei Erzeugern sollte also die erwarteten Energiekosten bzw. den erwarteten CO₂-Ausstoß für den jeweiligen Betriebszustand beinhalten. Die Werte können mit Hilfe der Leistungszahl der Wärmepumpe bzw. dem Wirkungsgrad des konventionellen Erzeugers in Kombination mit dem Energiepreis bzw. dem CO₂-Emissionswert berechnet werden.

An dieser Stelle sei auf das Kapitel 3.2 verwiesen, in welchem noch einmal genauer auf den Zusammenhang und Unterschied zwischen Energiekosten und Treibhausgasausstoß eingegangen wird.

3.1.2 Energiekosten bzw. Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus einer Erzeugungsanlage

Als Lebenszyklus der Erzeugungsanlage wird die gesamte Zeitspanne der Anlagenexistenz bezeichnet.⁵⁷ Die Gesamtlebenszykluskosten einer gebäudetechnischen Anlage resultieren im Wesentlichen aus betriebsbedingten Verbrauchskosten und Instandhaltungskosten. Mit der Instandhaltung gehen jedoch nicht nur Kosten einher, sondern auch Treibhausgasemissionen. Treibhausgasemissionen können z. B. aus Materialaufwand resultieren. Treibhausgasemissionen können aber auch in der Ursache für eine Instandsetzung begründet sein, wie z. B. ein Kältemittelverlust. Eine Betrachtung von

⁵⁶ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Klimaschutz in Zahlen, 2014, S. 10 ff.

⁵⁷ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik, 2013, S. 107.

Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der Instandhaltung ist jedoch nicht geläufig. Daher sind keine einschlägigen Begriffe verfügbar. Im Weiteren werden deshalb nur die Kosten genannt, die Treibhausgasemissionen sind hier implizit mit eingeschlossen. Der vorgestellte Ansatz der Energiekosten bzw. Treibhausgasemissionen soll hier um den Aspekt des Lebenszyklus der Erzeugungsanlage erweitert werden. Somit fallen alle Kostengruppen in die Betrachtung. Die schon im Kapitel 3.1.1 beschriebene Verwendung der Primärenergie muss hier nicht erneut betrachtet werden.

Die im gesamten Lebenszyklus anfallenden Kosten und Treibhausgasemissionen müssen hinsichtlich ihrer Entstehung eingeteilt werden. Dabei können Positionen entweder zeitabhängig (regelmäßige Kosten wie Anschlussgrundgebühren, Schornsteinfeger,...) oder von der Maschinenlaufzeit (z. B. Instandhaltung) abhängig sein. Nicht jede Position ist eindeutig zuzuordnen. Während die zeitabhängigen Kosten keinen Einfluss auf die Entscheidung zwischen unterschiedlichen Erzeugern nehmen, ergeben die laufzeitabhängigen Positionen einen fixen Betrag, welcher in der Entscheidung berücksichtigt werden sollte.

Eine gleiche Unterteilung ist für die ökologische Betrachtungsweise erforderlich. Hierbei ist der Treibhausgasausstoß zu berücksichtigen. Treibhausgasemittierende Vorgänge fallen in unterschiedlichen Positionen an. Dies können Material- und Energieverbrauch in der Herstellung, während des Baus und bei Instandhaltung sein, aber auch während des Betriebs oder durch Fehlbedienung austretende Kältemittel. Wie und ob überhaupt die Treibhausgasmengen belastend bestimmt werden können, soll hier nicht weiter erörtert werden.

3.2 Gegenüberstellung einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung

Der hier vorgestellte Regelungsansatz soll wahlweise in einer ökonomischen wie auch ökologischen Regelungsvariante eingesetzt werden können. In der Regelung muss dazu lediglich zwischen dem Preis und CO₂-Emissionswert z. B. des Primärenergiebezugs gewählt werden. An dieser Stelle soll die Frage nach der Herkunft einer aktuellen Information über Preis oder CO₂-Emissionswert nicht beantwortet werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die Kosten deutlich aktueller und einfacher herzuleiten sind als die CO₂-Emissionen, weil der Markt durch den Preis und nicht einen CO₂-Emissionswert geregelt wird. Aktuelle Tendenzen zum Smart-Grid (intelligenten Stromnetz) mit Bestrebungen zu variablen Stromtarifen berücksichtigen auch in naher Zukunft (für den Endverbraucher) nur die Kosten.⁵⁸ Der CO₂-Ausstoß wird nur durch den sogenannten Emissionshandel in Europa berücksichtigt. Große Feuerungsanlagen (>20 MW)

⁵⁸ Vgl. Motsch, W. in: Aichele, C. (Hrsg.), Smart Energy, 2012, S. 245 f.

sowie größere Anlagen der energieintensiven Industrie benötigen handelbare Zertifikate für ausgestoßenes CO₂ bzw. CO₂-Äquivalente.⁵⁹ Für den regelungstechnischen Ansatz bivalenter Wärmepumpen ist dies nicht relevant, insbesondere weil die Zertifikate für mehrjährige Perioden ausgegeben werden und gültig sind. Auch ist nicht erkennbar, dass zukünftig Zulieferer oder Dienstleister (z. B. für die Wartung der Anlagen) den CO₂-Ausstoß in ihrer Wertschöpfungskette berechnen und bekannt geben werden.

3.2.1 Treibhausgasemissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung

Die Erdatmosphäre ist ein Schutzschild für die Erde. Sie übernimmt die Aufgabe, die Transmission vom Weltall auf die Erde und von der Erde zurück ins Weltall zu regulieren. Kurzwellige Strahlung (Sonnenstrahlung) hat einen besseren Durchgang als langwellige Wärmestrahlung (Abstrahlung der Erde). Dies wird Treibhauseffekt genannt und führt zu kontinuierlicher Erwärmung der Erde. Der Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) auf der Erde führt zu einer veränderten Zusammensetzung der Erdatmosphäre und damit deren Transmissionseigenschaften. Die Durchlässigkeit langwelliger Strahlung wird reduziert und die Erde erwärmt schneller. Methan und Lachgas entstehen insbesondere in der Landwirtschaft und Viehzucht, CO₂ durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie der biologischen Umsetzung von z. B. Pflanzenresten. Verschiedenartige Treibhausgase können in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden, damit ein direkter Vergleich klimawirksamer Effekte erfolgen kann. Vereinfacht wird in diesem Forschungsbericht nur von CO₂-Ausstoß bzw. CO₂-Emissionen gesprochen. Tatsächlich sind jedoch die CO₂-Äquivalente gemeint. In der Energieerzeugung durch die Verbrennung vornehmlich fossiler Ressourcen ist CO₂ die wesentliche Einflussgröße.⁶⁰

Verschiedenartige Brennstoffe bzw. Erzeugungsarten haben unterschiedliche CO₂-Emissionen. Für die Stromerzeugung hat Wagner⁶¹ in einer Literaturrecherche die in folgender **Tabelle 1** aufgeführten Bereiche als plausibel identifiziert. Für eine konventionelle Stromerzeugung sind diese Werte direkt von der eingesetzten Brennstoffmenge und dem Wirkungsgrad der Erzeuger abhängig. Für den deutschen Strommix im Jahr 2012 gibt das Umweltbundesamt 562 g/kWh_{el.} an. Dieser Wert hat 1990 noch 744 g/kWh_{el.} betragen und 2010 mit 542 g/kWh_{el.} den niedrigsten Wert der Statistik eingenommen. Die Werte sind das Verhältnis von Deutschlands CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung zum gesamten Stromverbrauch; Im- und Exporte bleiben unberücksichtigt.⁶²

⁵⁹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Kurzinfo Emissionshandel.

⁶⁰ Vgl. Schabach, T.; Wesselak, V., Energie, 2012, S. 131 ff.

⁶¹ Vgl. Wagner, H.-J. et al., CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, 2007.

⁶² Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, Stand 03/2014.

Tabelle 1: CO₂-Äquivalente (Emissionen) in der Stromerzeugung⁶³

	CO ₂ -Äquivalente [g/kWh _{el.}]	
	von	bis
Braunkohle	850	1.200
Steinkohle	750	1.100
Gas	400	550
Photovoltaik	50	100
Wasserkraft	10	40
Windenergie	10	40
Kernenergie	10	30
Solarthermie	10	14

Diese Werte fallen gegenüber denen der Wärmeerzeugung relativ hoch aus, weil Strom ein vergleichsweise hochwertiger Energieträger ist, welcher gut transportierbar und universell einsetzbar ist. Die CO₂-Emissionen für die Wärmeerzeugung sind in der folgenden **Tabelle 2** aufgeführt.

Tabelle 2: CO₂-Äquivalente (Emissionen) in der Wärmeerzeugung⁶⁴

	CO ₂ -Äquivalente [g/kWh _{th.}]	
	von	bis
Stromheizung	598	615
Heizölkessel	327	376
Erdgaskessel	251	290
Fernwärme	254	254
Wärmepumpe	157	186

Die beiden Datensätze entstammen unterschiedlichen Quellen. Die in **Tabelle 2** angegebenen Werte der Stromheizung (Direktnutzung bzw. Nachtspeicherofen) sollten denen des Strommixes entsprechen, weil Strom eins zu eins in Wärme gewandelt werden kann. In **Tabelle 2** fallen die CO₂-Emissionen gegenüber dem Wert für den Strommix im Jahr 2010 um bis zu 13 % höher aus. Ob diese Differenz aus einer abweichenden

⁶³ Vgl. Wagner, H.-J. et al., CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, 2007, S. 50.

⁶⁴ Vgl. Vohrer, P. et al., Erneuerbare Wärme, 2013, S. 13.

Datenbasis oder Erfassungsmethode resultiert, oder ob die Differenz systembedingte Verluste aufzeigt, soll hier nicht näher untersucht werden. Die CO₂-Emissionen der Wärmepumpe (die Bandbreite berücksichtigt die Wärmequellen Erdsonden, Grundwasser und Luft) haben ein Verhältnis zur direkten Stromnutzung nach **Tabelle 2** von 3,22 bis 3,92. Bei Ansatz des CO₂-Ausstoßes für den Strommix des Umweltbundesamtes beträgt dieses Verhältnis 2,91 bis 3,45 im Jahr 2010.

3.2.2 Verhältnis von Energiepreisen und CO₂-Emissionswerten

Für den hier vorgestellten Regelungsansatz ist es zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Ausarbeitung schwer, eine vollständige Betrachtung auf Basis der CO₂-Emissionen vorzunehmen, vgl. Kapitel 3.2, weil die erforderlichen Informationen teilweise gar nicht und insbesondere nicht zeitnah verfügbar sind. Die verbrauchsgebundenen Kosten nehmen in der Betriebsphase einer Erzeugungsanlage neben den kapitalgebundenen Kosten den höchsten Anteil ein. Betriebsgebundene und sonstige Kosten sind in ihrer Höhe relativ gesehen unbedeutend.

Für die Energiepreise gibt das Statistische Bundesamt monatlich Daten zur Energiepreisentwicklung in Deutschland heraus. Die Daten für Strom und Gas, differenziert nach privaten Haushalten und Industrie, sind der folgenden **Tabelle 3** zu entnehmen.

Tabelle 3: Energiepreise Strom und Gas für private Haushalte und Industrie in der BRD⁶⁵

Jahresverbrauch	Strom [ct/kWh _{el.}]		Gas [ct/kWh _{Gas}]		Verhältnis [Strom : Gas]	
	Private Haushalte	Industrie	Private Haushalte	Industrie	Private Haushalte	Industrie
	von:					
	2.500 kWh	2.000 MWh	20 GJ	100.000 GJ		
	bis:	5.000 kWh	20.000 MWh	200 GJ	1.000.000 GJ	
2. HJ 2007	21,05	9,02	6,13	3,12	3,4	2,9
2. HJ 2008	21,95	9,57	7,62	4,09	2,9	2,3
2. HJ 2009	22,94	10,07	5,89	3,29	3,9	3,1
2. HJ 2010	24,38	10,58	5,71	3,48	4,3	3,0
2. HJ 2011	25,31	11,39	6,40	3,62	4,0	3,1
2. HJ 2012	26,76	11,69	6,48	3,49	4,1	3,3
2. HJ 2013	29,21	12,72	6,89	3,80	4,2	3,3

⁶⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung, 2014, S. 21 f. u. S. 48 f.

Strom- zu Gaspreis liegen in **Tabelle 3** für die privaten Haushalte im Verhältnis von 2,9 bis 4,3 und für die Industrie zwischen 2,3 und 3,3. In den letzten Jahren dieser Statistik besteht für beide ein hohes Verhältnis, d. h. der Strompreis ist stärker als der Gaspreis gestiegen.

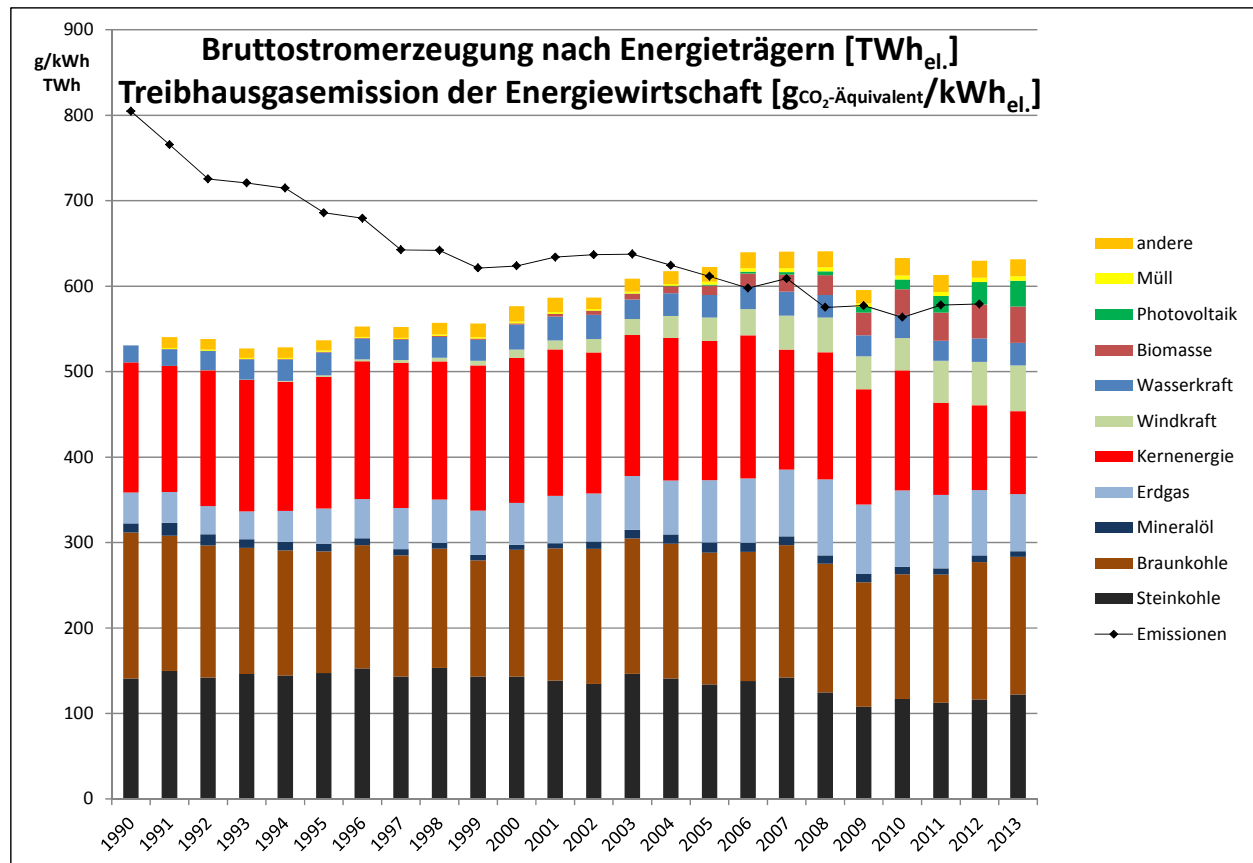


Abbildung 5: Verlauf Bruttostromerzeugung und Treibhausgasemissionen BRD⁶⁶

Abbildung 5 zeigt die Anteile der einzelnen Energieträger des in Deutschland produzierten Stroms. Im- und Exporte bleiben unberücksichtigt. Aufgezeigt sind weiterhin die Treibhausgasemissionen aus der Stromproduktion im Verhältnis zum produzierten Strom. Der Abbildung sind zwei wesentliche Aussagen zu entnehmen. Einerseits ist die Stromproduktion gegenüber den 90er-Jahren gestiegen, andererseits sind die erzeugungsbezogenen Treibhausgasemissionen seit der Jahrtausendwende nur noch geringfügig gesunken.

Die Erzeugung durch konventionelle Verbrennungskraftwerke (Kohle, Öl und Gas) schwankt nur unwesentlich zwischen 337 TWh/a und 385 TWh/a. In den 90er-Jahren sinkt der Anteil an der Gesamtstromerzeugung von 66 % (1990) auf 60 % (2000). Bis 2003 steigt der Anteil noch einmal leicht an und sinkt dann auf ca. 57 %. Bei diesem Wert (± 1 %) beharrt der Anteil bis zum Ende des Erfassungszeitraums. Der direkte

⁶⁶ Eigene Darstellung, Daten: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.), Energiedaten: Gesamtausgabe, Stand: Juni 2014, Tabelle 10 und 22.

Zusammenhang zwischen den erzeugungsbezogenen Treibhausgasemissionen und dem Anteil fossiler Kraftwerke an der Stromproduktion ist unter Berücksichtigung der Werte aus **Tabelle 1** offensichtlich und erklärt die Stagnation der erzeugungsbezogenen Treibhausgasemissionen.

Der Anteil regenerativer Energien (Photovoltaik, Biomasse, Wasser- und Windkraft) ist von 4 % im Jahr 1990 auf 24 % im Jahr 2013 gestiegen. Er deckt einerseits den gleichzeitig gestiegenen Strombedarf. Weiterhin substituiert er den seit 2011 gesunkenen Anteil der Kernkraft. Dieser gesunkene Anteil ist auf die Änderung der Atompolitik nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima zurückzuführen.

Diese Auswertungen betrachten bisher nur die Verläufe der Jahreswerte. Die Erzeugung regenerativen Stroms hängt aber von Jahreszeit und Klima, also z. B. von Sonnenstrahlung und Wind, ab. Auch die Wirkungsgrade von Dampfkraftwerken sind bei niedrigen Außentemperaturen aufgrund der besseren Rückkühlung im Winter höher als im Sommer. Dafür ist aber auch die Nachfrage von Strom und Wärme im Winter höher als im Sommer. Großklos⁶⁷ hat hierzu die jährlichen Daten des Statistischen Bundesamtes mit den monatlichen Einspeisedaten regenerativer Energieträger des European Network of Transmission System Operators for Electricity und des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. verknüpft. Während im Winter 2011 die CO₂-Emissionen mit kleiner 600 g/kWh_{el.} unter denen des Sommers lagen, ergaben diese im folgenden Winter Werte von 610 g/kWh_{el.} bis 640 g/kWh_{el.} und lagen damit über den Sommerwerten. Die Sommerwerte betrugen knapp 600 g/kWh_{el.} in beiden Jahren. Einzig der November hatte in beiden Jahren hohe Werte, mit 660 g/kWh_{el.} im Jahr 2011 sogar die Jahreshöchstwerte. Ein eindeutiger Trend ist daraus nicht abzuleiten. Lediglich der Ausblick auf 2020 deutet auf zukünftig höhere CO₂-Emissionen im Winter.⁶⁸

3.2.3 Einfluss der CO₂-Emissionswerte und Energiepreise auf eine Systementscheidung

In den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 wird deutlich, dass zum Entstehungszeitpunkt des Forschungsberichts kaum Statistiken und noch weniger Daten zu aktuellen CO₂-Emissionswerten in der Stromerzeugung verfügbar sind. Gleiches gilt für die betriebsgebundenen Kosten. Der Ansatz der dargestellten statistischen Werte führt dazu, dass die Wärmepumpe gegenüber einem Gasverbraucher i. d. R. in der ökologischen Betrachtungsweise deutlich besser beurteilt wird als in der ökonomischen. Aus **Tabelle 2** abgeleitet steht der CO₂-Ausstoß eines Gaskessels zur Stromerzeugung je

⁶⁷ Vgl. Großklos, M.; Frank, M., Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix, 2013.

⁶⁸ Vgl. ebd., S. 34.

nach Extremwertbetrachtung im Verhältnis von 1 : 2,1 bis 1 : 2,5. Dies bedeutet, dass unter ökologischen Aspekten die Wärmepumpe ab einer Leistungszahl von 2,1 bzw. 2,5 günstiger ist. Selbst der Extremwert von 660 g/kWh_{el} im November 2011⁶⁹ führt zu einer Leistungszahl von mindestens 2,6. Solche Leistungszahlen sollte jede Wärmepumpenanlage erreichen können, wie auch die Feldstudie von Fraunhofer ISE⁷⁰ mit mittleren Leistungszahlen zwischen 2,88 und 3,88 für die unterschiedlichen Wärmequellen belegt. Lediglich zwei von 18 Luftwärmepumpen werden in dieser Studie mit Jahresarbeitszahlen von kleiner 2,5 ausgewiesen. Die ökologische Betrachtungsweise wird also mit aktuellem Datenbestand dazu führen, dass die Wärmepumpe in guten Anlagen nahezu durchgängig priorisiert wird. Die Realität kann mit diesen Werten (noch) nicht abgebildet werden.

Anders sieht dies bei der ökonomischen Betrachtungsweise aus. Unter Annahme eines Kesselwirkungsgrads von 100 % kann das Strom- zu Gaspreisverhältnis als Mindestwert für die Leistungszahl bestimmt werden. Dieses beträgt im zweiten Halbjahr 2013 für Privathaushalte 4,2 und Industriekunden 3,3, vgl. **Tabelle 3**. Diese Zahlen führen gegenüber der ökologischen Betrachtung zur entgegengesetzten Entscheidung. Insbesondere für private Haushalte wären nur sechs von 56 Sole-Wärmepumpen, zwei von drei Grundwasser- und keine der 18 Luftwärmepumpen der Feldstudie von Fraunhofer ISE⁷¹ ökonomisch sinnvoll betrieben.

Die Praxis wird zwischen den beiden Fällen liegen. Verbraucher können aufgrund von Wärmepumpentarifen günstigeren Strom beziehen oder überschüssigen Eigenstrom verwenden. Ein Lastmanagement in Industrietarifen⁷² auf der Strom- wie Gasseite kann zu anderen Ergebnissen führen. Aus der Praxis sind dem Autor Anlagen bekannt, welche 2013 durch einen Wärmepumpentarif mit einem Gas- zu Strompreisverhältnis von 2,5 betrieben wurden. Die ökonomische und ökologische Betrachtungsweise sind in solchen Anlagen gleichwertig.

Abschließend ist festzustellen, dass Strom- und Gaspreis sowie die CO₂-Emissionswerte zu unterschiedlichen Reaktionen des Regelungsansatzes führen können. Jahresmittelwerte sind nur bedingt nutzbar und bilden die Realität nicht ab. Insbesondere variable Strompreise bzw. der Direktbezug durch Großkunden an der Strombörse können zu einem nennenswerten Einfluss führen. Für die ökologische Betrachtungsweise fehlt

⁶⁹ Vgl. ebd.

⁷⁰ Vgl. Miara, M. et al., Wärmepumpen Effizienz, 2011, S. 46 ff.

⁷¹ Vgl. ebd.

⁷² Gewerbe- bzw. Industriekunden zahlen i. d. R. neben dem Grund- und Arbeitspreis einen Leistungspreis. Dieser wird an der Leistungsspitze der Abnahme pro Monat oder Jahr bemessen. Hierdurch kann der Strom- bzw. Gasbezug zu Zeiten maximaler Abnahme sehr teuer werden.

zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Forschungsberichts der Zugang zum CO₂-Emissionswert der Stromerzeugung in Echtzeit. Stark schwankende Anteile von Wind- oder Solarstrom müssten aber zu schwankenden CO₂-Emissionswerten führen, welche bei den hier durchgeführten Jahres- bzw. Monatsmittelwertbetrachtungen nicht erkennbar werden. Der im Folgenden beschriebene Regelungsansatz ermöglicht aber bereits die regelungstechnische Reaktion bei solchen zukünftig vorliegenden Informationen.

3.3 Beschreibung des neuen Regelungsansatzes

Aus den in Kapitel 3.1 vorgestellten Kriterien wird im Folgenden ein Regelungsansatz vorgestellt, der den Einsatz der Wärmepumpe in bivalenten Systemen optimiert. Er soll den Grundlastgedanken dahingehend verändern, dass die Wärmepumpe gezielt eingesetzt wird, wenn deren Einsatz sinnvoll ist. Dabei wird eine Entscheidung zwischen der ökonomischen und ökologischen Betrachtungsweise offen gehalten. Er soll in betriebenen Anlagen zur Anwendung kommen und keinen Einfluss auf die Investitionsentscheidung nehmen.

3.3.1 Definition des Regelungsansatzes

Ziel des Regelungsansatzes soll sein, den Einsatz von Wärmepumpen allgemein zu optimieren. Eine sinnvolle Investitionsentscheidung ist Voraussetzung. Primärenergieverbrauch, weitere bedarfsgebundene Kosten, betriebsgebundene, sonstige und kapitalgebundene Kosten müssen hinsichtlich ihrer Relevanz diskutiert werden. Im Sinne der Deckungsbeitragsrechnung ist zu analysieren, welche Kosten bzw. Positionen variabel, also direkt laufzeitabhängig sind und welche fix anfallen.

Die kapitalgebundenen Kosten können im Regelungsansatz unberücksichtigt bleiben, weil von einer sinnvollen Investitionsentscheidung ausgegangen werden muss. Eine sinnvolle Investitionsentscheidung bedeutet eine Erzeugerwahl unter wirtschaftlichen Aspekten. Eine Berücksichtigung der kapitalgebundenen Kosten im Regelalgorithmus würde eine fehlerhafte Investitionsentscheidung auch nicht fehlerfrei machen. Viel eher würde der Erzeuger altersbedingt verschleißten, ohne dass eine ausreichende Nutzung stattgefunden hätte, da für den Erzeuger hohe Kosten angesetzt werden, welche zur Verlagerung auf den alternativen Erzeuger führen würde. Dies ist insbesondere deshalb der Fall, weil eine Investitionsentscheidung faktisch nicht bzw. nur mit erheblichen Mehrkosten rückgängig gemacht werden kann. Eine Ausnahme kann höchstens der Teil der kapitalgebundenen Kosten bilden, der direkt von den Betriebsstunden abhängig ist. Da eine sichere Zuordnung und insbesondere deren Prognose unmöglich ist, wird dieser Aspekt für einen neuen Regelungsansatz nicht berücksichtigt.

Bei den bedarfsgebundenen Kosten nimmt der Primärenergieverbrauch direkten Einfluss auf die Kosten- oder CO₂-Bilanz einer bivalenten Anlage. Die Werte sind messbar,

ein Vergleich in ökonomischer wie ökologischer Hinsicht ist möglich. Hilfsenergieverbräuche sind in der Praxis hingegen nur mit sehr hohem Aufwand detailliert zu erfassen. Viele Verbraucher können auch gar nicht direkt einem Erzeuger zugeordnet werden, so z. B. der Stromverbrauch der Regelungstechnik. Der Energieverbrauch der Verbraucher, der zuzuordnen ist, fällt i. d. R. verhältnismäßig gering aus. Lediglich der Betrieb der Umweltwärmequelle bzw. Wärmesenke (z. B. Solepumpen, Rückkühlwerke) kann energieintensiv sein. Vorhandene Messwerte sind analog dem Primärenergiebedarf der Erzeuger mit zu berücksichtigen. Anschlussgrundgebühren und andere zeitabhängige Posten haben keinen direkten Einfluss auf die Entscheidung zwischen den Erzeugern und sind daher nicht von Bedeutung. Die Berücksichtigung würde analog den kapitalgebundenen Kosten die Betriebszeit senken, ohne dass Kosten gesenkt würden. Die Kündigung eines Anschlusses hätte die Stilllegung einer Anlage zur Folge. Aus Sicht des Autors nehmen die Primärenergiekosten der Erzeuger sowie die Umweltwärmequelle bzw. Wärmesenke den wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung zwischen zwei Erzeugern. Diese beiden Aspekte müssen die Basis für eine neue Regelstrategie bilden. Förderung und Transport der Umweltenergie besitzen in der Praxis einen elektrischen Leistungsbedarf von häufig über 10 % der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe oder Kältemaschine. Er sollte daher erfasst und berücksichtigt werden. Die Erfassung kann zusammen mit der Leistungsaufnahme des Erzeugers oder bestenfalls gesondert erfolgen.

Einige betriebsgebundene Kosten fallen unabhängig vom Betrieb eines Erzeugers an. Auch diese sind unbedeutend für die Entscheidung zwischen den Erzeugern. Laufzeitabhängige Posten wie z. B. die regelmäßige Wartung hingegen haben Einfluss. Aus Sicht des Autors können diese mit berücksichtigt werden. Eine eindeutige Zuordnung wird in der Praxis oft nicht möglich sein. Während die Kosten dabei i. d. R. bekannt oder ermittelbar sind, wird dies mit Werten für die ökologische Betrachtung deutlich schwieriger sein.

Bei den sonstigen Kosten kann im Wesentlichen von unbedeutenden Positionen ausgegangen werden. Eine genauere Analyse wird hier nicht vorgenommen.

Für die Momentanbetrachtung sind also insbesondere der Primärenergieeinsatz für die Erzeuger und den Betrieb der Umweltwärmequelle bzw. Wärmesenke sowie der betriebszeitabhängige Wartungsaufwand relevant. Diese müssen mit der erzeugten Wärme- und/oder Kälteleistung ins Verhältnis gesetzt werden. Dem günstigeren Erzeuger ist der Vorzug zu geben.

Formel 6 bis **Formel 8** zeigen eine mögliche mathematische Darstellung auf.

$$V_{W_A} = \frac{P_{el,A} \cdot X_{el} + K_{fix,A}}{\dot{Q}_{th.,A}} \quad \text{Formel 6}$$

$$V_{W_B} = \frac{P_{Gas,B} \cdot X_{Gas} + K_{fix,B}}{\dot{Q}_{th.,B}} \quad \text{Formel 7}$$

$$Erzeuger = \begin{cases} A & \text{wenn } V_{W_A} < V_{W_B} \\ B & \text{wenn } V_{W_A} > V_{W_B} \end{cases} \quad \text{Formel 8}$$

Mit:

A, B	alternative Erzeuger, hier $A \triangleq$ Wärmepumpe, $B \triangleq$ Gaskessel
$el.$	elektrisch bzw. der Primärenergieträger des Erzeugers
Gas	Gas bzw. der Primärenergieträger des Erzeugers
V_W	bezogener Vergleichswert (ökonomisch oder ökologisch) Kosten bzw. CO ₂ -Ausstoß pro erzeugter Wärme- oder Kältemenge
P	Leistungsaufnahme Primärenergie
X	Primärenergie-Eigenschaftsfaktor (Preis bzw. CO ₂ -Emissionswert pro Leistung und Zeitschritt)
K_{fix}	nicht leistungsbezogene Kosten pro Zeitschritt (z. B. Wartung)
$\dot{Q}_{th.}$	genutzte thermische Leistung (heizen und/oder kühlen)

Formel 6 und **Formel 7** berechnen für den Betrachtungszeitpunkt Kosten bzw. CO₂-Ausstoß jeden Erzeugers, aus welchen in **Formel 8** der günstigere Erzeuger ausgewählt wird.

Diese Entscheidung setzt stabile Anlagenverhältnisse voraus. Laufzeiten von Wärmepumpen sollten nicht unter 20 Minuten⁷³ betragen. Mindestlaufzeiten sollen den erhöhten Verschleiß, welchen jeder Schaltvorgang verursacht, reduzieren und die Verluste im Anschaltvorgang auf eine ausreichend lange Zeitperiode verteilen. Andere Erzeugertypen (insbesondere Heizkessel) können kürzere Mindestlaufzeiten haben. Die Mindestlaufzeit verdeutlicht jedoch, dass nicht nur hydraulisch (vgl. Kapitel 2.1.1) sondern auch zu jedem Entscheidungszeitpunkt sichergestellt werden muss, dass eine erzeugerbezogene Mindestlaufzeit eingehalten werden kann. Gerade bei minimalem Abstand von V_{W_A} und V_{W_B} kann aufgrund kleiner Änderungen im System o. ä. schnell ein regelmäßiges Umschalten (Takten) entstehen, was unbedingt zu vermeiden ist. Erschwerend kommt hinzu, dass insbesondere die Leistung in Wärme- bzw. Kältemengenzählern nur mit kleinen Verzögerungen gemessen werden kann und die Aktualisierungsquote je

⁷³ Vgl. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Wärmepumpen, 2008, S. 4.

nach Zählertyp im Minutenbereich liegen kann. Einerseits ist dies dem Messverfahren der Zähler (und hier insbesondere der Volumenstrommessung) und andererseits dem Einbauort und der durch den Leitungsweg resultierenden Verzögerungen geschuldet.

Der in **Formel 6**, **Formel 7** und **Formel 8** dargestellte Vergleich zwischen den Erzeugern muss für die praktische Umsetzung daher noch um ein Verzögerungsglied erweitert werden. Dieses Verzögerungsglied könnte zeitabhängig definiert werden, d. h. eine Änderung der Priorisierung kann erst nach einer definierten Zeit stattfinden. Nachteilig an dieser Variante ist insbesondere, dass innerhalb dieser Frist das Verhältnis sehr ungünstig werden kann, ohne dass reagiert wird. Besser ist daher der Ansatz einer Hysterese. **Formel 8** muss dazu durch die folgende **Formel 9** ersetzt werden:

$$\text{Erzeuger} = \begin{cases} A & \text{wenn } Vw_A + H < Vw_B \\ B & \text{wenn } Vw_A > Vw_B + H \\ \text{sonst unverändert} & \end{cases} \quad \text{Formel 9}$$

Mit:

H Hysterese

Der hier gewählte additive Ansatz ist ebenfalls multiplikativ möglich. Die Hysterese kann, wie in **Formel 9** ausgeführt, auf beiden Seiten identisch oder unterschiedlich gewichtet angenommen werden. Sie ist ausreichend groß zu wählen, so dass anlagen-spezifisch die Mindestlaufzeit nur in Ausnahmefällen unterschritten werden muss.

3.3.2 Vorhersage und Ableitung der Anlagenzustände

Der in Kapitel 3.3.1 vorgestellte Regelungsansatz erfordert die vollständige Kenntnis der Energieströme zu den Erzeugern und innerhalb der Erzeuger.

In **Formel 6** und **Formel 7** werden je zwei betriebsabhängige Variablen und zwei Konstanten verwendet. Variabel sind die Primärenergie-Leistungsaufnahme (P) und die thermische Leistung ($\dot{Q}_{th.}$), wobei hier nur die genutzte Leistung⁷⁴ betrachtet werden darf. Konstant bzw. von „außen gegeben“ sind der Primärenergie-Eigenschaftsfaktor (X) und die nicht leistungsbezogenen Kosten (K_{fix}). Insbesondere erstere Konstante kann je nach Situation auch als Variable betrachtet werden. Sie könnte sich innerhalb kurzer Zeit ändern, wenn ein anderer Strom-Mix im Netz verfügbar ist oder z. B. Photovoltaikstrom des Objekts durch Sonnenstrahlungsänderung in verändertem Umfang zur Verfügung steht. Während die beiden Konstanten X und K_{fix} aber zum Entscheidungspunkt im Wert bekannt sind, können die Variablen nicht direkt gemessen werden. Da es nicht

⁷⁴ Die Wärmepumpe erzeugt immer Wärme und Kälte gleichzeitig, jedoch kann diese nicht immer gleichzeitig genutzt werden. Für die Betrachtung ist nur die thermische Leistung gemeint, welche im Objekt (inkl. Speicherladung) eingesetzt wird. Entzieht die Wärmepumpe z. B. dem Erdreich Energie, um das Objekt zu heizen, so ist nur die Heizleistung von Bedeutung. Die Kälteleistung ist in dem Fall für das Objekt irrelevant, da diese ins Erdreich abgeführt wird.

möglich bzw. sinnvoll ist, durch kurzen Betrieb eines Erzeugers die Variablen für alle Erzeuger zu bestimmen, müssen diese auf anderem Wege hergeleitet werden. Hierfür können Kennlinien der Erzeuger eingesetzt werden.

Wie bereits u. a. in Kapitel 2 erwähnt, sind die Leistungszahl und damit Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe einer Wärmepumpe stark von den Temperaturverhältnissen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke abhängig. Aber auch Wirkungsgrade und Leistung anderer Erzeuger sind mehr oder weniger vom Systemzustand abhängig. Zur Anwendung der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Formeln müssen die beiden Variablen P und $\dot{Q}_{th}$ je Erzeuger möglichst genau prognostiziert werden können. Dafür müssen die Temperaturen und je nach System auch die Volumenströme bekannt sein bzw. vorhergesagt werden können. Da die Vorlauftemperatur eine Reaktion auf den Anlagenbetrieb ist, wird hier im Weiteren nur noch die Rücklauftemperatur betrachtet. Diese sollte aus dem System abgeleitet werden können, entweder aus Speichertemperaturen oder den (i. d. R. recht trägen) Rücklauftemperaturen der Verbraucher. Soletemperaturen können z. B. bei vorangehender gleicher Belastung gespeichert und mit gleichem Wert angenommen werden, da hier zumindest in kleinen Zeitintervallen keine nachhaltigen und nennenswerten Änderungen zu erwarten sind. Je nach Erzeugertyp kann zusätzlich noch eine Leistungsregelung z. B. über eine Solltemperaturvorgabe erfolgen. Die Anforderung sollte zum Entscheidungspunkt bekannt sein.

Kennlinien von Erzeugern können auf zwei ähnlichen Wegen mit Unterschieden in Aufwand, Genauigkeit und Übertragbarkeit erstellt werden. Der einfachste Weg ist die Verwendung der Leistungsdaten der Erzeuger aus Herstellerangaben. Aufwendiger, kostenträchtiger aber realitätsnäher ist die messtechnische Erfassung in der betrachteten Anlage selbst und deren Auswertung.

Gerade bei großen Serien kleiner Wärmepumpen lohnen umfangreiche, genaue Messungen im Versuchsstand. Dieses Verfahren unterliegt in der Genauigkeit verschiedenen Einflüssen. Da die Versuchsstanddaten oft nur für einen Anlagentyp bestimmt werden, bleiben maschinenspezifische Abweichungen unerkannt. Auch Änderungen durch alterungsbedingten Verschleiß finden keine Berücksichtigung. Abweichungen in der Temperaturmessung oder Montagefehler führen zu Abweichungen von den Kennlinien. Der Einsatz der Herstellerkennlinien scheint zwar recht einfach, birgt aber gerade bei großen Anlagen hohe Unsicherheiten. Kälte- oder Schmiermittelfdefizite führen zu anderen Leistungswerten einer Wärmepumpe oder Kältemaschine. Abweichende Volumenströme durch Fehlplanung oder sich zusetzende Schmutzfänger verändern die Temperaturverhältnisse. Daher ist es gerade bei größeren Anlagen aus Sicht des Autors empfehlenswert, die erforderlichen Daten in der betrachteten Anlage zu erfassen. Messgeräte zur Erfassung der thermischen Leistung (Wärme- bzw. Kältemengenzähler) sowie des Primärenergieverbrauchs können dann nicht nur für die Anwendung eines

solchen Regelungsansatzes helfen, sondern auch im Rahmen eines Anlagenmonitorings zur Betriebsüberwachung bzw. Anlagenoptimierung eingesetzt werden. Dafür müssen für jeden Erzeuger die Primärenergieverbräuche und die erzeugten thermischen Nutzleistungen einzeln erfasst werden. Verbräuche für den Betrieb der Umweltwärmequellen und Wärmesenken sollten bei höherer Leistung möglichst gesondert erfasst werden, damit eine direkte Zuordnung zu den unterschiedlichen Betriebsfällen erfolgen kann. Aus den erfassten Messdaten der Erzeuger können durch statistische Auswertung (z. B. Regression) die Kennlinien der Erzeuger (ggf. mehrere für unterschiedliche Betriebsarten) errechnet werden. Dies kann entweder einmalig für die Anlage in einer externen Auswertung oder im laufenden Betrieb, automatisiert fortgeschrieben, erfolgen. Für diesen Forschungsbericht wird im Wesentlichen von einer statischen Auswertung ausgegangen. Die automatisierte Fortschreibung wird in Kapitel 7.2.1 noch kurz beschrieben und bewertet.

3.4 Anforderungen an Erzeugungsanlagen zur Umsetzung des neuen Regelungsansatzes

An einigen Stellen dieses Forschungsberichts wurden schon Anforderungen an Erzeugungsanlagen zur Umsetzung des hier vorgestellten Regelungsansatzes erwähnt. Wesentliche Voraussetzung ist ein stabiler Wärmepumpenbetrieb, welcher in Wärmepumpenanlagen nur durch eine Einregulierungsphase erzielt werden kann. Die Umsetzung in der Gebäudeleittechnik bzw. Regelungstechnik der Erzeugungsanlage erfordert Algorithmen und entsprechende Hardware, die über das übliche hinausgehen. Das Wesentliche ist aber die messtechnische Erfassung der betriebsrelevanten Parameter. Diese sind in Messtechnik zur Beurteilung bzw. Auswertung der einzelnen Erzeuger und in Messtechnik zur Bestimmung von Systemzuständen an relevanten Punkten zu unterscheiden.

Die notwendigen Systemzustände können i. d. R. aus der GLT übernommen werden. Im Wesentlichen sind Temperaturen an verschiedenen Orten zu bestimmen, wofür keine gesonderten Fühler erforderlich sind. Hierzu zählen z. B. Rücklauftemperaturen der Verbraucher, ggf. Speichertemperaturen, die Außenlufttemperatur und Rücklauftemperatur der Sole.

Für die gängigen Erzeuger Kessel, Wärmepumpe und Kältemaschine ist in **Abbildung 6**, **Abbildung 7** und **Abbildung 8** je ein empfehlenswertes Messkonzept dargestellt. Die Darstellung der Erzeuger ist symbolisch zu verstehen. Insbesondere die Wärmepumpe kann eine unterschiedliche Zahl von Komponenten beinhalten. Wichtig ist, für jeden Erzeuger den Primärenergieaufwand und die Nutzenergieabgabe (getrennt für verschiedene Nutzungsarten wie Heizen, Kühlen oder Trinkwassererwärmung) inkl. dessen Temperaturen zu erfassen. Der Primärenergieaufwand beinhaltet auch den

möglichst getrennt zu erfassenden Stromverbrauch sämtlicher Verbraucher für die Erdwärmequelle bzw. Wärmesenke (vgl. auch Kapitel 3.3.1). Hierzu zählen z. B. die Außeneinheiten von Luftwärmepumpen, Umwälz-, und Grundwasserpumpen. Weiterhin müssen mindestens die Temperaturen der Erdwärmequelle bzw. Wärmesenke gemessen werden.

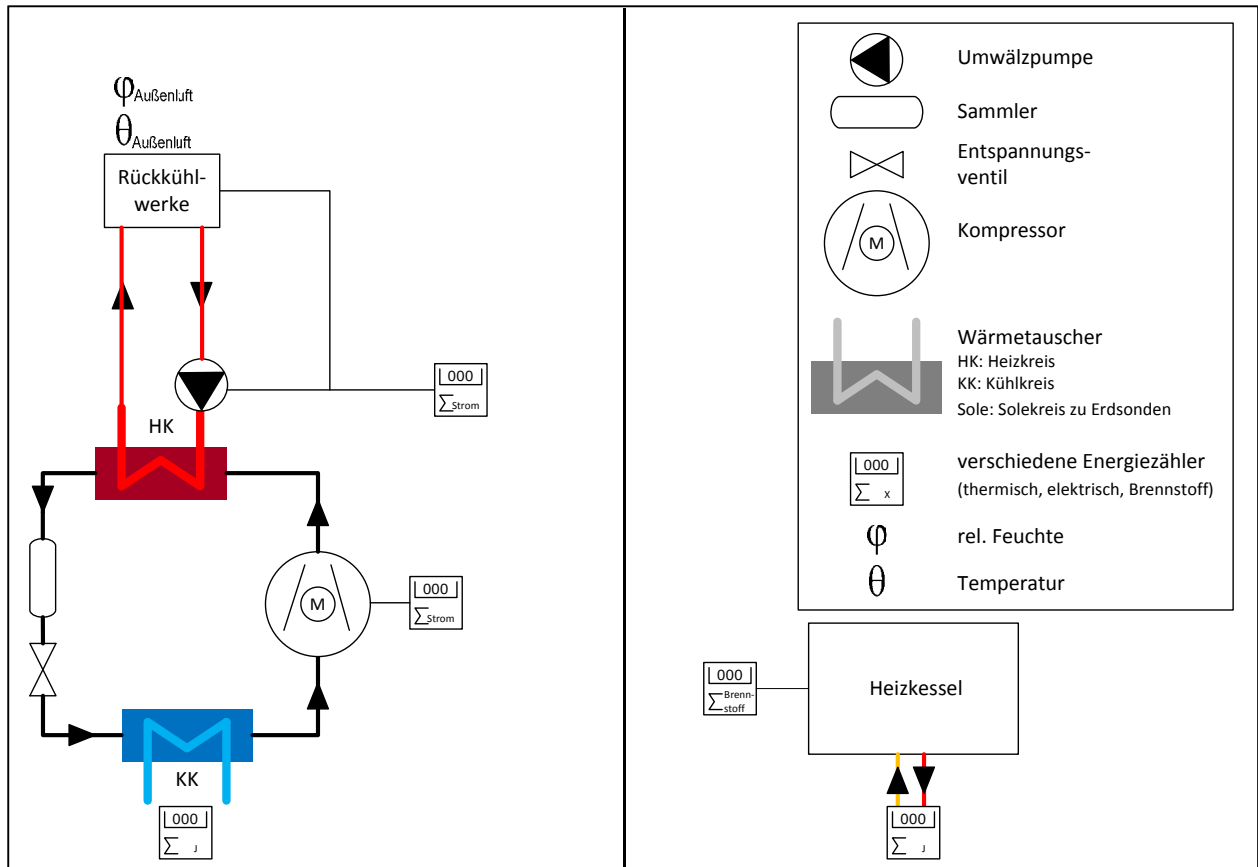


Abbildung 6: Messkonzept für Kältemaschine

Abbildung 7: Messkonzept für Heizkessel allg.

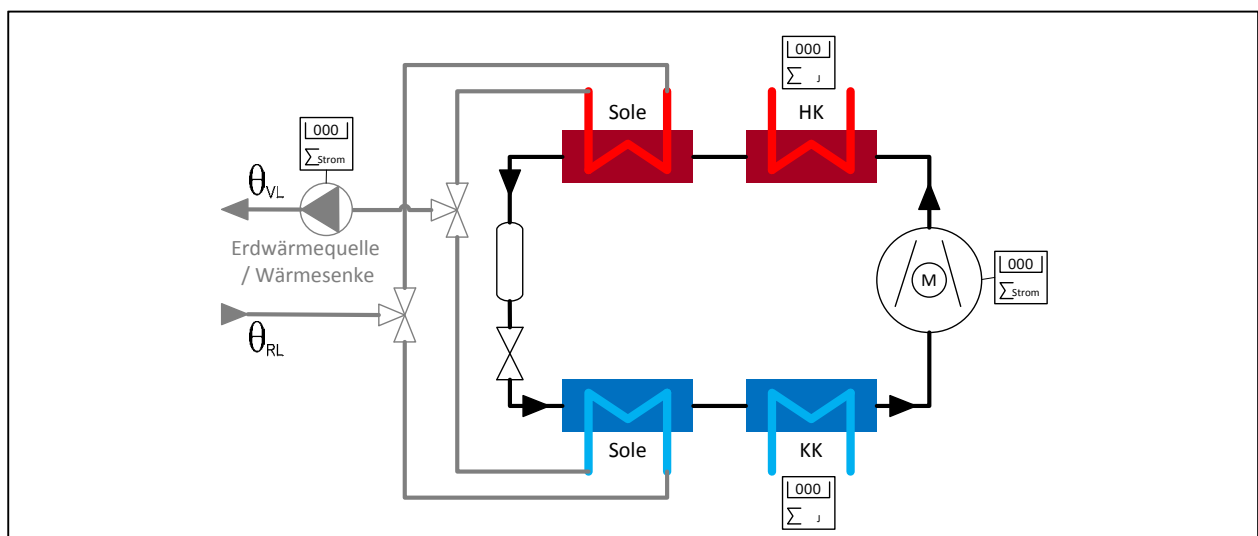


Abbildung 8: Messkonzept für Wärmepumpe

Die Messtechnik ist so auszulegen, dass bei einem festzulegenden Abfrageintervall akzeptable Werte ausgelesen werden können. Der Autor hat hierzu gute Erfahrung mit einer Auslesung im Minutentakt gemacht. Wichtig ist, dass das Intervall so kurz ist, dass wesentliche Zustandsänderungen im System hinreichend genau erkannt und erfasst werden können. Primärenergieverbräuche und erzeugte Wärme- bzw. Kältemengen müssen zwischen jedem Zählersprung und Auslesepunkt eindeutig zueinander gehören und einem Systemzustand zuzuordnen sein.

Die eingesetzten Zähler müssen technisch für die regelmäßige Auslesung geeignet sein. Alle dem Autor bekannten Wärme- und Kältemengenzähler erfordern hierfür einen Anschluss an das Stromnetz. Insbesondere Volumenströme, aber auch elektrischer Strom, werden oft nicht kontinuierlich erfasst. Pro Mengeneinheit wird dann ein Impuls an das Rechenwerk übertragen. Eine hohe Impulswertigkeit (genaue Auflösung) ist erforderlich, damit auch zwischen jeder Auslesung der veränderliche Volumenstrom bzw. der Stromfluss erfasst werden kann.

4 Vorstellung des Simulationsmodells in der Basisvariante A

In Kapitel 3 wurde ein Regelungsansatz vorgestellt. Der bisher theoretische Regelungsansatz soll hinsichtlich Aufwand und Nutzen beurteilt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird der Regelungsansatz rechnerisch ausgewertet. Die praktische Erprobung bleibt offen, da eine Umsetzung in den im Forschungsvorhaben bearbeiteten Anlagen aus verschiedenen betriebstechnischen Gründen nicht möglich war.

Für die rechnerische Betrachtung ist ein Simulationsmodell heranzuziehen. Dieses muss den Aufbau einer Erzeugungsanlage, dessen Regelung (Ablauf) und einen Lastgang für Wärme- und Kälteverbrauch beinhalten. Aufbau- und Ablaufstruktur müssen aufeinander abgestimmt sein und der Lastgang muss dazu passen. Das Simulationsmodell muss Schlussfolgerungen für die Praxis zulassen. Bei Verwendung von gemessenen realen Betriebsdaten eines Objekts muss eine Anonymisierung vorgenommen werden, um direkte Rückschlüsse auf die Qualität der Anlagen oder Anlagenkomponenten auszuschließen.

Für das Forschungsvorhaben kann unter anderem auf Daten der folgend dargestellten Realanlage zurückgegriffen werden. Das der Anlage zugrunde liegende Gebäude ist dem Dienstleistungsbereich mit einer sehr heterogenen Verbraucherstruktur zuzuordnen. Die folgende **Abbildung 9** zeigt den vereinfachten Aufbau der Erzeugungsanlage. Sie berücksichtigt nur den für die weitere Betrachtung relevanten Teil der Erzeugungsanlage. Wärme- und Kälteerzeugung erfolgen in der betrachteten Erzeugungsanlage durch eine sogenannte reversible Wärmepumpe (d. h. mit Heiz- und Kühlmöglichkeit) und je einen konventionellen Erzeuger, einen Brennwertkessel (BWK) und eine Kompressionskältemaschine (KM). Die Erzeuger speisen parallel in je eine hydraulische Weiche für Wärme und für Kälte, von welchen die Verbraucher versorgt werden.

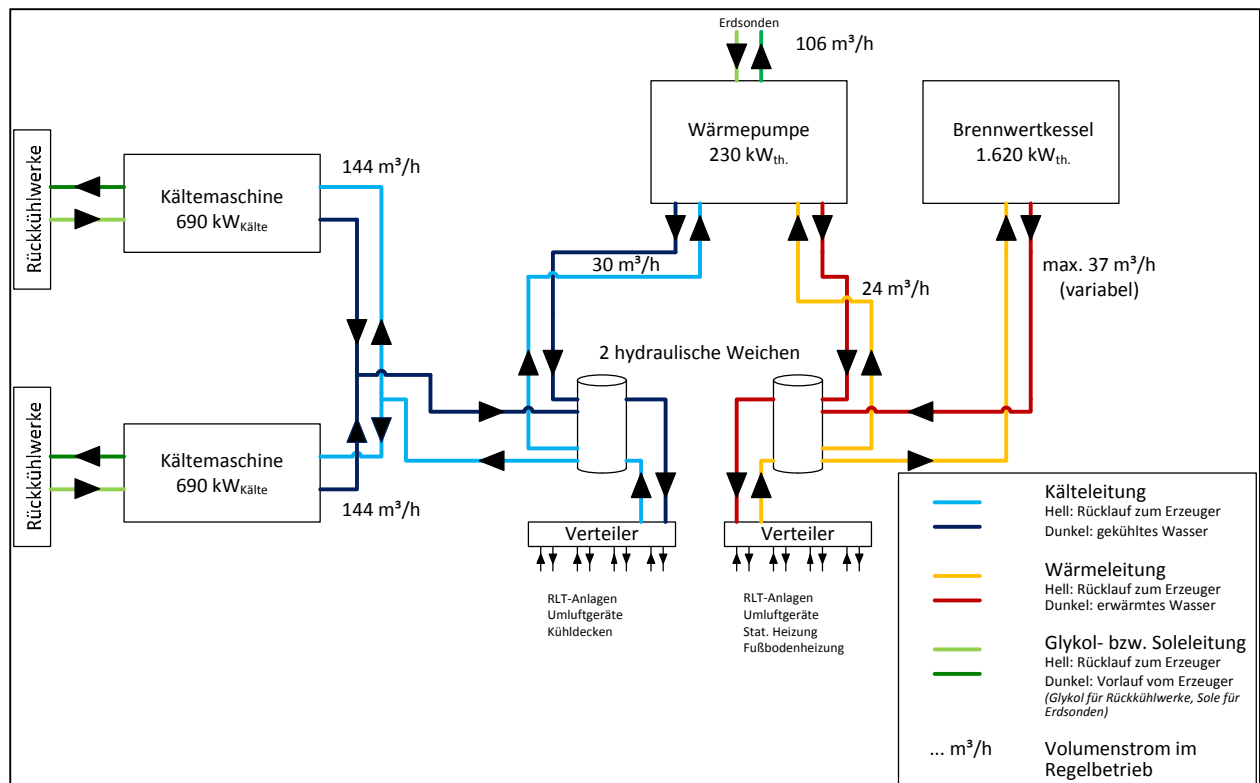


Abbildung 9: Erzeugungsanlage einer Realanlage inkl. Leistungs- und Volumenstromangaben (Anlagenschema)

Den diesen Teil der Erzeugungsanlage betreffenden Lastgang und der zugehörige Temperaturverlauf können aus Realdaten bestimmt werden. Lastgang und Temperaturverlauf liegen den Auswertungen für die Zeit vom 01.05.2010 bis 12.05.2013 zugrunde. Dieser Zeitraum entspricht dem Simulations- und Betrachtungszeitraum. Die folgende **Tabelle 4** zeigt die Spitzenleistungen und Energiemengen auf.

Tabelle 4: Lastgang, Übersicht Spitzenleistungen für den Heiz- und Kühlfall sowie Wärme- und Kälteenergiemengen im Betrachtungszeitraum

	Spitzenleistung			Gesamte Energiemenge (01.05.2010 - 12.05.2013)
	24 h-Mittelwert	3 h-Mittelwert	1 h-Mittelwert	
Heizen	1.280 kW	1.416 kW	1.453 kW	7.833 MWh
Kühlen	870 kW	1.120 kW	1.136 kW	4.246 MWh

Die folgende **Tabelle 5** stellt die durchschnittlichen Temperaturen im Vorlauf (VL) zu den Verbrauchern und die resultierenden Temperaturen im Rücklauf (RL) dar. Ebenso sind für den Heizfall die maximalen und für den Kühlfall die minimalen Tagesmittelwerte ausgewiesen.

Tabelle 5: Lastgang, Durchschnittstemperaturen und Extremwerte (Tagesmittelwert) im Betrachtungszeitraum

	Durchschnitt (Betrachtungszeitraum)		Extremwerte (Tagesmittelwert)	
	VL-Temperatur	RL-Temperatur	VL-Temperatur	RL-Temperatur
Heizen	41,6 °C	38,6 °C	61,1 °C	53,4 °C
Kühlen	15,0 °C	17,7 °C	13,6 °C	15,4 °C

Lastgang und Temperaturverlauf liegen in einer 15-minütigen Auflösung vor. Diese werden in Kapitel 4.4 genauer beschrieben und dargestellt.

Um auf Basis dieser Erzeugungsanlage Untersuchungen mit der neuen Regelstrategie vornehmen zu können, ist ein Simulationsmodell erstellt worden. Die Aufbaustruktur ist **Abbildung 10** zu entnehmen. Wärme- und Kälteerzeugung erfolgen analog zur Realanlage durch je ein Wärmepumpen-, Brennwertkessel- und Kältemaschinenmodul. Die Funktion der reversiblen Wärmepumpe (WP) wird im Wärmepumpenmodul aus Gründen der Modulverfügbarkeit auf drei konventionelle Wärmepumpenmodule verteilt. Eines kann heizen (WP-H), eines kühlen (WP-K) und eines beides simultan (WP-S). Ein gleichzeitiger Betrieb wird dabei regelungstechnisch ausgeschlossen. Die Erzeugermodule speisen parallel in je eine hydraulische Weiche (im Weiteren vereinfacht Speichermodul genannt) für Wärme und Kälte zu je 4 m³, von denen die Verbraucher versorgt werden, ein. Die Speichermodule werden mit dem jeweiligen Verbrauch (Lastgang) belastet. Verluste z. B. über die Hüllfläche sind ausgeschlossen.⁷⁵ Je ein PI-Regler (Regler mit proportionalem und integralem Anteil) vergleicht die Austrittstemperatur aus den Speichermodulen mit den im Lastgang gegebenen Soll-Vorlauftemperaturen und schaltet in Abhängigkeit des Reglerwertes die Erzeugermodule zu bzw. ab. Eine Regelungsvariante nutzt das Wärmepumpenmodul als Grundlastmaschine. Zwei weitere Regelungsvarianten agieren auf Basis des in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Regelungsansatzes. Sie treffen eine ökonomische (im Weiteren auch monetär genannt) bzw. ökologische Auswahl. Per Parameter kann eine der drei Regelungsvarianten festgelegt werden. Als Simulationsumgebung wird die Software IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) in der Version 4.6 verwendet. IDA ICE stammt von der schwedischen Firma EQUA Simulation AB. Das Modell ist im Advanced Level erstellt.

⁷⁵ Die Messwerte der Realanlage enthalten Wärme- bzw. Kälteverluste des Erzeugungs- wie Verteilsystems. Daher müssen Systemverluste im gesamten Simulationsmodell unberücksichtigt bleiben. Unter dieser Annahme werden die realen Verluste in allen Simulationen unter Vernachlässigung unterschiedlicher Systemzustände einheitlich berücksichtigt.

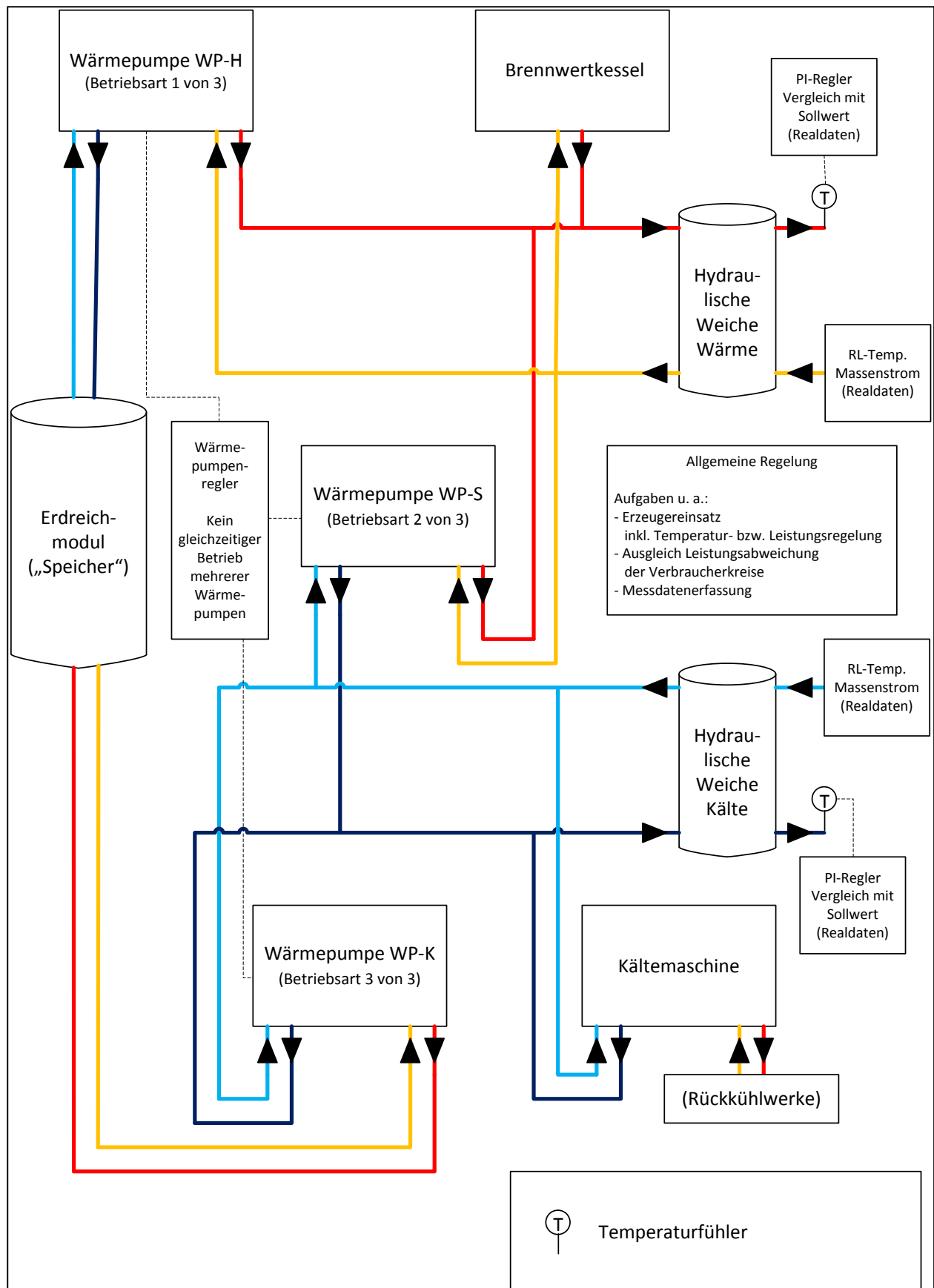


Abbildung 10: Aufbaustruktur des Simulationsmodells

Das in **Abbildung 10** abgebildete Simulationsmodell wird in den folgenden Unterkapiteln in der Aufbau- und Ablaufstruktur mit den Attributen in der Basisvariante noch detaillierter vorgestellt. In Kapitel 4.1 werden zunächst die Erzeugermodule mit ihren Leistungsdaten genauer erläutert. Es folgen die Ablaufstruktur (Kapitel 4.2), das Erdreichmodul (Kapitel 4.3) und der Lastgang (Kapitel 4.4). Verschiedene Attribute beeinflussen die Simulationsergebnisse und haben insbesondere Einfluss auf den Vergleich der Regelungsvarianten.

Das in **Abbildung 10** abgebildete Simulationsmodell ist im Vorfeld durch den Autor validiert worden. Dazu wurde es mit den Kennlinien der realen Erzeuger attribuiert ausgewertet. Dieses Simulationsmodell der Realanlage (Ausgangsmodell) zeigt eine weitgehende Übereinstimmung des Verhaltens mit der realen Erzeugungsanlage. Die in den Lastgängen geforderten Temperaturen (Temp.) werden gut eingehalten. In der Simulation besteht im Mittel eine Abweichung zu den Messwerten von 0,3 K, d. h. die Vorlauftemperatur ist etwas höher als gefordert. Auf der Kälteseite beträgt diese im Mittel -0,04 K. Auch die Verteilung auf die Erzeuger kann gut nachgebildet werden. Für die Wärmeerzeugung liegt die Abweichung der Gesamterzeugung an Heizenergie bei 0,25 %. Das Wärmepumpenmodul heizt 0,41 % zu viel, das Brennwertkesselmodul entsprechend 0,17 % zu wenig. Auf der Kälteseite werden etwa 3,4 % mehr Kälte als im gemessenen Lastgang berechnet, ein Großteil davon durch das Kältemaschinenmodul. Die Werte bilden Mittelwerte über den gesamten Betrachtungszeitraum von gut drei Jahren. Phasenweise bestehen höhere Abweichungen, welche über den gesamten Betrachtungszeitraum ausgeglichen werden. In den ersten zehn Betrachtungsmonaten erzeugt z. B. das Wärmepumpenmodul 7 % mehr Wärme als die Wärmepumpe der Realanlage. Im weiteren Verlauf wird dies wieder kompensiert. Auf die Gesamtenergiekosten und CO₂-Emissionen haben die Verschiebungen vernachlässigbaren Einfluss.⁷⁶

Die hier verwendete Basisvariante stimmt in fast allen Parametern mit dem validierten Ausgangsmodell überein. Zwecks Anonymisierung werden aber insbesondere die Kennlinien des Wärmepumpenmoduls ersetzt. Hieraus resultieren um 0,8 % höhere CO₂-Emissionen und um 1,2 % höhere Energiekosten auf der Heizseite. Auf der Kälteseite liegt die Abweichung mit 9,1 % deutlich höher. Aufgrund der schwerpunktmäßigen Auswertung für die Wärmeseite führen diese Abweichungen zu keiner Beeinträchtigung der Aussagekraft. Die Kälteseite dient im Wesentlichen der Berücksichtigung des Simultanbetriebs und des Einflusses auf das Erdreichmodul. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind in ihrer Größenordnung trotz der Änderungen für die Realanlagen realistisch.⁷⁷

⁷⁶ Form, G., Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien, 2013, S. 48 f.

⁷⁷ Ebd., S. 56 f.

In Kapitel 4.5 wird das Simulationsmodell noch mit seinen Variablen aufgelöst, welche zwischen den Modulen übergeben werden. Es werden weiterhin die Attribute untersucht und Parameter definiert, welche das Simulationsmodell hinsichtlich der Wirkung der zu untersuchenden Regelstrategie beeinflussen. Das Kapitel schließt mit einer Auswertung der Wirkung des Regelungsansatzes in der Basisvariante. Untersucht werden die CO₂-Emissionen und Energiekosten sowie deren Änderungen durch eine ökonomisch bzw. ökologisch optimierte Regelung in Kapitel 4.6.

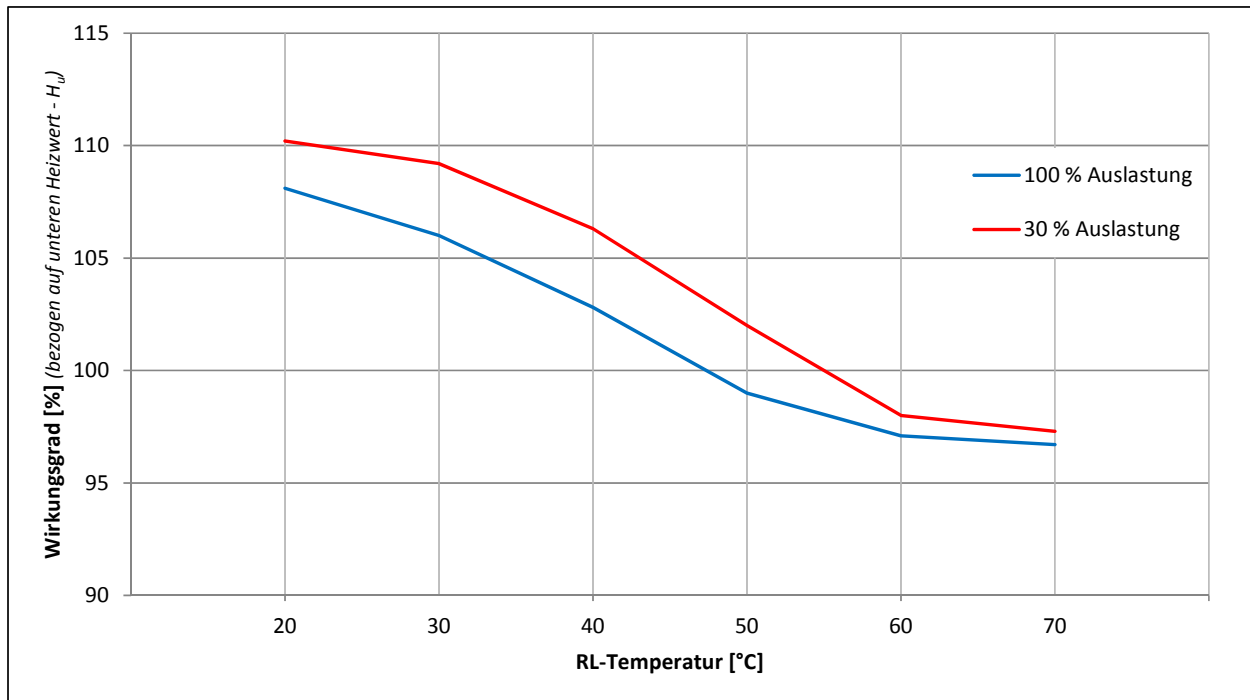
Ausgehend von der Realanlage sind Energiepreise von 0,031 €/kWh_{Gas} und 0,112 €/kWh_{el} anzunehmen. Der Strompreis stimmt im Betrachtungszeitraum mit den mittleren Werten des Statistischen Bundesamtes für Industriekunden (vgl. **Tabelle 3**) überein. Der Gaspreis liegt im Realobjekt aufgrund günstiger Verträge etwa 15 % unter den Werten genannter Quelle. Für Strom ist weiterhin von einem CO₂-Emissionswert in Höhe 562 g/kWh_{el} auszugehen, vgl. Kapitel 3.2.1. Für den Gaskessel wird ein CO₂-Emissionswert von 251 g/kWh_{Gas}, also dem günstigsten Wert der **Tabelle 2**, angenommen.

4.1 Modellelemente der Wärme- und Kälteerzeugung

Die Simulationsumgebung IDA ICE bietet eine Modulbibliothek mit vielen verschiedenen Modellelementen. Das Simulationsmodell ist aus mehreren Modellelementen (auch Modul genannt) der Modulbibliothek zusammengestellt. Die Erzeugermodule des in **Abbildung 10** dargestellten Simulationsmodells sollen hier mit ihren Attributen vorgestellt werden. Zwei Erzeugermodule zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung kommen zum Einsatz, ein einfaches Gaskesselmodul, erweitert um den Brennwerteffekt, und ein Kompressionsmaschinenmodul sowohl für die Wärmepumpe wie auch Kältemaschine.

4.1.1 Brennwertkesselmodul

Im Simulationsmodell wird entsprechend der Realanlage mit einem Brennwertkesselmodul (BWK) gerechnet. Aus Gründen der Verfügbarkeit in der Modulbibliothek wird ein einfaches Kesselmodul verwendet. Zusätzlich findet eine Vorerwärmung des Rücklaufvolumenstroms zum Kesselmodul statt. Dies soll den Latentwärmeentzug eines Brennwertkessels aus dem Abgasstrom berücksichtigen. Die Vorerwärmung erfolgt in Abhängigkeit der Kesselauslastung. Das so aufgebaute Brennwertkesselmodul wird mit den in folgender **Abbildung 11** leistungs- und temperaturabhängigen Kesselwirkungsgraden attribuiert.

Abbildung 11: Wirkungsgrade Brennwertkesselmodul⁷⁸

In den Kennlinien der **Abbildung 11** ist erkennbar, dass der Brennwertkessel bei sinkender Auslastung höhere Wirkungsgrade erbringt. Verlauf und Größenordnung dieser Wirkungsgrade charakterisieren jeden Brennwertkessel.⁷⁹

Im Simulationsmodell wird das Kesselmodul mit $1.500 \text{ kW}_{\text{th}}$ sowie vorgeschaltetem Brennwertprozess berücksichtigt. Das simulierte Brennwertkesselmodul (Kesselmodul inkl. Brennwertprozess) erreicht je nach Rücklauftemperatur eine Leistung von ca. $1.620 \text{ kW}_{\text{th}}$. Dies entspricht der Realanlage. Für den Lastgang, welcher eine Spitzenleistung von $1450 \text{ kW}_{\text{th}}$ aufweist, vgl. **Tabelle 4**, bestehen damit bei monovalenter Erzeugung ausreichend Leistungsreserven. Auch der maximale Volumenstrom entspricht mit $37 \text{ m}^3/\text{h}$ dem der Realanlage.

Zwischen der Teillast- und Volllastkurve der **Abbildung 11** werden die Wirkungsgrade bei gleicher Rücklauftemperatur linear interpoliert. Der Bereich unterhalb von 30 % Auslastung wird mit den Werten der 30 %-Auslastung gerechnet. Der Definitionsbereich der Kurven bildet das Anwendungsspektrum ausreichend ab. Rücklauftemperaturen unter 20 °C und über 70 °C sind weder in den Realdaten noch den Ergebnisdaten der Simulation zu finden.

Die Leistung des Brennwertkesselmoduls muss geregelt werden, weil die volle Leistung zu keinem stabilen (und realistischen) Anlagenverhalten führen würde. Mit steigendem Wert des PI-Regler wird dafür zunächst der Volumenstrom gesteigert, während die

⁷⁸ Wirkungsgrade eines deutschen Kesselherstellers für Brennwertkessel der hier verwendeten Leistungsklasse.

⁷⁹ Vgl. Pistohl, W., Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009, S. H152.

Soll-Vorlauftemperatur der leicht erhöhten Soll-Temperatur aus den Realdaten entspricht. Sollte die Systemtemperatur nicht erreicht werden und der PI-Regler weiter steigen, so wird die Vorlauftemperatur des Brennwertkesselmoduls gegenüber der Soll-Temperatur bis zur Leistungsgrenze erhöht.

Kennlinien und Leistungsregelung werden in den Auswertungen nicht variiert. Der Einfluss einer um wenige Prozentpunkte verschobenen Kennlinie wäre im Vergleich zum Wärmepumpenmodul nur gering. Bedeutende Wirkungsgradsteigerungen sind schon aus physikalischen Gründen für Gasbrennwertkessel nicht möglich, wieso auch in der Praxis nur geringe Unterschiede zwischen unterschiedlichen Brennwertkesseln bestehen.⁸⁰

4.1.2 Wärmepumpenmodul

Im Simulationsmodell wird ein einstufiges Wärmepumpenmodul (WP) verwendet, da Teilleistungen hier keine nennenswerte Bedeutung haben. Die drei Betriebsarten der reversiblen Wärmepumpe in **Abbildung 10** müssen auf drei einfache Wärmepumpenmodule verteilt werden, weil in der Modulbibliothek kein adäquates Wärmepumpenmodul verfügbar ist. Wie bereits beschrieben, kann je ein Wärmepumpenmodul gegen Erdreich heizen bzw. kühlen, ein drittes ist für den simultanen Heiz- und Kühlbetrieb zuständig. Regelungstechnisch wird ein gleichzeitiger Betrieb mehrerer Wärmepumpenmodule ausgeschlossen, so dass stets nur eines der drei Wärmepumpenmodule in Betrieb ist.

Die Bezeichnung Wärmepumpenmodul ohne weitere Ergänzung meint in diesem Forschungsbericht immer das Modellelement, welches die gesamte Wärmepumpe abbildet. Es kann gegen das Erdreichmodul heizen bzw. kühlen oder beides simultanen ohne Nutzung des Erdreichmoduls. Das Wärmepumpenmodul WP-H ist das untergeordnete Modellelement, welches gegen das Erdreichmodul heizt. Wärmepumpenmodul WP-K bildet nur die Betriebsart Kühlen gegen das Erdreichmodul ab. Das untergeordnete Wärmepumpenmodul WP-S übernimmt den simultanen Heiz- und Kühlbetrieb.

Das verwendete Wärmepumpenmodul⁸¹ (Kennlinienmodul) berechnet seine Wärme- und Kälteleistung in Abhängigkeit der auf beiden Seiten herrschenden Volumenströme und Rücklauftemperaturen. Die Volumenströme im Simulationsmodell stimmen mit den Angaben in **Abbildung 9** überein. Wasserseitig (HK wie KK) sind Temperaturspreizungen zwischen 5 K und 10 K je nach Betriebszustand zu erwarten. Soleseitig entstehen deutlich kleinere Temperaturspreizungen.

⁸⁰ Vgl. Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2013, S. 604.

⁸¹ Das Modell wird detailliert beschrieben in: Kropf, S., PV/T-Schiefer, 2003, S. 43 ff.

Das Kennlinienmodul wird mit insgesamt vier Kennlinien, definiert über je sechs Stützpunkte, attribuiert. Zwei Kennlinien beschreiben die Wärmeleistung, zwei die elektrische Leistungsaufnahme, alle in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur auf der kalten Seite (Verdampfer). Die beiden Kennlinien beschreiben unterschiedliche Rücklauftemperaturen auf der warmen Seite (Kondensator). Das Kennlinienmodul interpoliert linear zwischen zwei Stützpunkten und den beiden Kennlinien. Außerhalb des Definitionsbereichs der Kennlinien findet eine Extrapolation statt. **Abbildung 12** zeigt die Kennlinien einer Wärmepumpe. Die den Kennlinien zugrundeliegenden Stützpunkte sind **Tabelle 6** zu entnehmen. Je zwei nebeneinanderliegende Stützpunkte werden linear verbunden.

Das Kennlinienmodul berechnet zunächst für eine vorliegende Verdampfertemperatur die thermische und elektrische Leistung für die beiden definierten Kondensatortemperaturen (in **Abbildung 12** betragen diese 25 °C und 45 °C). Sofern kein Stützpunkt für den Wert existiert, wird dieser linear zwischen dem nächst höheren und niedrigeren interpoliert. Werte außerhalb des Stützpunktbereichs werden durch lineare Extrapolation der beiden letzten verfügbaren Werte berechnet. Für die vorliegende Verdampfertemperatur existieren dann thermische und elektrische Leistung in Abhängigkeit von zwei Kondensatortemperaturen. Zwischen diesen beiden wird sodann jeweils für die vorliegende Kondensatortemperatur die thermische bzw. elektrische Leistung durch Inter- oder Extrapolation bestimmt. Anfahrverlusten werden durch Reduktion der Wärmeleistung ungefähr in den ersten drei Minuten berücksichtigt.

Ein Betrieb des Wärmepumpenmoduls außerhalb des Definitionsbereichs der Kennlinien bzw. der maschinentechnischen Grenzen wird durch Temperaturbegrenzungen verhindert. Grenzwerte für den Heiz- und Kühlkreis bzw. die Sole werden in Kapitel 4.2 noch detailliert erläutert.

Im Folgenden werden die Kennlinien⁸² der hier WP-I genannten Wärmepumpe genauer erläutert. Die beiden ausgewählten Kondensatortemperaturen sind als Beispiel zu verstehen. Der Temperaturbereich der Kälte-Rücklauftemperaturen (Verdampfer) stellt einen Ausschnitt der Herstellerangaben dar. Die Extrapolation der im Folgenden dargestellten Kennlinien ist daher abgesichert möglich. In den Wärmepumpenmodulen WP-H und WP-K werden für die Leistungsaufnahme von Solepumpen 3 kW_{el.} ($\hat{=}$ rund 10 % der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe) angenommen. Ansonsten werden die Kennlinien für die drei Wärmepumpenmodule WP-H, WP-K und WP-S gleich angesetzt. **Abbildung 12** zeigt die elektrische (el.) und thermische (th.) Leistung der drei Wärmepumpenmodule. Die Kälteleistung ist durch deren Differenz bestimmt und nicht

⁸² Die verwendeten Kennlinien stammen von einem deutschen Wärmepumpenhersteller. Um die erforderliche Leistung zu erzielen, wird der Einsatz zweier gleicher Wärmepumpen angenommen. Die abgebildeten Kennlinien berücksichtigen dies. Die so angenommene Wärmepumpe wird hier WP-I genannt.

abgebildet. Die Werte der Abszisse bilden für Wärmepumpenmodul WP-H die Rücklauf-temperatur der Sole ab. Für die Wärmepumpenmodule WP-K und WP-S stellt diese die Rücklauf-temperatur aus dem Kühlkreis dar. Die jeweils zwei Linien stellen die unterschiedlichen Temperaturen im Heizkreis dar, wobei dieser für das Wärmepumpenmodul WP-K an das Erdreichmodul angeschlossen ist.

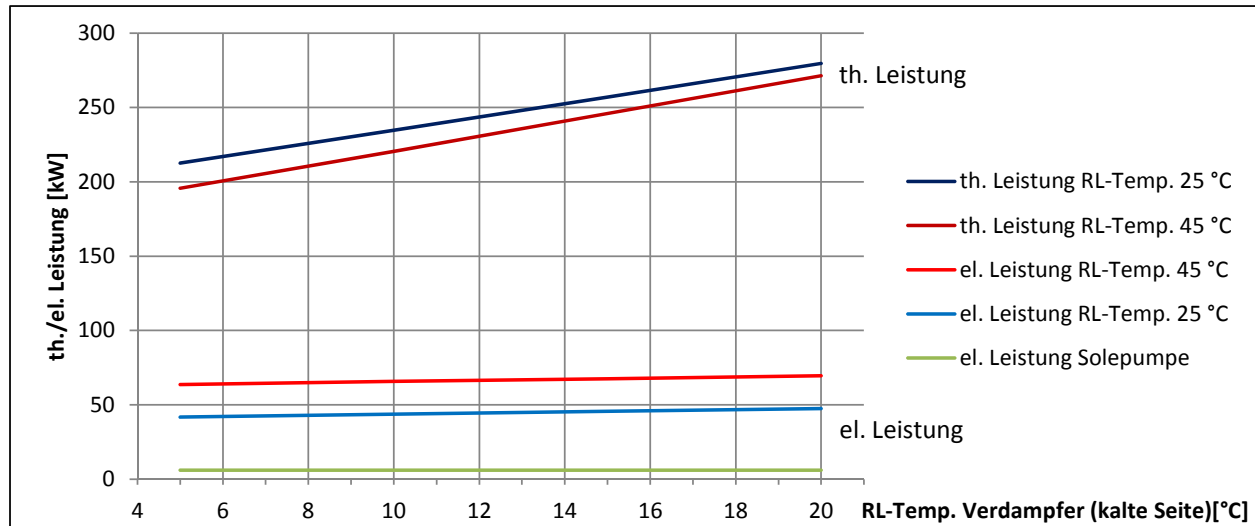


Abbildung 12: Leistungskennlinien WP-I für RL-Temperaturen von 25 °C bzw. 45 °C im Heizkreis⁸³

Je nach Temperaturverhältnis kann die Wärmepumpe WP-I etwa $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ und ebenso $200 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$ bis $250 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$ bereitstellen.⁸⁴ Die abgebildeten Kennlinien führen zu den in **Abbildung 13** dargestellten Leistungszahlen. Die Leistungszahlen für den Heizbetrieb (LZ-H) und Kühlbetrieb (LZ-K) beinhalten auch den Stromverbrauch der Solepumpe. Für den Simultanbetrieb berücksichtigt die Leistungszahl (LZ-S) die Wärme- und Kälteerzeugung. Die Solepumpe hat in dieser Betriebsart keine Funktion.

⁸³ Kennlinien eines deutschen Wärmepumpenherstellers. (Katalogdaten)

⁸⁴ Aufgrund der stark unterschiedlichen Temperaturdifferenzen im Heiz- bzw. Kühlbetrieb stimmen die Leistungsbereiche überein. Der Temperaturhub im Heizbetrieb ist mehr als doppelt so hoch, wie im Kühlbetrieb.

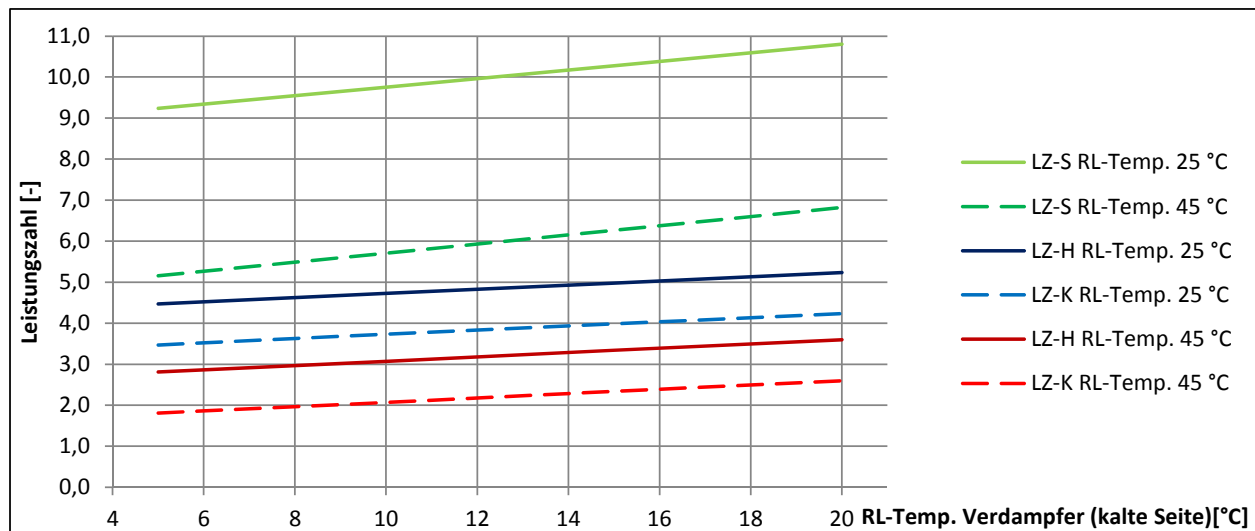


Abbildung 13: Leistungszahlen WP-I

Datenpunkte der Kennlinien der WP-I in numerischer Formulierung sind der folgenden **Tabelle 6** zu entnehmen.

Tabelle 6: Kennlinien WP-I⁸⁵, numerisch

		RL-Temp. zum Kondensator [°C]	RL-Temp. zum Verdampfer [°C]						
			0	5	10	15	20	25	
th. Leistung	25	191,2	212,6	234,6	257,0	279,6	302,6	[kW]	
	45	163,0	195,6	220,4	245,8	271,4	297,4	[kW]	
el. Leistung	25	41,2	41,6	43,6	45,6	47,4	49,0	[kW]	
	45	56,4	63,6	65,8	67,6	69,4	70,8	[kW]	
el. Leistung Solepumpe	25	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	
	45	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	

Jeder Wert der Tabelle bildet einen Stützpunkt der Kennlinie. Die Stützpunkte sind geradlinig zu verbinden. Hiermit sind die drei Wärmepumpenmodule WP-H, WP-K und WP-S attribuiert.

4.1.3 Kältemaschinenmodul

Im Simulationsmodell dienen zwei Kältemaschinenmodule (KM) mit je 690 kW_{Kälte} als konventionelle Kälteerzeuger. Der Volumenstrom beträgt je 144 m³/h. Die Werte entsprechen denen der Realanlage, vgl. **Abbildung 9**. Die Kältemaschinenmodule werden einzeln in Abhängigkeit vom Wert des PI-Reglers am Kältespeichermodul zugeschaltet.

⁸⁵ Kennlinien eines deutschen Wärmepumpenherstellers. (Katalogdaten)

Ihre Leistung soll im Gegensatz zu dem der Wärmepumpenmodule regelbar sein, wie dies in der Realanlage der Fall ist. Das Modellelement der Kältemaschine entspricht dem der Wärmepumpen, attribuiert mit anderen Kennlinien.

Aufgrund des primären Fokus auf der Wärmeseite wird hier ein einfacher Ansatz mit ganzheitlicher Betrachtung von Kältemaschine mit Rückkühlung verfolgt. Aus Realdaten sind mittels Regression Leistungszahlen für die Kältemaschine berechnet worden. Jede Kältemaschine wird hierbei inkl. des Primärenergieaufwands für die Rückkühlung betrachtet. Die Leistungszahlen werden in Abhängigkeit zur Rücklauftemperatur im Kühlkreis gebracht. Der Verlauf der Leistungszahl ist in folgender **Abbildung 14** dargestellt.

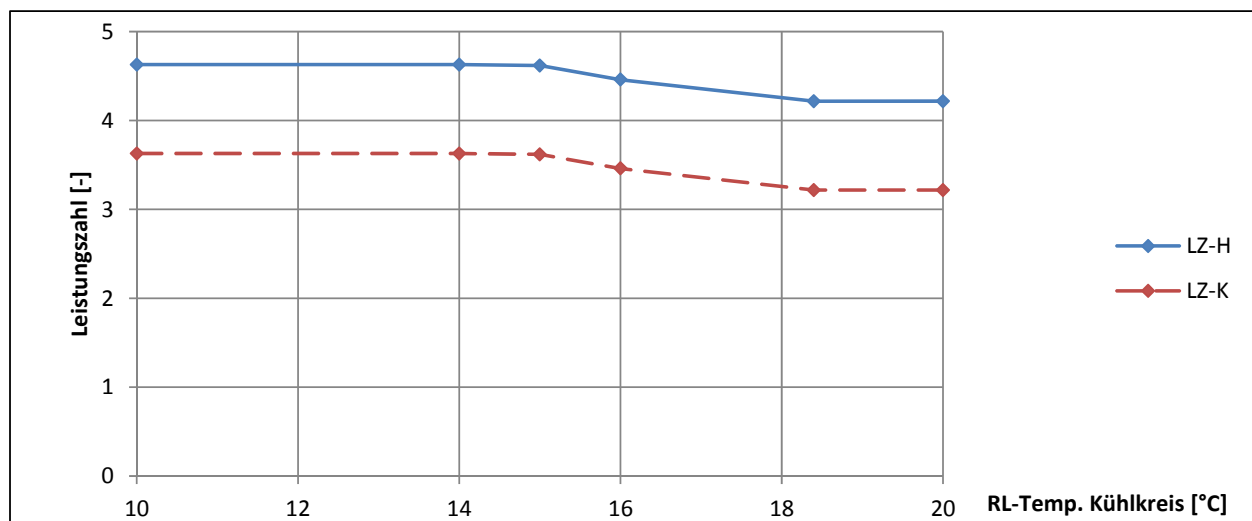


Abbildung 14: Leistungszahlen Kältemaschinenmodul

Die mit steigenden Rücklauftemperaturen sinkende Leistungszahl resultiert aus der berücksichtigten Rückkühlung. Höhere Rücklauftemperaturen bedeuteten höhere Lasten u. a. aus höheren Außentemperaturen und eine höhere Maschinenleistung. Daher steigt der Primärenergieaufwand in der Rückkühlung überproportional. Der vereinfachte Ansatz vernachlässigt den Einfluss innerer Lasten des Gebäudes. Diese können außentemperaturunabhängig schwanken. Aufgrund der schwerpunktmäßigen Auswertung der Wärmeseite, ist dieser Ansatz aber ausreichend. Der Ansatz hat für die Auswertungen den Vorteil, dass Kälteleistung und Leistungszahl nur von Systemtemperaturen abhängig sind. Die Abhängigkeit von der Außentemperatur würde bei zeitlich verschobenem Einsatz des Kältemaschinenmoduls und gleichzeitig veränderlicher Außentemperatur zu unterschiedlichen, schwer vergleichbaren Ergebnissen führen.

Aus dem in **Abbildung 14** dargestellten Leistungszahlverlauf werden Kennlinien für das Kältemaschinenmodul berechnet, welche gleichzeitig eine Leistungs- und Temperaturregelung entsprechend der Realanlage übernehmen. Für niedrige Rücklauftemperaturen ist die Leistung eines Kältemaschinenmoduls auf $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ (entspricht $155 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$) festgelegt. Der Wert stellt die geringste Leistungsstufe des Kältemaschinenmodells dar. Die erzielte Temperaturdifferenz beträgt bei $144 \text{ m}^3/\text{h}$ damit 1 K . Die Maximalleistung

beträgt $905 \text{ kW}_{\text{th}}$ (entspricht gut $690 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$). Sie wird bei $18,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Rücklauftemperatur erbracht und führt dann zu $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kaltem Wasser im Vorlauf. Diese Temperatur bildet bei Kälteanforderung näherungsweise den Sollwert gut ab, vgl. auch **Abbildung 19**. Bezogen auf den Lastgang mit einer Maximalleistung von $1.136 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$, vgl. **Tabelle 4**, ist diese Leistung zweier Kältemaschinenmodule (zusammen $1.380 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$) ausreichend.

Die Kennlinien des Kältemaschinenmoduls (elektrische und thermische Leistung) sind in **Abbildung 15** dargestellt. Die Kälteleistung ist durch deren Differenz bestimmt und nicht abgebildet. Die in **Abbildung 14** und **Abbildung 15** aufgetragenen Punkte bilden die Stützpunkte. Sie dienen der Kennliniendefinition im Kältemaschinenmodul. Zwischen den Punkten verlaufen die Kurven geradlinig.

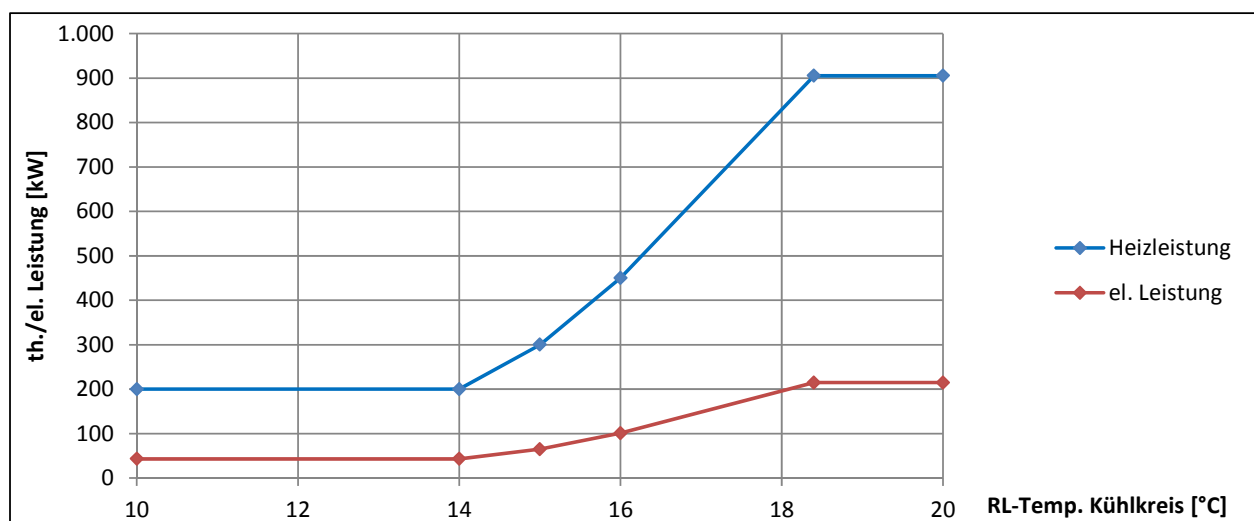


Abbildung 15: Leistungskennlinien Kältemaschinenmodul

Jeder Stützpunkt resultiert aus den in **Abbildung 14** mittels Regression bestimmten Leistungszahlen. Das Kennlinienmodul wird über sechs Stützpunkte definiert. Je zwei Stützpunkte sind für den konstanten Leistungsverlauf bei der Mindest- und Maximalleistung erforderlich. Zwei weitere Punkte werden bei $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ berechnet. Dieser Bereich entspricht dem Haupteinsatzgebiet des Kältemaschinenmoduls.

4.2 Ablaufstruktur (Regelungstechnik)

Die Ablaufstruktur des Simulationsmodells, also die Regelung der beschriebenen Erzeugermodule ist einfach gegliedert. Sie erfolgt temperaturbasiert. Je ein PI-Regler für Kälte- und Wärmeseite berechnet die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Temperatur. Hierfür werden die Austrittstemperaturen aus den Speichermodulen mit dem jeweilig zugehörigen Sollwert aus dem Lastgang verglichen. Je höher der PI-Wert, desto mehr Erzeugermodule werden aktiviert, in der klassischen Regelungsvariante zunächst das Wärmepumpenmodul, dann das Brennwertkesselmodul bzw. das erste Kältemaschinenmodul und schlussendlich das zweite Kältemaschinenmodul. Der schematische

Ablauf ist in **Abbildung 16** dargestellt und wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Für die drei Wärmepumpenmodule, vgl. **Abbildung 10**, wird ergänzend zum PI-Regler noch eine Temperaturbegrenzung vorgenommen. Diese berücksichtigt die maschinentechnischen Grenzen. Für die Wärmeseite wird die Rücklauftemperatur zum Wärmepumpenmodul auf 45 °C begrenzt. Auf der Kälteseite wird eine Rücklauftemperatur von mindestens 14 °C gefordert. Darüber hinaus ist die Solerücklauftemperatur aus dem Erdreichmodul auf über 0 °C beschränkt. Eine solche Temperaturbegrenzung kann z. B. aus der Genehmigung für Erdbohrung resultieren. Insbesondere ist in der Praxis aber Frost im Erdreich zu vermeiden, um keine Gefügeveränderung durch Eisbildung zu verursachen.

Das Simulationsmodell ist so attribuiert, dass der Realanlage entsprechende Mindestlaufzeiten der Erzeugermodule entstehen. Mehrere Umschaltungen pro Stunde sind möglich. Je nach Situation entstehen Mindestlaufzeiten von zehn Minuten, meist aber von mehr als 15 Minuten.

Diese Grundlastregelung (auch klassische Regelungsvariante genannt) kann dahingehend umgestellt werden, dass die Erzeugermodule nach ökonomischen oder ökologischen Aspekten (ökonomische bzw. ökologische Regelungsvariante genannt) geschaltet werden. Zur Bewertung wird der Primärenergieverbrauch der Erzeugermodule beurteilt. Der Primärenergieaufwand für den Betrieb der Umweltwärmequelle bzw. Wärmesenke (insbesondere Umwälzpumpe) wird, wie in den Kapiteln 4.1.2 und 4.1.3 beschrieben, dabei berücksichtigt. Daraus ergibt sich der wesentliche Teil der bedarfsgebundenen Kosten bzw. CO₂-Emissionen nach Unterteilung aus Kapitel 3.3.1.

Da das Simulationsmodell auf Kennlinienmodulen basiert, ist eine ökonomische bzw. ökologische Erzeugerwahl einfach vorzunehmen. In der Praxis müssten Kennlinienmodule zur Abbildung der realen Erzeuger hinterlegt werden. Die Übereinstimmung von Anlagenverhalten und deren Abbildung im Kennlinienmodul sind in der Praxis von entscheidender Bedeutung. Angenommen wird die höchste Effizienz für den Simultanbetrieb. Sollte die Wärmepumpe nur heizen oder nur kühlen, wird die erwartete Leistungszahl mittels Rechenmodell (z. B. ein Kennlinienmodul) berechnet. Hierzu dient im Simulationsmodell je ein zweites, identisch attribuiertes Wärmepumpenmodul im Hintergrund.⁸⁶ Im Dauerbetrieb berechnen sie (unter Vernachlässigung der Anfahrverluste) die möglichen Leistungszahlen der beiden Wärmepumpenmodule auf Basis der aktuellen Temperaturen des Erdreichmoduls und der Speichermodule. Die berechnete Leistungszahl dient als Entscheidungsgrundlage für die Wahl zwischen

⁸⁶ In den Abbildungen sind diese Wärmepumpenmodule nicht dargestellt. Die beiden Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K existieren also doppelt, gleich attribuiert. Die dargestellten Wärmepumpenmodule bilden die realen Erzeuger ab. Die nicht dargestellten Wärmepumpenmodule im Hintergrund dienen lediglich der Leistungszahlberechnung.

Wärmepumpenmodul und den Modellelementen der konventionellen Erzeuger. Auf der Kälteseite ist ein direkter Vergleich mit einer temperaturabhängigen Kennlinie für das Kältemaschinenmodul möglich (vgl. **Abbildung 14**). Eine Unterscheidung zwischen ökonomischer oder ökologischer Regelungsvariante ist nicht erforderlich. Jede Primärenergieeinsparung führt unabhängig von der gewählten Regelungsvariante zur Verbesserung. Auf der Wärmeseite konkurrieren Strom und Gas. Ein analoger Ansatz berücksichtigt die unterschiedlichen Energiepreise bzw. CO₂-Emissionswerte. Für das Brennwertkesselmodul ist zum Entscheidungszeitpunkt aufgrund von Totzeiten die exakte Leistung nicht vorhersehbar. Weiterhin wird diese aufgrund veränderlicher PI-Regler i. d. R. ihren Leistungszustand sehr kurzfristig anpassend verändern. Daher wird der Mittelwert der in **Abbildung 11** dargestellten beiden Kurven verwendet. Bei einem maximalen Abstand von 3,5 Prozentpunkten⁸⁷ zwischen der Teil- und Volllastkurve nimmt diese Vereinfachung keinen nennenswerten Einfluss auf die Erzeugerwahl.

Sollte bei Anforderung eines Wärmepumpenmoduls das Modellelement des konventionellen Erzeugers günstiger sein, wird die Anforderung zurückgenommen. Es findet zunächst keine Erzeugung statt. Der entsprechende PI-Regler muss weiter steigen, damit das Modellelement des konventionellen Erzeugers regulär angefordert wird. Das Wärmepumpenmodul wird erst dann unabhängig von der Effizienz als Spitzenlasterzeuger angefordert, wenn der PI-Regler noch weiter gestiegen ist. Diese Art der Regelung führt zwar zu kurzfristiger Unterversorgung, weil das Modellelement des konventionellen Erzeugers zeitlich verzögert gegenüber den Wärmepumpenmodulen angefordert wird, jedoch kann ein höherer Anteil Simultanbetrieb erzielt werden. Sobald auf der anderen Seite ein Schaltbefehl erfolgt, schaltet das Wärmepumpenmodul in den Simultanbetrieb.

In der folgenden **Abbildung 16** ist die Ablaufstruktur schematisch dargestellt. Die beiden PI-Regler (rechts und links außen von oben nach unten steigend) können voneinander unabhängig steigen bzw. sinken. Auch die Skalierung der beiden Achsen ist unabhängig voneinander. Dazwischen sind in drei Spalten die beiden Wärmeerzeugermodule (BWK und WP-H), das Wärmepumpenmodul WP-S und die beiden Kälteerzeugermodule (KM und WP-K) angeordnet. Der fett umrandete Effizienzvergleich bildet den neuen Regelungsansatz ab. Im Falle der Grundlastregelung (klassische Regelungsvariante) wird dieser übersprungen. Das Wärmepumpenmodul wird dann unabhängig vom Effizienzvergleich angefordert. Der Regelungsansatz kann in einer ökonomischen ($X \triangleq$ Energiepreis) oder ökologischen ($X \triangleq$ CO₂-Emissionswert) Regelungsvariante angewandt werden.

⁸⁷ Bei einer Rücklauftemperatur von 40 °C beträgt der Wirkungsgrad 102,8 % (100 % Auslastung) bzw. 106,3 % (30 % Auslastung). Dies ist der größte Abstand zwischen den beiden Kurven in Abbildung 11.

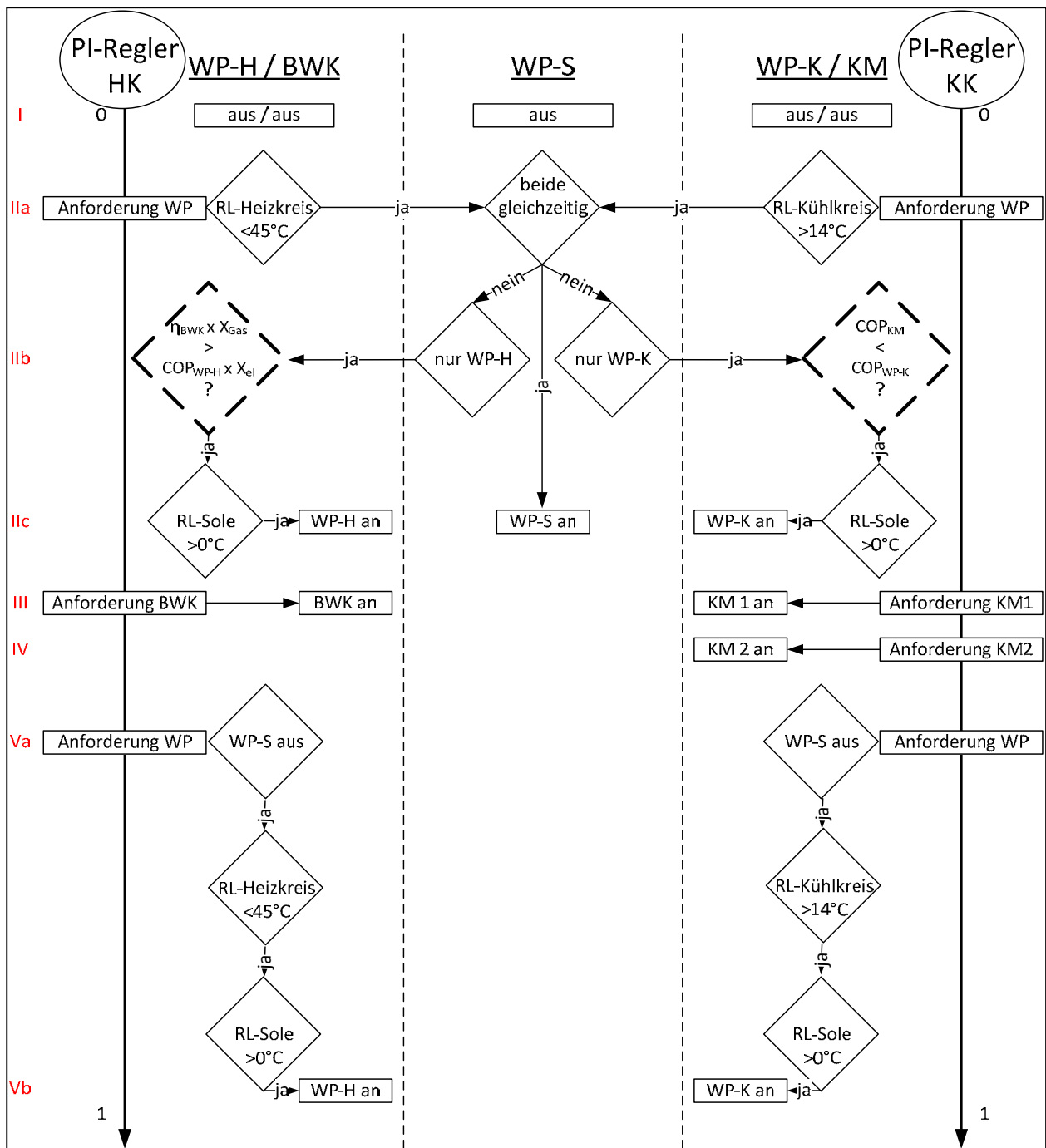


Abbildung 16: Ablaufstruktur des Simulationsmodells (Regelungstechnik)

In **Abbildung 16** sind links fünf PI-Reglerwerte mit römischen Zahlen (rot) durchnummeriert. Sie dienen in der folgenden Erklärung der einfacheren Zuordnung. Jede der fünf Ziffern entspricht einem bestimmten PI-Reglerwert. Sie können für Heiz- und Kühlkreis übereinstimmen oder divergieren.

Bei einem PI-Reglerwert von null (**I**) sind alle fünf Erzeugermodule aus. Steigt einer der PI-Regler (aufgrund von Temperaturabweichung im Simulationsmodell), erfolgt zunächst eine Anforderung des entsprechenden Wärmepumpenmoduls (**Ila**). Die Systemtemperaturen müssen einen Wärmepumpenbetrieb zulassen. Im gleichen Schritt (**Ila**, mittlere Spalte) wird ein paralleles Signal an das Wärmepumpenmodul WP-H und WP-K

geprüft, um zu entscheiden, ob das Wärmepumpenmodul WP-S eingeschaltet werden soll. Besteht nur Anforderung für eines der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K, so erfolgt in Abhängigkeit der Regelungsvariante der Effizienzvergleich (IIb). Es erfolgt eine Einschaltung des entsprechenden Wärmepumpenmoduls (IIc), falls der Effizienzvergleich dieses nicht verhindert und die Soletemperaturen über dem Gefrierpunkt liegen. Bis hierhin kann nur eines der Wärmepumpenmodule WP-H, WP-K oder WP-S in Betrieb gehen.

Mit weiter steigendem PI-Reglerwert erfolgt eine Anforderung und Einschaltung des Brennwertkesselmoduls (III) bzw. der Kältemaschinenmodule in zwei Schritten (III und IV). Hierfür liegen neben dem PI-Reglerwert keine weiteren Voraussetzungen vor.

Mit sehr hohem PI-Reglerwert (Va) erfolgt dann noch eine Anforderung des entsprechenden Wärmepumpenmoduls unabhängig von einem Effizienzvergleich. Die Anforderung zeigt nur Wirkung, wenn nicht schon ein Wärmepumpenmodul im Grundlastbetrieb aktiv ist. Vor Einschaltung (Vb) erfolgt wieder eine Überprüfung der System- und Soletemperaturen.

Ein gesunkener PI-Reglerwert führt analog zur Abschaltung einzelner Erzeugermodule. Mit jedem Rechenschritt erfolgt eine Überprüfung der beiden PI-Reglerwerte und des Status aller Erzeugermodule.

Die genauen PI-Werte sind hier unbedeutend. Sie müssen jeweils individuell auf die Anlage abgestimmt werden.

4.3 Erdwärmequelle und Wärmesenke (Erdreichmodul)

Die Wärmepumpen sind an ein Erdsondenfeld angeschlossen, welches als Wärmequelle und Wärmesenke dient. Mittels Sole kann Wärme dem Erdreich zugefügt bzw. entzogen werden. Im Simulationsmodell müssen die Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K an ein Erdreichmodul angeschlossen werden. Das Erdreichmodul hat die Aufgabe, den Wärmepumpenmodulen eine Temperaturinformation zur Sole zur Verfügung zu stellen. Hierzu sind verschiedene Ansätze möglich. Der Ansatz konstanter Temperaturen (ideales Erdreich ohne Speicher- und Umgebungswirkung) ist genauso möglich, wie eine komplexe Erdreichsimulation mit Berücksichtigung von Speicher-, Umgebungs- und Strömungseinflüssen. Einerseits beeinflussen Erdreichtemperaturen das Wärmepumpenverhalten (und umgekehrt). Andererseits ist eine ganzheitliche Betrachtung weder verbreitet noch mit IDA ICE umsetzbar. Daher soll das Verhalten der Erdwärmequelle und Wärmesenke in Form von Erdsonden hier stark vereinfacht nachgebildet werden. Es erfolgt keine Erdreichsimulation. Eine Abbildung von Temperaturschwankungen in realitätsnaher Größenordnung ist für den Ansatz ausreichend. Gründe für diesen einfachen Ansatz sind neben dem Mangel eines adäquaten Moduls u. a. fehlende detaillierte

Betriebsinformationen vom Erdsondenfeld des Realobjekts und fehlende belastbare Messdaten.

Für die Abbildung der realen Erzeugungsanlage ist im Ausgangsmodell ein Erdreichmodul mit drei Speichermodulen erstellt worden, welches jahreszeitliche Temperaturschwankungen der Sole nachbildet. Die Sole bildet dabei das Wärmeträgermedium, welches durch das Wärmepumpenmodul gewärmt bzw. gekühlt wird und im Erdreichmodul entsprechend entgegengesetzt auskühlt bzw. erwärmt.

Das Erdreichmodul, vgl. **Abbildung 17**, besteht aus einem großen Schichtenspeichermodule und zwei kleinen Speichermodulen. Sie sind über zwei Pumpen verbunden, welche für einen Wärmetransport zwischen ihnen sorgen. Das große Schichtenspeichermodule kann über die Hüllfläche Energie aufnehmen bzw. abgeben ($\triangleq$ Erdreichregeneration). Die beiden kleinen Speichermodule dienen der Verzögerung und der Temperaturbegrenzung. Insbesondere soll hiermit aber berücksichtigt werden, dass die Sole im Umwälzbetrieb nie die Erdreichtemperatur erreichen wird, sondern immer ein Temperaturgefälle in beide Richtungen besteht. Im Heizbetrieb wird die Sole immer unter und im Kühlbetrieb über der Erdreichtemperatur aus den Erdsonden austreten.

In Abhängigkeit der Temperaturabweichung von der Mindest- bzw. Maximaltemperatur wird der Volumenstrom zwischen dem Erdreichspeichermodule und den kleinen Speichermodulen gesteigert. Das an das Wärmepumpenmodul WP-H angeschlossene Speichermodule wird kleiner 16 °C und das an das Wärmepumpenmodul WP-K größer 15 °C temperiert. Hiermit wird einerseits der mit steigender Temperaturdifferenz zum umgebenden Erdreich steigende Wärmestrom zur Sole nachgebildet. Andererseits berücksichtigt dies die Charakteristik des Temperaturgefälles zwischen Erdreich und Sole.

In der Praxis zeigen Erdwärmequellen kurzfristig recht konstante Temperaturen. Totzeiten entstehen durch Stagnation in den Leitungen bei Inbetriebnahme von Pumpen. Solche Details sind für den hier beschriebenen Regelungsansatz nicht entscheidend und bleiben unberücksichtigt.

Das verwendete Erdreichmodul ist schematisch in folgender **Abbildung 17** dargestellt. Die Volumenangaben (V) sind lediglich relativ zueinander zu sehen. Die Umgebungstemperatur (T_{Umgebung}) des großen Schichtenspeichers sorgt für die Regeneration. Das Erdreichmodul ist mit der Realanlage im Ausgangsmodell kalibriert worden. Die Attribute stellen keinen direkten physikalischen Zusammenhang dar. Das Temperaturverhalten war mit diesen Werten für das Realobjekt aber hinreichend genau nachbildbar.

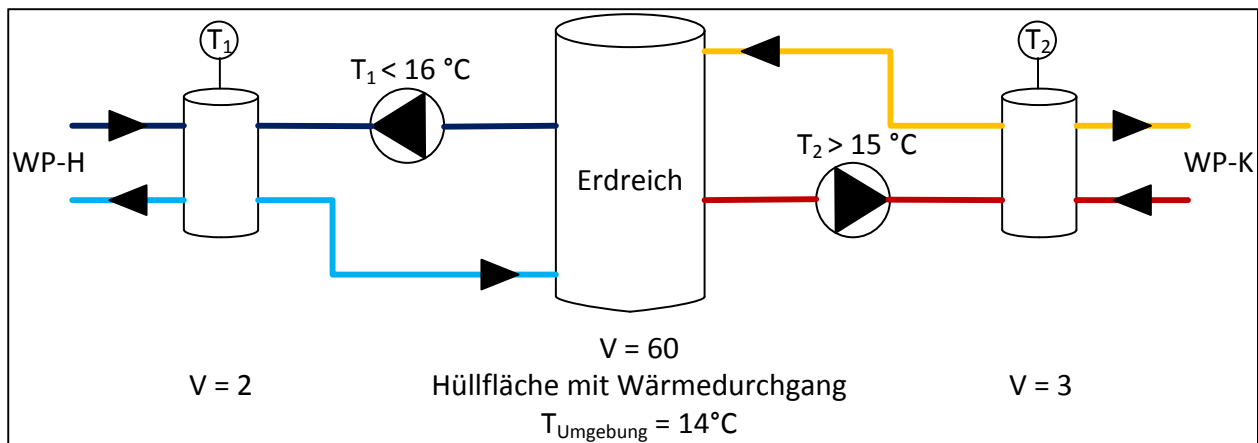


Abbildung 17: Aufbaustruktur des vereinfachten Erdreichmoduls

Dieses Erdreichmodul bildet kurzfristige Schwankungen durch Stagnation nicht ab. Demgegenüber konnten jahreszeitliche Schwankungen, also Anfangs- und Extremtemperaturen einzelner Jahreszeiten, gut nachgebildet werden. Die Kalibrierung im Ausgangsmodell führte für die Simulation der Realanlage zu Abweichungen von unter 1 K an Extremwerten im Sommer und Winter.⁸⁸

Das Temperaturverhalten war mit diesem Erdreichmodul für das Realobjekt hinreichend genau nachbildbar. Eine Übertragbarkeit auf andere Lastfälle wird angenommen. Ein Rechenmodell für Erdsonden ist hiermit nicht gegeben. Die Ergebnisse werden zeigen, dass mit diesem Erdreichmodul lastabhängig unterschiedliche Temperaturreaktionen entstehen.

Für die Basisvariante A werden die Temperaturverläufe über den Betrachtungszeitraum in **Abbildung 24** dargestellt.

4.4 Lastgang

Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, wird dem Simulationsmodell für Kälte- und Wärmeerzeugung je ein Lastgang hinterlegt. Diese bestehen jeweils aus dem Volumenstrom vom Heiz- bzw. Kühlkreis des Gebäudes, kombiniert mit den zugehörigen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen. Alle Werte sind 15-minütig aufgelöst. Da Volumenstrom, Temperaturverläufe und Lastgang im direkten physikalischen Zusammenhang stehen, werden hier nur jeweils Lastgang und Temperaturverläufe dargestellt. Spitzenleistungen, Energiemengen und durchschnittliche Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie deren Extremwerte sind schon einleitend in **Tabelle 4** und **Tabelle 5** aufgeführt.

⁸⁸ Form, G., Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien, 2013, S. 37.

Der Lastgang inkl. der Temperaturverläufe ist aus Messdaten des Realobjekts berechnet. Hierzu wurden die Leistungswerte der Wärme- bzw. Kältemengenzähler der relevanten Erzeuger jeweils zusammengefasst. Der Temperaturverlauf ist am Ein- bzw. Austritt der hydraulischen Weichen bestimmt worden (vgl. **Abbildung 10** rechts an den hydraulischen Weichen). Die Volumenströme von Heiz- und Kühlkreis sind aus dieser Kombination berechnet. Der Lastgang konnte für die Zeit vom 30.04.2010 bis 12.05.2013 erstellt werden. Er deckt somit den Simulations- und Betrachtungszeitraum, welcher am 01.05.2010 beginnt, vollständig ab. Er enthält weiterhin Daten für die Einschwingphase am 30.04.2010. Die für die Einschwingphase relevanten Daten werden im Weiteren nicht mit berücksichtigt.

Der Lastgang umfasst somit 1.108 Tage, dies entspricht drei Jahren inkl. eines Schaltjahres und 12 Tagen. Die Daten zeigen, dass davon 51 Tage ohne Abnahme im Lastgang zu verzeichnen sind. Somit liegt eine Last an 1.057 Tagen vor, also von zwei Jahren und knapp elf Monaten. Vereinfacht wird dieser Zeitraum im Weiteren auf drei Jahre gerundet. Mit diesem Zeitraum werden sehr unterschiedliche Lastfälle abgedeckt. Die lange Periode ist aber insbesondere erforderlich, um das langfristige Speicherverhalten des Erdreichs abdecken zu können.

Folgende **Tabelle 7** zeigt noch einmal zusammenfassend die Eigenschaften des Lastgangs.

Tabelle 7: Eigenschaften des Lastgangs

Zeitraum	vom 01.05.2010 bis 12.05.2013	
Anzahl Tage	1.058	
Werte pro Stunde	4	
Anzahl Werte gesamt	101.568	
Messwerte	$\dot{Q}_h, T_{VL,HK}, T_{RL,HK}$	$\dot{Q}_k, T_{VL,KK}, T_{RL,KK}$
Gesamte Energiemenge	$Q_h = 7.833.221 \text{ kWh}_{th.}$	$Q_k = 4.245.866 \text{ kWh}_{Kälte}$

Mit dem Lastgang kann eine Periode von etwa drei Jahren, beginnend im Frühjahr, ausgewertet werden. Der Lastgang ist mit der 15-minütigen Auflösung für die Simulation hinreichend gut. Die folgende **Abbildung 18** zeigt den Lastgang.

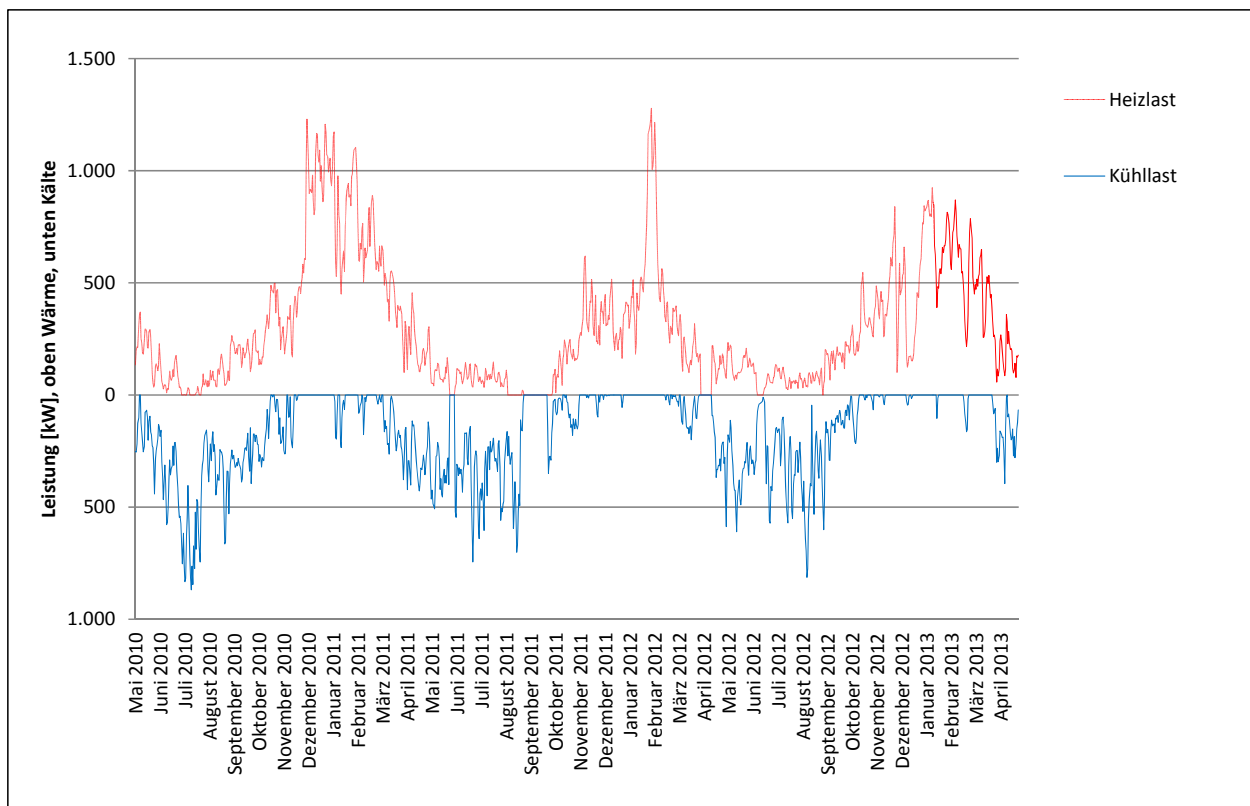


Abbildung 18: Lastgang (Heizen und Kühlen), Tagesmittelwerte

Diesem Lastgang sind Vorlauf- und Rücklauffemperaturverläufe hinterlegt, welche in folgender **Abbildung 19** dargestellt sind. Die Vorlauffemperaturverläufe stellen dabei im Simulationsmodell Sollwerte dar. Sie sollen in den beiden Vorläufen zu den Verbrauchern (am Austritt aus den Speichermodulen) erreicht werden. Die Rücklauffemperaturverläufe werden als Ist-Werte in das Simulationsmodell eingebracht. Sie nehmen direkt Einfluss auf die Temperaturen der Speichermodule (hydraulische Weiche, vgl. **Abbildung 10**) und damit die Temperaturverhältnisse an den Erzeugermodulen. Zu Zeiten ohne Energieabnahme des Gebäudes sind die Temperaturverläufe unterbrochen. Gründe keiner Energieabnahme können auch betriebsbedingte Unterbrechungen des Regelbetriebs (Wartung bzw. Umbau während Betriebsferien) sein. Solche Phasen sind Ende Mai bis Anfang Juni 2011, im September 2011 und April 2012 zu erkennen, aus ihnen resultieren stillstehende Erzeugermodule in der Simulation.

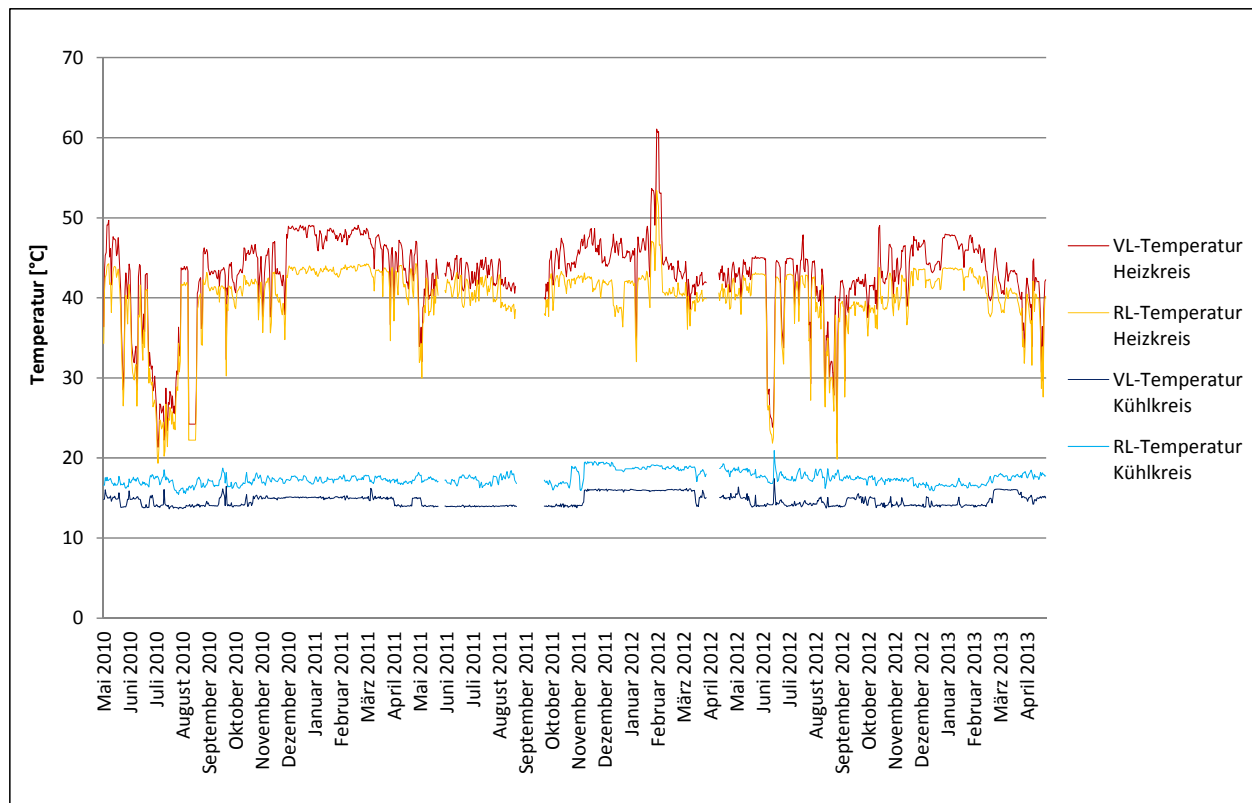


Abbildung 19: VL/RL-Temperaturverläufe des Lastgangs, Tagesmittelwerte

Der Lastgang (**Abbildung 18**) und zugehörige Temperaturverläufe (**Abbildung 19**) resultieren aus Messwerten der Realanlage. Sie bilden Reaktionen der Erzeuger auf die Schaltbefehle und Sollwertvorgaben der Regelungstechnik ab. Eine veränderte Außentemperatur, ein Zeitprogramm o. ä. haben zu veränderten Anlagenzuständen geführt. Welche Aktionen es waren, ist für die Simulation nicht bekannt, sondern nur das aufgezeichnete Ergebnis. Hierdurch können Last- und Temperatursprünge entstehen, welche in Berechnungen insbesondere mit synthetischen Wetterdaten unbekannt sind.

Der Regelungstechnik wird in der Simulation ebenfalls eine der Realanlage entsprechende Reaktionszeit zugestanden, damit die Ablaufstruktur ein reales Anlagenverhalten nachbildet. Eine veränderte Soll-Vorlauftemperatur oder Last am Speichermodul wird erst mit Verzögerung durch den regelnden PI-Wert zu angepassten Leistungen der Erzeugermodule führen. Die Vorlauftemperaturen am Speichermodulaustritt können vom Sollwert abweichen. Die resultierende Leistungsabweichung am jeweiligen Speichermodul wird integriert. Der Volumenstrom wird angepasst, so dass die Abweichung möglichst kurzfristig ausgeglichen wird. Diesem Verfahren sind insbesondere bei kleinen Leistungen und Volumenströmen Grenzen gesetzt. Der Wert des Integrals bleibt bestehen bis in einem folgenden Simulationsschritt oder nach einer Betriebspause die Last wieder ansteigt.

Im Simulationsmodell bestehen für diesen Lastgang ausreichend Leistungsreserven durch die Erzeugermodule. Die Modellelemente der konventionellen Erzeuger wären in der Lage, den Lastgang alleine zu decken. Die Daten sind nochmals in folgender **Tabelle 8** gegenübergestellt.

Tabelle 8: Lastspitzen im Lastgang (1 h-Mittelwert) und Leistungen der Erzeugermodule

	Lastspitzen	Konventioneller Erzeuger	Wärmepumpe ⁸⁹
Heizen	1.453 kW _{th.}	1.620 kW _{th.}	ca. 230 kW _{th.}
Kühlen	1.136 kW _{Kälte}	1.380 kW _{Kälte}	ca. 230 kW _{Kälte}

4.5 Variablen und Parameter des Simulationsmodells

Im vorhergehenden Teil des Kapitels 4 wurde ein Simulationsmodell mit seinen Attributen in der Basisvariante A, unterteilt in einzelne Module vorgestellt. Es bildet den für Auswertungen relevanten Teil einer Realanlage ab. Alle wesentlichen Eigenschaften und Attribute mit ihren Werten sind zusammenfassend im Anhang (**Tabelle 33** bis **Tabelle 36**) aufgelistet. In Kapitel 4.5.1 werden zunächst die numerischen Abhängigkeiten der einzelnen Module erörtert. Hierzu werden die Variablen dargestellt, welche zwischen den Modulen übergeben werden. In Kapitel 4.5.2 werden sodann die Attribute hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Simulationsergebnisdaten und deren Relevanz für die Untersuchung des Regelungsansatzes analysiert. Hieraus werden die notwendigen Parameter des Simulationsmodells für weitere Untersuchungen des neuen Regelungsansatzes definiert.

4.5.1 Variablen

Zwischen den einzelnen, zuvor beschriebenen Modulen, werden im Simulationsmodell mit jedem Rechenschritt Variablen übergeben, auf Basis derer die Module rechnen. Die folgende **Abbildung 20** nennt an den einzelnen Verbindungen zwischen den Modulen die in Pfeilrichtung übergebenen Variablen. Die Pfeilrichtung entspricht, außer in den Verbindungen zwischen Lastgang und PI-Regler, der Fließrichtung des Wärmeträgermediums. Die Regelungstechnik ist hier nur stark vereinfacht berücksichtigt.

⁸⁹ Die Leistung von Wärmepumpen ist stark temperaturabhängig, vgl. Kapitel 4.1.2. Hier wird nur die genutzte Wärme- bzw. Kälteleistung betrachtet. Im Simultanbetrieb liegt gegenüber der Kälteleistung eine um die elektrische Leistungsaufnahme höhere Heizleistung vor.

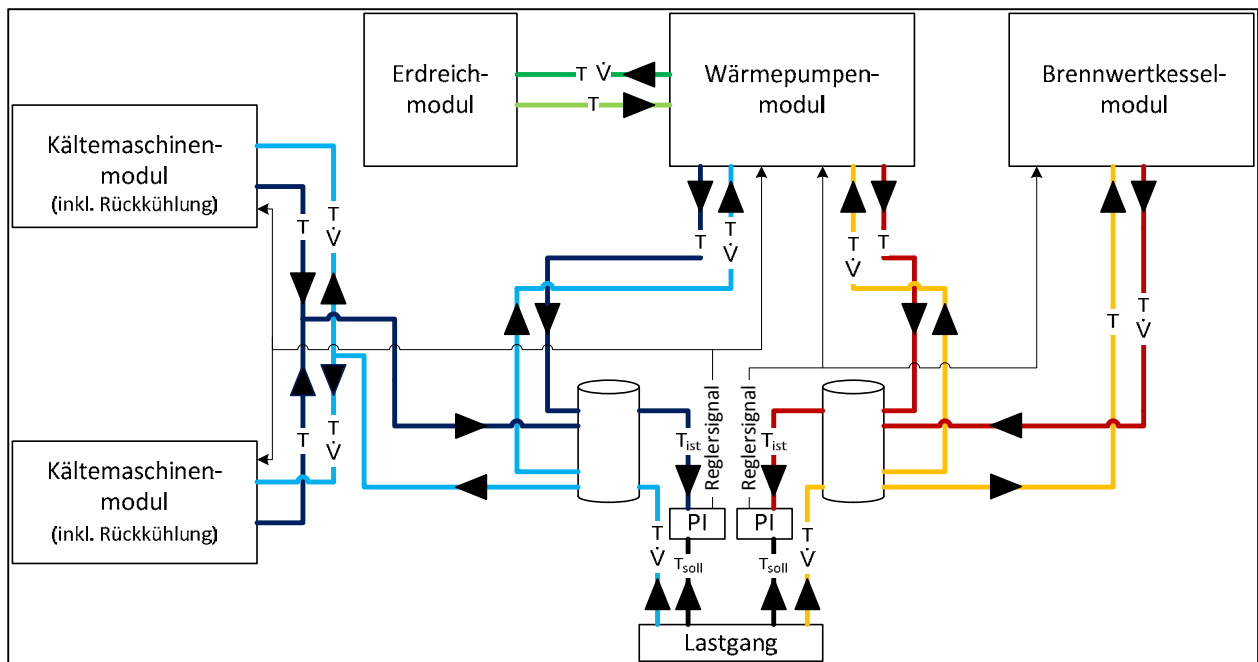


Abbildung 20: Variablenübergabe im Simulationsmodell

Ausgehend vom Lastgang berechnen zwei PI-Regler je ein Reglersignal aus der Temperaturabweichung zwischen Soll- und Isttemperatur im Vorlauf zum Heiz- bzw. Kühlkreis. Der Reglerwert dient der Anforderung der Erzeuger und deren Regelung. Die hier zur vereinfachten Darstellung nicht berücksichtigten Umwälzpumpen sorgen bei Erzeugeranforderung für entsprechenden (konstanten) Volumenstrom, anderenfalls besteht kein Durchfluss. Jedes Erzeugermodul bekommt eine Rücklauftemperatur (T) und einen Volumenstrom ($\dot{V}$) übergeben und berechnet daraus eine Vorlauftemperatur (T). Lediglich das Brennwertkesselmodul nimmt eine variable Volumenstromregelung vor, so dass hier auf Basis des Reglerwertes ein Volumenstrom berechnet wird. Die Volumenströme an Ein- und Austritt jedes Erzeugermoduls stimmen aufgrund des geschlossenen hydraulischen Systems überein.

4.5.2 Parameter

Das in der Basisvariante A beschriebene Simulationsmodell ist mit vielen Attributen attribuiert. Im Folgenden werden die Attribute hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Simulationsergebnisdaten und deren Relevanz für die Untersuchung des Regelungsansatzes analysiert. Es gilt, die notwendigen Parameter des Simulationsmodells für weitere Untersuchungen des neuen Regelungsansatzes zu definieren. Sie müssen später in ihrer Wirkung ausgewertet werden, während die verbleibenden Attribute in allen Simulationen identisch sind.

Der hydraulische Aufbau (vgl. **Tabelle 33**) mit den Erzeugermodulen ist durch die Fragestellung und das Realobjekt vorgegeben. Die Verbraucher werden zwar nicht direkt im Simulationsmodell abgebildet, aber der erstellte Lastgang berücksichtigt sie. Der

Lastgang muss veränderlich sein, hierfür gilt es, Parameter einzuführen. Vorstellbar ist, einen weiteren unabhängigen Lastgang zu nutzen. Da dieser aber keinen Bezug zur abgebildeten Erzeugungsanlage haben kann, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt, zumal der vorliegende mit einer Dauer von drei Jahren viele unterschiedliche Lastfälle abbildet. Die Systemtemperaturen als Teil des Lastgangs nehmen jedoch wesentlichen Einfluss auf die Wirkungsgrade der Erzeugermodule, vgl. auch **Tabelle 34**, und damit die Wirkung des Regelungsansatzes. Unter Berücksichtigung der schwerpunktmäßigen Auswertung auf der Wärmeseite wird daher ein Parameter zur Veränderung der Temperaturen des Lastgangs auf der Wärmeseite benötigt.

Für das Volumen der Modellelemente beider hydraulischer Weichen (vgl. **Tabelle 33**) ist eine Veränderung zwar grundsätzlich vorstellbar. Die Speicherfähigkeit spielt in hydraulische Weichen aber nur untergeordnete Bedeutung. Die Vorgabe der Modellelemente hydraulischer Weichen stammt aus dem Realobjekt, wieso auch hier keine Parametrierung erfolgen soll.

Wesentlichen Einfluss nehmen die Erzeugermodule (vgl. **Tabelle 34**) auf die Auswertungen der neuen Regelstrategie. Die Kennlinien der Erzeugermodule beeinflussen deren Effizienz und damit Primärenergieaufnahme und Leistungsabgabe. Für Brennkessel besteht ein relativ geringer Einfluss, weil deren Wirkungsgrade sowohl zwischen den am Markt verfügbaren Modellen, als auch temperaturabhängig nur sehr begrenzt variieren. Aufgrund der schwerpunktmäßigen Betrachtung der Wärmeseite sind die hier sehr einfach angenommenen Kennlinien der Kältemaschinenmodule ebenfalls von untergeordneter Bedeutung. Die Kennlinien der Wärmepumpenmodule müssen aber als Parameter vorgesehen werden. Sie haben im Vergleich zu den Modellelementen der konventionellen Erzeuger großen Einfluss auf das Simulationsverhalten.

Insbesondere sind, wie bereits dargelegt, die Wärmepumpenmodule auch stark von den herrschenden Temperaturen abhängig. Die Temperaturen im Heiz- und Kühlkreis sind ursächlich durch den Lastgang beeinflusst. Dieser ist in seiner Temperatur über einen schon definierten Parameter veränderlich. Die Temperaturen des Erdreichmoduls müssen ebenfalls veränderlich sein, hier sind weitere Parameter erforderlich. Die Volumenströme an den Erzeugermodulen verändern nur die Temperaturverhältnisse (Temperaturspreizung). Eine Untersuchung direkter Veränderungen ist insofern nicht erforderlich, als dass die Temperaturen direkt über den Lastgang bzw. das Erdreichmodul veränderlich sind und keine weiteren Effekte entstehen.

Die Ablaufstruktur (Regelungstechnik) des Simulationsmodells (vgl. **Tabelle 35**) ist in den wesentlichen Punkten aus der Realanlage vorgegeben. Eine Untersuchung anderer Strukturen ist aus der Aufgabenstellung ausgeschlossen, eine Vergleichbarkeit kaum herzustellen.

Die vier Primärenergiefaktoren (vgl. **Tabelle 36**) sind als Parameter vorzusehen. Sie bilden die Grundlage für Entscheidungen der Regelstrategie und werden daher Effekte zeigen.

Somit werden für das vorgestellte Simulationsmodell Parameter definiert, die die folgenden vier Änderungen am Modell vornehmen können:

- Temperaturen im Heizkreis;
- Kennlinien des Wärmepumpenmoduls;
- Temperaturen des Erdreichmoduls;
- Energiepreise und CO₂-Emissionswerte.

Für eine Änderung müssen teilweise mehrere Parameter im Simulationsmodell eingeführt werden. Für die weiteren Betrachtungen ist es nicht erforderlich, Änderungen mit jedem Parameter zu beschreiben. Hier findet eine „funktionale“ Beschreibung statt, welche i. d. R. eine Änderung mehrerer Parameter im Simulationsmodell nach sich zieht. Ein funktional beschriebener Parameter (z. B. Temperatur des Erdreichmoduls) erfordert also mehrere nicht im Detail ausgeführte Parameter im Simulationsmodell. Im Falle des Erdreichmoduls müssen z. B. Temperatur bzw. Volumenstrom am Austritt zum Wärmepumpenmodul WP-H und WP-K angepasst werden.

Folgende **Abbildung 21** stellt die Parameter des Simulationsmodells (hier funktional beschrieben) noch mal schematisch dar. Sie berücksichtigt ebenfalls den Parameter zur Wahl der Regelungsvariante (vgl. Kapitel 4). Gegenübergestellt sind dem die Einflussfaktoren der Realanlage im oberen Teil der Abbildung.

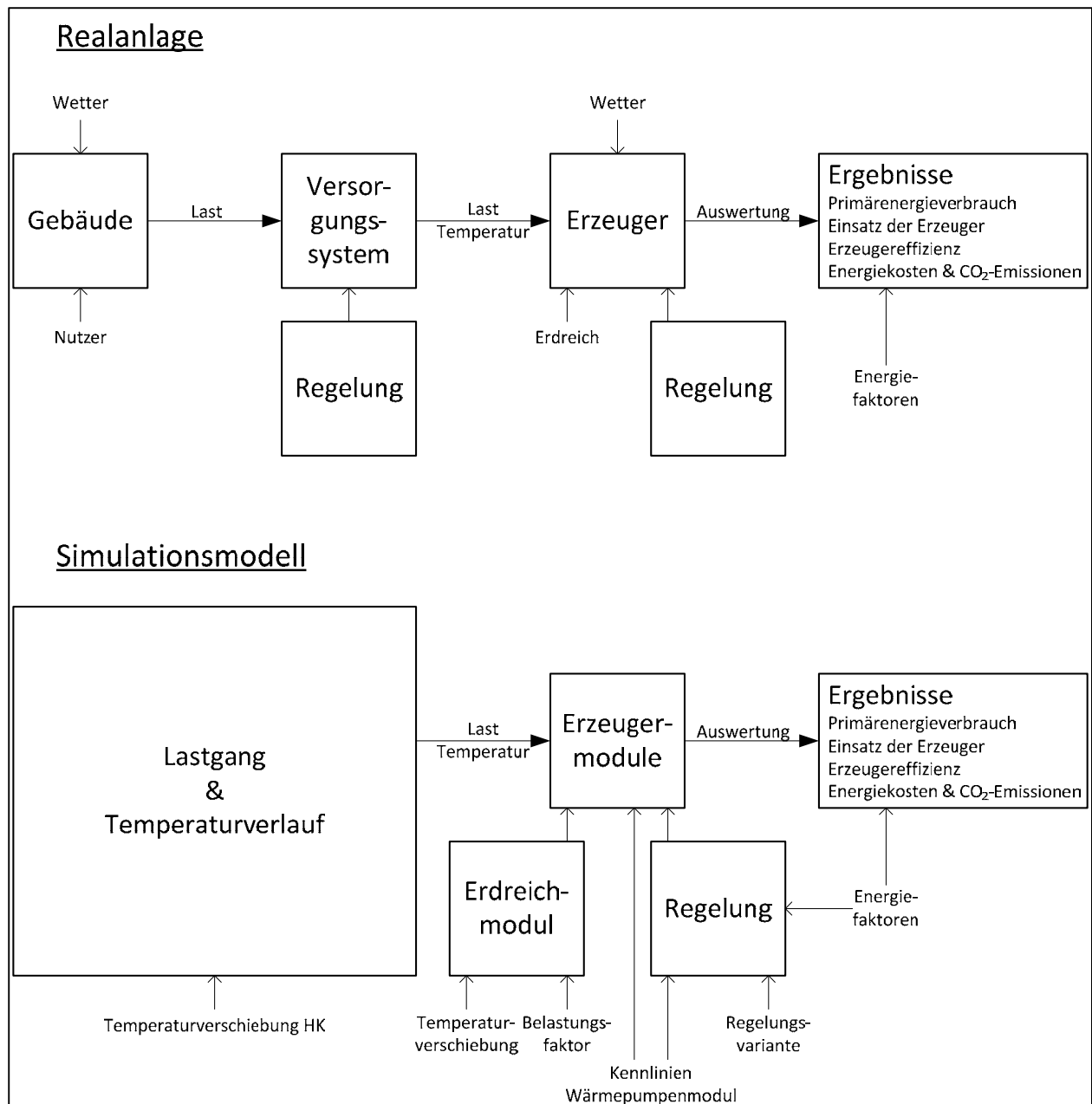


Abbildung 21: Einflussfaktoren der Realanlage und Parameter (funktional) des Simulationsmodells

4.6 Wirkung der Regelstrategie in der Basisvariante A

Die Basisvariante (im Weiteren auch Basisvariante A genannt) wird im Folgenden hinsichtlich der Wirkung des Regelungsansatzes ausgewertet. Eigenschaften, Attribubierung und Parametrierung der Basisvariante sind im Anhang in **Tabelle 33** bis **Tabelle 36** aufgelistet.

Es werden drei Regelungsvarianten berechnet:

- die klassische Regelungsvariante mit der Wärmepumpe im Grundlasteinsatz;
- die ökonomische Optimierung mit Wahl der Erzeuger durch Vergleich der jeweiligen Betriebskosten;
- die ökologische Optimierung mit Wahl der Erzeuger durch Vergleich der jeweiligen CO₂-Emissionen.

Die drei Regelungsvarianten können hinsichtlich entstehender Gesamtenergiekosten und CO₂-Emissionen gegenübergestellt und hiermit der Effekt der unterschiedlichen Regelungsvarianten beurteilt werden. Die Verteilung der Wärme- bzw. Kälteerzeugung auf die Erzeugermodule und deren Temperaturverhältnisse können zwischen den Regelungsvarianten verglichen werden.

Wirkungsgrad bzw. Leistungszahlen, Energiemengen und die bedeutenden Temperaturen sind als Summe bzw. Mittelwert über den Betrachtungszeitraum in folgender **Tabelle 9** zusammengestellt.

Tabelle 9: Basisvariante A – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum (01.05.2010 bis 12.05.2013)

		klassisch	monetär	ökologisch
	Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,45	0,32	0,44
	Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,05	-0,05
BWK	RL-Temp. [°C]	42,2	41,8	42,2
	Wärmeerzeugung [MWh]	4.745,1	6.548,4	4.749,2
	Gasverbrauch [MWh]	4.574,8	6.296,3	4.578,9
	Wirkungsgrad [-]	1,051	1,051	1,051
WP-H	RL-Temp. Heizkreis [°C]	42,1	41,6	42,1
	RL-Temp. Sole [°C]	7,9	14,0	8,0
	Wärmeerzeugung [MWh]	2.004,2	129,2	1.993,9
	Stromverbrauch [MWh]	737,2	42,8	733,2
	Leistungszahl [-]	2,70	2,94	2,70
WP-S	Wärmeerzeugung [MWh]	1.102,8	1.181,0	1.108,7
	Kälteerzeugung [MWh]	779,7	834,1	783,8
	Stromverbrauch [MWh]	322,9	346,6	324,7
	Leistungszahl [-]	5,70	5,70	5,70
WP-K	RL-Temp. Kühlkreis [°C]	16,2	16,1	16,1
	RL-Temp. Sole [°C]	21,8	22,4	21,8
	Kälteerzeugung [MWh]	909,7	854,9	913,1
	Stromverbrauch [MWh]	217,5	208,1	218,5
	Leistungszahl [-]	4,10	4,04	4,10
KM	Kälteerzeugung [MWh]	2.682,9	2.684,2	2.675,3
	Stromverbrauch [MWh]	804,8	804,8	802,0
	Leistungszahl [-]	3,45	3,45	3,45

Die beiden optimierten Regelungsvarianten – ökonomisch (monetär) und ökologisch – führen zu unterschiedlichem Verhalten des Simulationsmodells. Während die ökologische Optimierung keine nennenswerte Veränderung gegenüber dem klassischen

Grundlastbetrieb zeigt, wird bei ökonomischer Optimierung das Wärmepumpenmodul im Heizbetrieb kaum noch eingesetzt. Hierdurch kann die durchschnittliche Leistungszahl von 2,70 auf 2,94 gesteigert werden. Gründe sind das weniger belastete und wärmere Erdreichmodul (14,0 statt 7,9 °C Rücklaufftemperatur) sowie niedrigere Rücklaufftemperaturen im Heizkreis. Ein geringer Teil der Wärmerzeugung kann auf das Wärmepumpenmodul WP-S (simultaner Heiz- und Kühlbetrieb) verschoben werden. Den wesentlichen Teil übernimmt jedoch das Brennwertkesselmodul, wobei dessen Wirkungsgrad nahezu unverändert bleibt. Für diese Berechnungen sind in der folgenden **Tabelle 10** die CO₂-Emissionen und Energiekosten sowie deren Einsparungen aufgezeigt.

Tabelle 10: Basisvariante A – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

		CO ₂ -Ausstoß			Energiekosten		
		[t]			[€]		
		klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
BWK	Gas	1.148	1.580	1.149	141.819	195.185	141.946
WP-H	Strom	414	24	412	82.566	4.794	82.118
WP-S	Strom	181	195	182	36.165	38.819	36.366
WP-K	Strom	122	117	123	24.360	23.307	24.472
KM	Strom	452	452	451	90.138	90.138	89.824
Summe		2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
Einsparung absolut			-50	1		22.805	321
Einsparung relativ			-2,2 %	0,1 %		6,1 %	0,1 %

Mit der ökonomischen Optimierung können 22.805 € eingespart werden, das entspricht 6,1 %. Die CO₂-Emissionen steigen dafür um 2,2 %. Die ökologische Optimierung erzeugt keine nennenswerten Verbesserungen. Für die Kälteseite erfolgt mit der ökologischen wie ökonomischen Regelungsvariante theoretisch die gleiche Verschiebung. Aufgrund des gleichen Energieträgers (Strom) sind Stromkosten und CO₂-Emissionen direkt vom Verbrauch abhängig. Tatsächlich entstehen kleine Abweichungen, die aus trägen PI-Reglern und geringen zeitlichen Verschiebungen resultieren.

Der unterschiedliche Einfluss von Wärme- und Kälteseite soll in folgender Gegenüberstellung genauer dargelegt werden. Die ökonomische Optimierung wird hier auf die Wärmeseite beschränkt. D. h. das Wärmepumpenmodul kühlt als Grundlasterzeuger und heizt, wenn es ökonomisch günstiger als das Brennwertkesselmodul ist. Die Ergebnisse sind der folgenden **Tabelle 11** zu entnehmen.

Tabelle 11: Basisvariante A – Einfluss der Wärme- und Kälteerzeugung auf die CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

		CO ₂ -Ausstoß [t]			Energiekosten [€]		
		klassisch	monetär nur Wärme	monetär	klassisch	monetär nur Wärme	monetär
BWK	Gas	1.148	1.580	1.580	141.819	195.198	195.185
WP-H	Strom	414	24	24	82.566	4.771	4.794
WP-S	Strom	181	195	195	36.165	38.842	38.819
WP-K	Strom	122	118	117	24.360	23.475	23.307
KM	Strom	452	453	452	90.138	90.272	90.138
Summe		2.319	2.370	2.368	375.048	352.558	352.243
Einsparung absolut			-51	-50		22.490	22.805
Einsparung relativ			-2,2 %	-2,2 %		6,0 %	6,1 %

Hier wird deutlich, dass die Kälteseite von untergeordneter Bedeutung ist. Monetär werden 99 % der Einsparung durch die verbesserte Wärmeerzeugung erzielt. Nur 315 € resultieren aus der veränderten Kälteerzeugung. Die CO₂-Emissionen fallen entsprechend minimal geringer aus, weil der Einspareffekt der Kälteseite fehlt. Mit der Basisvariante sind somit vier Regelungsvarianten berechnet worden: der klassische Wärmepumpengrundlasteinsatz, eine ökologische Optimierung, eine ökonomische Optimierung des Gesamtsystems und eine ökonomische Optimierung ausschließlich der Wärmeerzeugung. Die vier Regelungsvarianten sind noch einmal im Anhang (**Tabelle 37** und **Tabelle 38**) mit vollständigen Daten gegenüber gestellt.

Die in **Tabelle 10** dargestellten Ergebnisse zeigen, dass monetär nennenswertes Einsparpotential entsteht. Ein ökologischer Vorteil konnte für das untersuchte Simulationsmodell nicht nachgewiesen werden. Das Simulationsmodell ist hinsichtlich der Kälteseite nur bedingt aussagekräftig, weil es an im Detail belastbaren Daten über die Erzeuger und deren Primärenergieaufwand in der abgebildeten Realanlage mangelt. Die Kälteseite ist aber auch weniger einflussreich, wie **Tabelle 11** zu entnehmen ist. Eine detailliertere Betrachtung der Kälteerzeugung könnte hier aber zu weiteren Verbesserungen führen, was aufgrund der Datenlage mit dem Simulationsmodell aber nicht belegt werden kann.

Die Leistungsverteilung auf die Erzeugermodule (als Teil der Simulationsergebnisdaten) ist in folgender **Abbildung 22** dargestellt. Die gesamte Wärme- bzw. Kälteleistung und die des Wärmepumpenmoduls sind in der Mitte in rot bzw. blau dargestellt. Die Differenz dieser beiden roten bzw. beiden blauen Kurven zeigt folglich die Leistung des konventionellen Erzeugermoduls (d. h. BWK und KM). Oben und unten sind die Verlagerungen für das Wärmepumpenmodul dargestellt. Aus genannten Gründen ergibt sich eine wesentliche Verlagerung nur auf der Wärmeseite.

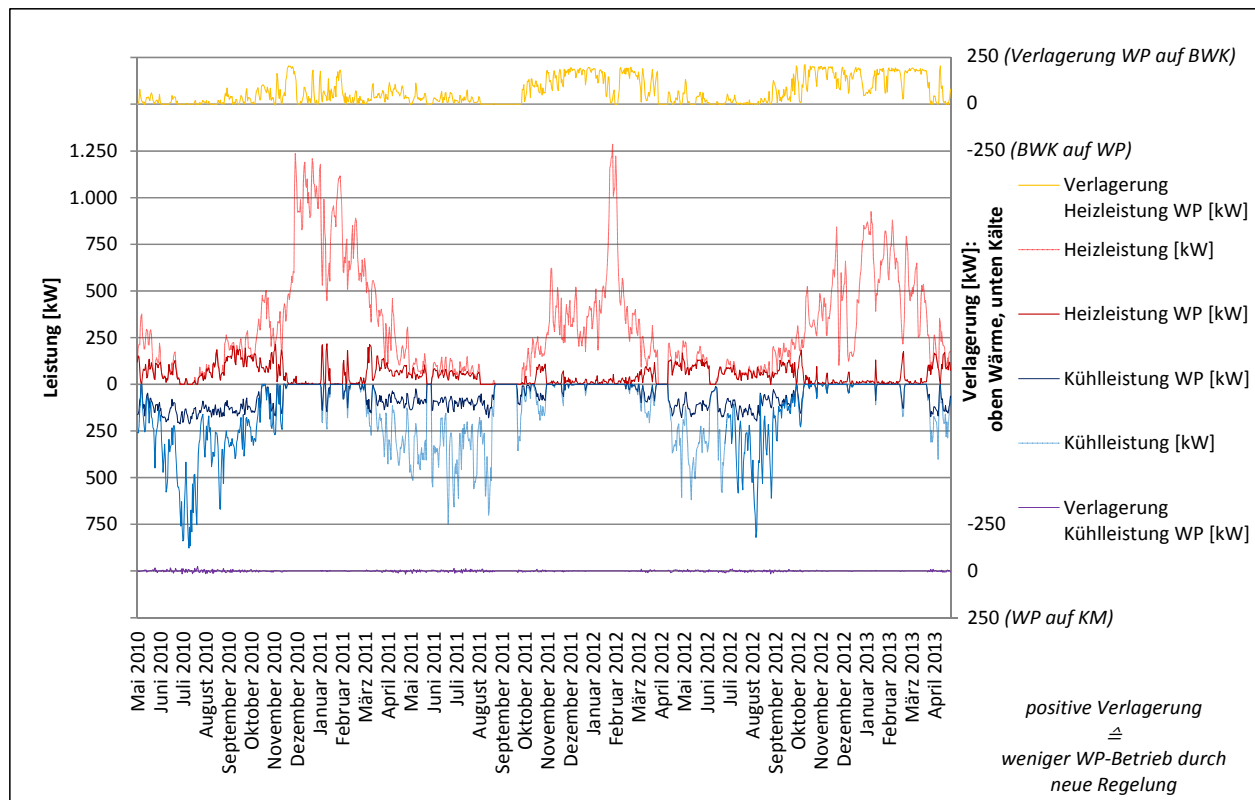


Abbildung 22: Basisvariante A, Wärme- und Kälteleistungsverteilung im ökonomischen Fall für den Betrachtungszeitraum, Tagesmittelwerte

Für den Heizbetrieb des Wärmepumpenmoduls werden in der folgenden **Abbildung 23** die klassische und ökonomische Regelungsvariante im Detail gegenübergestellt. Erneut wird deutlich, dass das Wärmepumpenmodul mit der ökonomischen Regelungsvariante kaum zum Einsatz kommt. Insbesondere in der Heizperiode (mit hoher Last und i. d. R. höheren Systemtemperaturen) wird es kaum noch eingesetzt. Das Erdreichmodul ist dadurch bei Nutzung deutlich wärmer. Die Leistungszahlen fallen i. d. R. minimal höher als mit der klassischen Regelungsvariante aus. Eine weitere Analyse wird aufgrund der geringen Laufzeit nicht vorgenommen, weil keine Effekte zu zeigen sind.

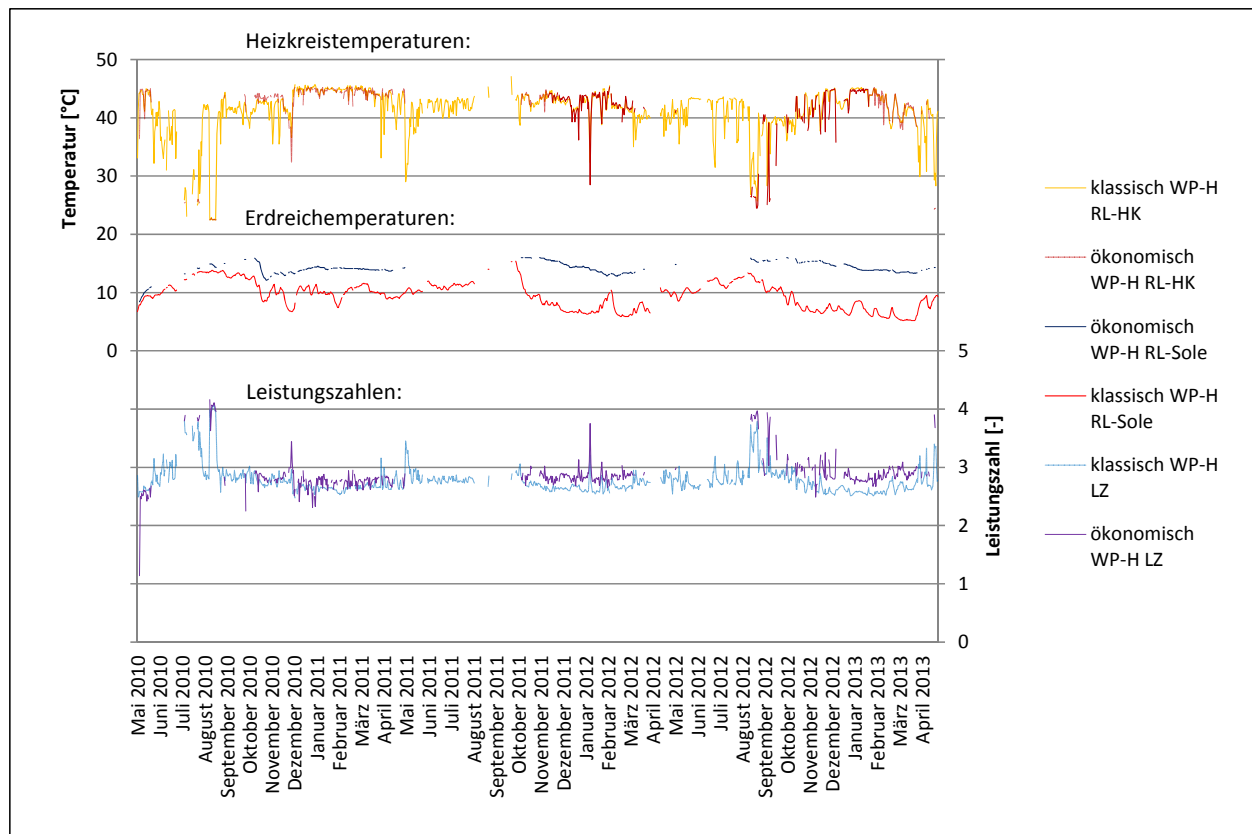


Abbildung 23: Basisvariante A, Leistungszahlen und Temperaturen der Wärmepumpe im Heizbetrieb für den Betrachtungszeitraum, Tagesmittelwerte

Auch auf eine genauere Darstellung und Analyse der ökologischen Regelungsvariante wird an dieser Stelle verzichtet, weil die geringen Effekte nicht zu erkennen sind. Für die Wärmeseite besteht keine sichtbare Veränderung gegenüber der klassischen Regelungsvariante. Die Kälteseite entspricht aufgrund desselben Energieträgers von Wärmepumpen- und Kältemaschinenmodul der ökonomischen Regelungsvariante.

Für den klassischen Grundlastbetrieb zeigt die folgende **Abbildung 24** die aus dem Erdreichmodul resultierenden Rücklauftemperaturen für das Wärmepumpenmodul. Es entsteht je ein Temperaturverlauf für den Heizfall (Wärmepumpenmodul WP-H entzieht Erdreichmodul Energie) und den Kühlfall (Wärmepumpenmodul WP-K erwärmt Erdreichmodul). Der rot dargestellte Verlauf in **Abbildung 23** stimmt mit dem in **Abbildung 24** in blau in höherer Skalierung dargestellten überein.

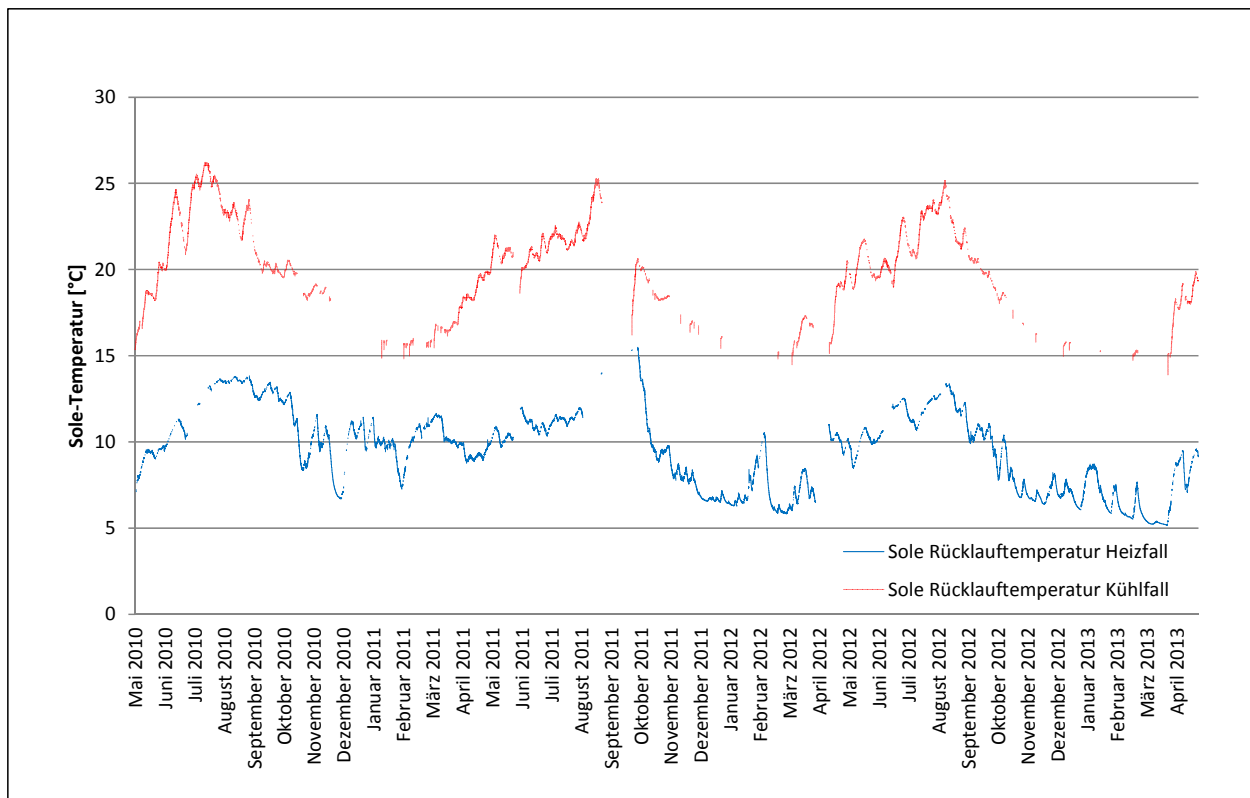


Abbildung 24: Basisvariante A, Rücklauftemperaturen des Erdreichmoduls, klassische Regelungsvariante über den Betrachtungszeitraum

Der zeitversetzte Betrieb der beiden Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K ist aufgrund der Auflösung nicht zu erkennen. Zu jedem Zeitpunkt besteht nur in einem der beiden Temperaturverläufe ein Wert, denn ein gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb ist nicht möglich und führt zum Einsatz des Wärmepumpenmoduls WP-S. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind gut zu erkennen. Im Sommer steigen die Temperaturen (insbesondere für Wärmepumpenmodul WP-K). Im Winter sinken diese aufgrund des Wärmeentzugs für das Wärmepumpenmodul WP-H.

5 Einflussfaktoren und Anwendungsgrenzen des Regelungsansatzes

In Kapitel 4 wurde die Basisvariante A detailliert beschrieben und der Bezug zu einer Realanlage hergestellt. Auf Basis eines aus Realdaten entwickelten Lastprofils über eine dreijährige Betriebsperiode konnte sie mit drei Regelungsvarianten simulatorisch vergleichend bewertet werden.

Durch systematische Variation der in Kapitel 4.5.2 benannten Parameter wird das Simulationsmodell im Folgenden auf das Lastprofil angewandt. Die Simulationsergebnisdaten über jeweils drei Jahre werden für jede Parametervariation mit den drei Regelungsvarianten gegenübergestellt und die Wirkung der unterschiedlichen Regelungsvarianten bewertet. Die Parametervariationen erfolgen für die vier in Kapitel 4.5.2 identifizierten Bereiche. Abschließend werden in Kapitel 5.5 die Ergebnisse mit Bezug auf die Basisvariante A vergleichend bewertet.

Für jede Parametervariation entsteht eine sogenannte Modellvariante. Diese werden in die folgenden Bereiche (entsprechend Kapitel 4.5.2) gruppiert:

- Temperaturen im Heizkreis (Modellvarianten B);
- Temperaturen des Erdreichmoduls (Modellvarianten C);
- Kennlinien des Wärmepumpenmoduls (Modellvarianten D);
- Energiepreise und CO₂-Emissionswerte (Modellvarianten E).

Die Einflüsse auf die Simulationsergebnisdaten werden in verschiedenen Variationen auf theoretischer Basis untersucht. Die Modellvarianten jeden Bereichs werden mit arabischen Ziffern gekennzeichnet.

In den folgenden Unterkapiteln werden nur für die Bewertung relevante Teile der Simulationsergebnisdaten ausgeführt. Die vollständigen Simulationsergebnisdaten, wie in Kapitel 4.6 für die Basisvariante A vorgestellt, sind im Anhang beigelegt. Mit den Modellvarianten B bis E können alle Parameter (vgl. Kapitel 4.5.2) untersucht werden.

5.1 Modellvarianten B: Temperaturen im Heizkreis

In den ersten Modellvarianten soll der Einfluss der Temperaturen im Heizkreis untersucht werden. Die Temperaturen (VL und RL) im Heizkreis werden dazu um einen fixen Betrag verschoben. Die Heizlast bleibt damit unverändert. Die in folgender **Tabelle 12** dargestellten vier Modellvarianten werden verglichen.

Tabelle 12: Modellvarianten B – Übersicht der Variationen der Heizkreistemperatur

	Veränderung gegenüber Basisvariante A	Bemerkung
B.1	Temperaturen HK - 10 K	Ø VL-Temp. HK = 33,9 °C
B.2	Temperaturen HK - 5 K	Ø VL-Temp. HK = 38,9 °C
A	-	Ø VL-Temp. HK = 43,9 °C
B.3	Temperaturen HK + 5 K	Ø VL-Temp. HK = 48,9 °C
B.4	Temperaturen HK + 10 K	Ø VL-Temp. HK = 53,9 °C

Die Simulation wird in zwei Punkten durch diese Variationen beeinflusst. Zum einen wird (schon mit der klassischen Regelungsvariante) die Grenztemperatur des Wärmepumpenmoduls das Simulationsverhalten ändern. Zum anderen nehmen die veränderten Heizkreistemperaturen direkt Einfluss auf die Leistungszahlen des Wärmepumpenmoduls, so dass mit der ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante unterschiedliches Einsparpotential besteht.

Dieses Verhalten ist in den Simulationsergebnisdaten folgender **Tabelle 13** zu erkennen.

Tabelle 13: Modellvarianten B – Wärmeerzeugung und durchschnittliche RL-Temperaturen des Wärmepumpenmoduls WP-H im Betrachtungszeitraum

	WP-H Wärmeerzeugung [MWh]			WP-H RL-Temp. Erdreichmodul [°C]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
B.1	2.589	227	2.594	6,5	13,1	6,5
B.2	2.545	177	2.545	6,8	13,5	6,8
A	2.004	129	1.994	7,9	14,0	8,0
B.3	401	14	403	12,6	15,9	12,6
B.4	57	2	57	15,1	16,0	15,1

Im dargestellten Ausschnitt reiht sich die Basisvariante A genau ein. Daher wird sie hier (und im Weiteren) zur besseren Vergleichbarkeit jeweils eingeordnet. Ersichtlich wird,

dass der Wärmeanteil des Wärmepumpenmoduls WP-H (ohne Simultanbetrieb) stark zurückgeht. Mit steigenden Temperaturen im Heizkreis wird in den Modellvarianten B.3 und B.4 regelmäßig die Grenztemperatur des Wärmepumpenmoduls von 45 °C überschritten. Dies verhindert den Einsatz mit noch niedrigeren Leistungszahlen. In entgegengesetzter Richtung steigt die Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls WP-H zu Modellvariante B.2, weil höhere Einsatzzeiten möglich werden. Der weitere minimale Anstieg zu Modellvariante B.1 ist in erster Linie der temperaturbedingt höheren Effizienz geschuldet, d. h. hier steigt die Wärmeerzeugung bei nahezu identischem Einsatzverhalten. Die hieraus resultierende Belastung spiegelt sich in den Temperaturen des Erdreichmoduls wieder. Je geringer der Einsatz des Wärmepumpenmoduls, desto höher sind die Temperaturen des Erdreichmoduls. Die resultierenden Leistungszahlen des Wärmepumpenmoduls WP-H sind in folgender **Tabelle 14** dargestellt.

Tabelle 14: Modellvarianten B – durchschnittliche Leistungszahlen Wärmepumpenmodul WP-H im Betrachtungszeitraum

	WP-H Leistungszahlen [-]		
	klassisch	monetär	ökologisch
B.1	3,14	3,53	3,15
B.2	2,87	3,18	2,87
A	2,70	2,94	2,70
B.3	2,85	2,93	2,85
B.4	3,02	3,00	3,02

Die Leistungszahlen fallen im Vergleich zur Basisvariante A in Modellvariante B.2 höher aus. Resultierend aus der niedrigsten Temperatur nehmen sie in Modellvariante B.1 die höchsten Werte an. Mit der klassischen und ökologischen Regelungsvariante steigen sie in den Modellvarianten B.3 und B.4 wieder an. Die Ursache hierfür liegt in den Temperaturen des Erdreichmoduls. Diese Temperatur steigt hier stärker als die Rücklauf-temperatur vom Heizkreis. Die Leistungszahl kann steigen, weil die Temperaturdifferenz des Wärmepumpenmoduls zwischen warmer und kalter Seite sinkt. Lediglich mit der ökonomischen Regelungsvariante sind die Soletemperaturen, bedingt durch den in allen Modellvarianten geringen Wärmepumpeneinsatz, durchweg hoch. Der Anstieg zu Modellvariante B.4 mit der ökonomischen Regelungsvariante ist durch den geringen Wärmepumpeneinsatz in diesem Fall nicht repräsentativ.

Für die anderen Erzeugermodule bestehen keine nennenswerten Unterschiede. Die Wärmeerzeugung wird vom Wärmepumpenmodul auf das Brennwertkesselmodul verlagert. Die Wirkungsgradänderung ist vernachlässigbar gering.

In der folgenden **Tabelle 15** werden die CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten der Modellvarianten B aufgezeigt.

Tabelle 15: Modellvarianten B – CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß [t]			Gesamtenergiekosten [€]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
B.1	2.137	2.257	2.137	353.298	336.427	353.382
B.2	2.218	2.308	2.218	367.412	343.855	367.473
A	2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
B.3	2.552	2.564	2.550	375.536	371.268	375.190
B.4	2.651	2.648	2.647	381.904	380.464	381.008

CO₂-Emissionen wie Gesamtenergiekosten steigen mit steigenden Heizkreistemperaturen unabhängig von der Regelungsvariante. Die Einsparungen durch die ökonomische und ökologische Regelungsvariante für die unterschiedlichen Modellvarianten sind in folgender **Tabelle 16** aufgezeigt.

Tabelle 16: Modellvarianten B – Einsparung CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß			Gesamtenergiekosten		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
B.1	-	-5,6 %	0,0 %	-	+4,8 %	0,0 %
B.2	-	-4,1 %	0,0 %	-	+6,4 %	0,0 %
A	-	-2,2 %	+0,1 %	-	+6,1 %	+0,1 %
B.3	-	-0,5 %	+0,1 %	-	+1,1 %	+0,1 %
B.4	-	+0,1 %	+0,2 %	-	+0,4 %	+0,2 %

Wie schon in der Basisvariante erzielt die ökologische Regelungsvariante in keiner Modellvariante nennenswerte Verbesserung. Die Heizkreistemperaturen haben aber einen starken Einfluss auf das Ergebnis mit der ökonomischen Regelungsvariante. Infolge der umfangreich abgeschalteten Wärmepumpenmodule, fällt das Ergebnis umso höher aus, desto mehr Einsatz mit der klassischen Regelungsvariante erfolgt. Diese Einsparung führt gleichzeitig zu erhöhten CO₂-Emissionen. In Modellvariante B.1 fallen die monetären Einsparungen wieder etwas geringer aus, weil hier das Wärmepumpenmodul WP-H im Heizbetrieb mit deutlich höheren Leistungszahlen (vgl. **Tabelle 14**) arbeitet.

5.2 Modellvarianten C: Temperaturen des Erdreichmoduls

Die Temperaturen des Erdreichmoduls nehmen ebenso großen Einfluss auf die Effizienz des Wärmepumpenmoduls bzw. der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K. Schon allein für eine natürliche Wärmequelle bzw. Wärmesenke sind verschiedenste Charakteristika vorstellbar. Nicht natürliche Quellen, wie z. B. Prozessabwärme, sollen hier nicht weiter berücksichtigt werden. Als natürliche Wärmequellen sind in Großanlagen insbesondere Grundwasser und durch Erdsonden o. ä. erschlossene Erdwärme vorstellbar. Grundwasser ist i. d. R. recht temperaturkonstant. Durch Erdsonden erschlossenes Erdreich kann hingegen sehr unterschiedliche Eigenschaften und Temperaturen haben. Art der Gesteinsschichten, des Grundwassers, Bohrtiefe und Sondenanzahl nehmen beispielsweise Einfluss. Eine vollumfängliche Variation ist nicht möglich. Es gilt ein Spektrum zu schaffen, mit welchem möglichst viele Eigenschaften abgedeckt werden. Die Temperaturen des Erdreichmoduls werden daher mit den folgenden fünf in **Tabelle 17** genannten Variationen untersucht.

Tabelle 17: Modellvarianten C – Übersicht der Variationen von Temperatur und Kapazität des Erdreichmoduls

	Veränderung gegenüber Basisvariante A	Bemerkung
C.1	Sole-RL-Temp. konstant 10 °C	$\triangleq$ Grundwasser idealisiert
C.2	Temperaturverschiebung + 5 K (Sole)	wärmeres Erdreich
C.3	Temperaturverschiebung - 5 K (Sole)	kälteres Erdreich
C.4	Belastung Erdreichmodul + 50 % (50 % mehr Sole ins Erdreichmodul)	geringere Kapazität (z. B. weniger Erdsonden)
C.5	Belastung Erdreichmodul - 50 % (50 % weniger Sole ins Erdreichmodul)	höhere Kapazität (z. B. mehr Erdsonden)

In Modellvariante C.1 ist das Erdreichmodul faktisch funktionslos, weil die Rücklauftemperaturen (zum Wärmepumpenmodul) durch eine Konstante ersetzt werden. In den anderen Modellvarianten bleibt das Erdreichmodul in Attribuierung und betriebenem Temperaturbereich unverändert. Lediglich am jeweiligen Vor- und Rücklauf zu den Wärmepumpenmodulen WP-H und WP-K verändern die Parameter die Aktionen und Reaktionen des Erdreichmoduls. Hier findet eine pauschale Temperaturverschiebung (C.2 und C.3) bzw. eine Volumenstromänderung (C.4 und C.5) an allen vier Schnittstellen zwischen Wärmepumpenmodul und Erdreichmodul statt.⁹⁰

Da schon das verwendete Erdreichmodul eine starke Vereinfachung darstellt, vgl. Kapitel 4.3, bilden die Modellvarianten C.2 bis C.5 nur sehr fiktive Fälle nach. Es gilt hiermit weniger, unterschiedliche Erdreichsimulationen durchzuführen, sondern den Effekt unterschiedlicher Temperatureinflüsse aus dem Erdreichmodul auf das Simulationsmodell unter Anwendung der unterschiedlichen Regelungsvarianten zu untersuchen.

Das Simulationsverhalten kann (analog Modellvarianten B) durch diese Variation in zwei Punkten beeinflusst werden. Zum einen könnte (schon mit der klassischen Regelungsvariante) die Grenztemperatur der Sole (Rücklauftemperatur aus Erdreichmodul über 0 °C) das Verhalten ändern. Zum anderen nehmen die resultierenden Temperaturen direkt Einfluss auf die Leistungszahlen des Wärmepumpenmoduls, so dass mit der ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante verändertes Einsparpotential besteht.

In **Abbildung 25** und **Abbildung 26** werden zunächst die resultierenden Temperaturverläufe des Erdreichmoduls in den Modellvarianten C.2 bis C.5 mit klassischer Regelungsvariante aufgezeigt. Auf die Darstellung der konstanten Temperatur der Modellvariante C.1 wird verzichtet. Der Temperaturverlauf des Erdreichmoduls in der Basisvariante ist als Vergleich **Abbildung 24** zu entnehmen. Die folgende **Abbildung 25** zeigt zunächst die Temperaturverläufe der Modellvarianten C.2 und C.3 mit der klassischen Regelungsvariante.

⁹⁰ In den Modellvarianten C.2 und C.3 bleibt das Erdreichmodul im ursprünglichen Temperaturbereich. Die beiden Rücklauftemperaturen aus dem Erdreichmodul werden um den konstanten Parameter verschoben, so dass dem Wärmepumpenmodul andere Soletemperaturen zur Verfügung stehen. Die Vorlauftemperatur wird um gleichen Parameter wieder zurück verschoben, damit die Leistungsbilanz unverändert bleibt.

In den Modellvarianten C.4 und C.5 wird der Volumenstrom ins Erdreich multiplikativ verändert. D. h. das Erdreichmodul wird mit einem gegenüber dem Wärmepumpenmodul abweichenden Volumenstrom belastet. Hierdurch findet eine um hier 50 % höhere bzw. niedrigere Belastung des Erdreichmoduls statt.

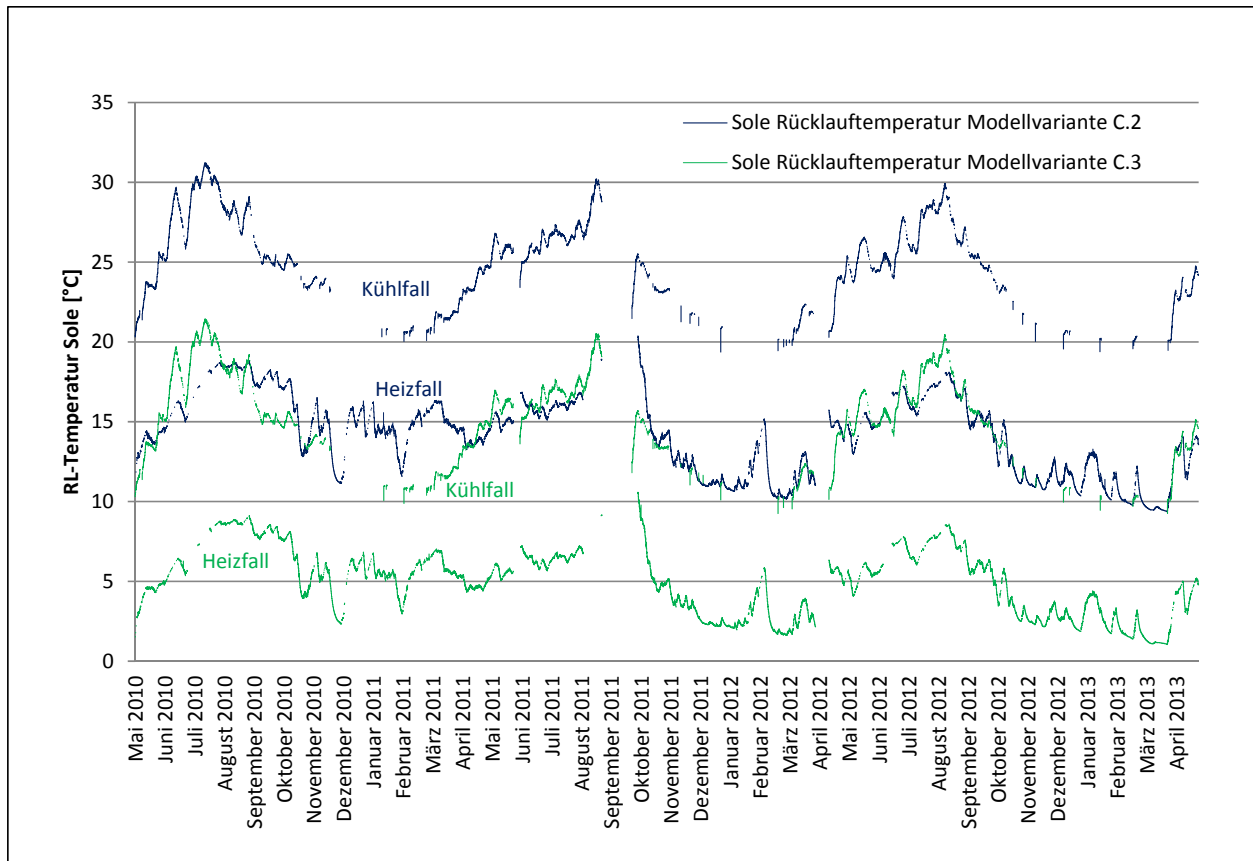


Abbildung 25: Modellvarianten C.2 und C.3 – Rücklauftemperatur des Erdreichmoduls mit klassischer Regelungsvariante

Die jeweils obere Linie zeigt den Kühlfall (Erdreich $\triangleq$ Wärmesenke), die jeweils untere Linie zeigt den Heizfall (Erdreich $\triangleq$ Wärmequelle).

Für jede Modellvariante entstehen zwei Temperaturverläufe im Erdreichmodul, weil die Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K an das Erdreichmodul angeschlossen sind und unterschiedliche Reaktionen verursachen. Je ein Verlauf stellt den Heizfall (Wärmepumpenmodul WP-H) und einen den Kühlfall (Wärmepumpenmodul WP-K) dar. Gegenüber der Basisvariante A sind die Verläufe hier um weniger als 5 K nach oben bzw. unten verschoben. Ursächlich ist die veränderte Effizienz des Wärmepumpenmoduls. Höhere Temperaturen im Erdreichmodul führen zu besseren Leistungszahlen im Heizfall (Wärmepumpenmodul WP-H). Dem Erdreichmodul muss bei gleicher Laufzeit mehr Wärme entzogen werden, die Temperaturen sinken stärker. Hierdurch steigt die Leistungszahl von 2,70 (A) auf 2,89 (C.2), vgl. **Tabelle 19**. Die durchschnittliche Temperatur des Erdreichmoduls (für Wärmepumpenmodul WP-H) liegt mit 12,4 °C (C.2) statt 7,9 °C (A) nur 4,5 K höher. Niedrigere Temperaturen im Erdreichmodul (C.3) führen im umgekehrten Fall zur höheren elektrischen Leistungsaufnahme und geringerem Entzug aus dem Erdreichmodul. Die Temperatur des Erdreichmoduls fällt im Schnitt nur 4,3 K niedriger aus, vgl. **Tabelle 18**.

Für die Modellvarianten C.4 und C.5 wird entsprechender Verlauf in folgender **Abbildung 26** dargestellt.

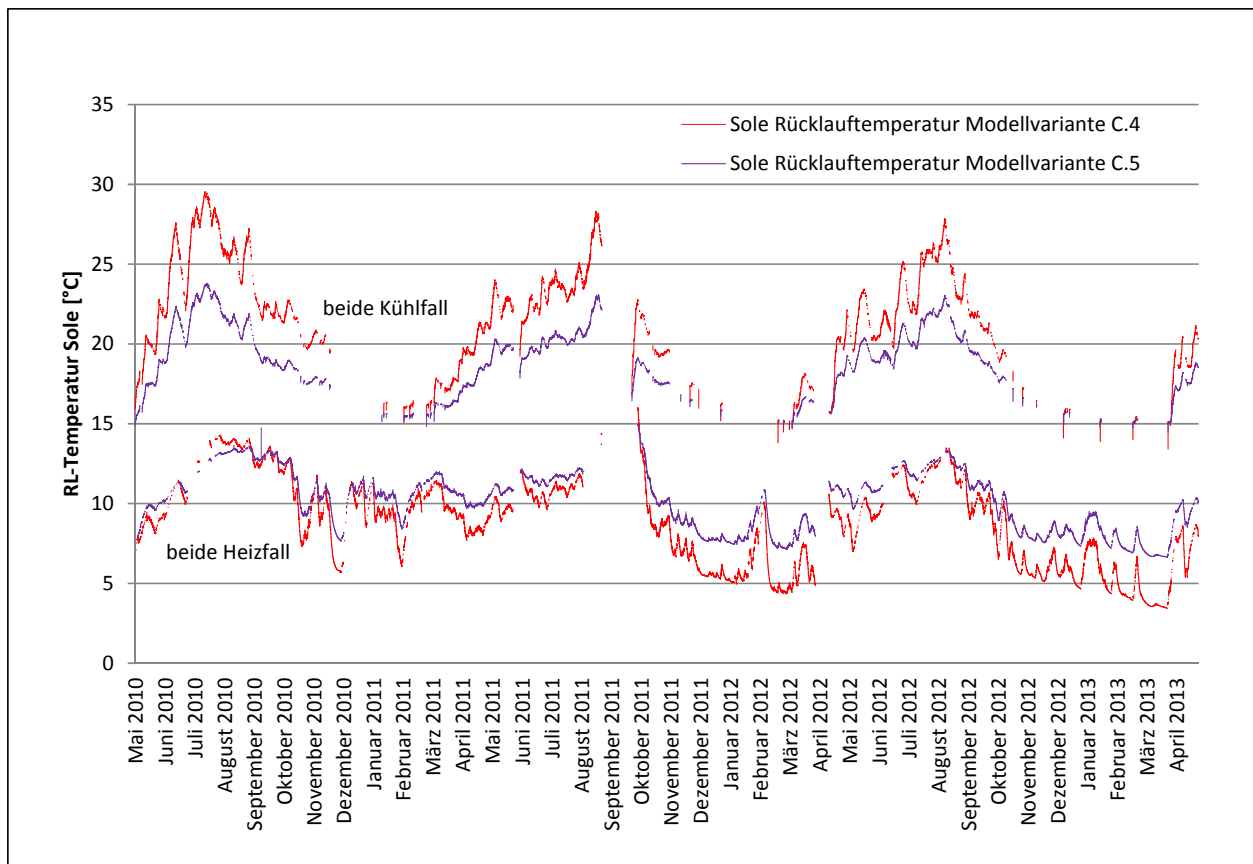


Abbildung 26: Modellvariante C.4 und C.5 – Rücklauftemperatur des Erdreichmoduls mit klassischer Regelungsvariante

Die beiden oberen Linien zeigen den Kühlfall (Erdreich $\triangleq$ Wärmesenke), die beiden unteren Linien zeigen den Heizfall (Erdreich $\triangleq$ Wärmequelle).

Geringere Belastungen ($\triangleq$ größeres Erdsondenfeld) des Erdreichmoduls führen zu einer flacheren Temperaturspreizung, ein kleineres Erdsondenfeld zu extremeren Temperatureauschlägen.

In **Abbildung 25** und **Abbildung 26** wird ersichtlich, dass in allen Modellvarianten mit klassischer Regelungsvariante die Temperatur des Erdreichmoduls durchgängig über 0 °C liegt. Mit ökonomischer und ökologischer Regelungsvariante wird der Einsatz des Wärmepumpenmoduls niedriger und die Erdreichtemperatur somit durchweg höher ausfallen. Die Grenztemperatur des Wärmepumpenmoduls, welche positive Temperaturen im Erdreichmodul fordert, nimmt somit keinen Einfluss.

Folgende **Tabelle 18** zeigt die erzeugten Wärmemengen des Wärmepumpenmoduls WP-H und die durchschnittlichen Temperaturen des Erdreichmoduls. Die Temperaturen des Heizkreises nehmen am Wärmepumpenmodul mit näherungsweise identischen 41,51 °C bis 42,1 °C in den unterschiedlichen Modellvarianten kaum Einfluss.

Tabelle 18: Modellvarianten C – Wärmeerzeugung und durchschnittliche RL-Temperaturen des Wärmepumpenmoduls WP-H im Betrachtungszeitraum

	WP-H Wärmeerzeugung [MWh]			WP-H RL-Temp. Erdreichmodul [°C]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
C.1	2.099	126	2.094	10,0	10,0	10,0
C.2	2.186	136	2.184	12,4	18,9	12,4
A	2.004	129	1.994	7,9	14,0	8,0
C.3	1.788	126	1.782	3,6	9,1	3,6
C.4	1.950	130	1.948	6,9	13,8	6,8
A	2.004	129	1.994	7,9	14,0	8,0
C.5	2.045	132	2.039	8,9	14,0	8,9

Zwischen den Modellvarianten C.2 und C.3 und der Basisvariante A besteht eine direkte Vergleichsmöglichkeit. Gleiches gilt für die Modellvarianten C.4 und C.5. Das wärmere Erdreichmodul der Modellvariante C.2 bzw. die höhere Speicherkapazität in Modellvariante C.5 führen jeweils zu höheren Rücklauftemperaturen aus dem Erdreichmodul zum Wärmepumpenmodul WP-H. Dies zeigten auch schon **Abbildung 25** und **Abbildung 26**. Höhere Temperaturen im Erdreichmodul führen bei gleicher Einsatzzeit zu besseren Leistungszahlen und größeren Wärmemengen des Wärmepumpenmoduls WP-H. Für jede der drei Regelungsvarianten ist eine Abhängigkeit von der Temperatur des Erdreichmoduls und erzeugter Wärmemenge feststellbar. Je wärmer die Rücklauftemperaturen aus dem Erdreichmodul sind, desto höher werden die erzeugten Wärmemengen.⁹¹ Diese Abhängigkeit spiegelt sich auch in den Leistungszahlen wieder. Diese sind folgender **Tabelle 19** zu entnehmen.

⁹¹ Mit steigender Temperatur des Erdreichmoduls lautet die Reihenfolge: C.3, C.4, A, C.5, C.1, C.2.

Lediglich die Modellvariante C.4 mit der ökonomischen Regelungsvariante zeigt einen um 0,5 MWh höheren Einsatz des Wärmepumpenmoduls als die Basisvariante auf. Ursächlich sind die Trägheit der Regler und das Nachlaufen der Wärmepumpenmodule. Aufgrund der minimalen Abweichung wird hier keine weiterreichende Analyse vorgenommen.

Tabelle 19: Modellvarianten C – durchschnittliche Leistungszahlen Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum

	WP-H Leistungszahlen [-]			WP-K Leistungszahlen [-]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
C.1	2,78	2,76	2,79	5,97	5,98	5,97
C.2	2,89	3,14	2,89	3,57	3,51	3,57
A	2,70	2,94	2,70	4,10	4,04	4,10
C.3	2,55	2,74	2,55	4,76	4,69	4,75
C.4	2,66	2,94	2,66	3,89	3,83	3,92
A	2,70	2,94	2,70	4,10	4,04	4,10
C.5	2,74	2,94	2,74	4,28	4,24	4,28

Die Temperaturen des Erdreichmoduls haben auch auf die Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls WP-K Einfluss. Der Zusammenhang wird schon in den Leistungszahlen (vgl. **Tabelle 19**) ersichtlich. Sie stehen in direkter Abhängigkeit zur Rücklauftemperatur aus dem Erdreichmodul. Die Leistungszahlen der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K in den Modellvarianten C.2 und C.3 sind gegenläufig. Der positive Effekt eines wärmeren Erdreichmoduls für die Wärme-erzeugung (WP-H) ist für die Kälte-erzeugung (WP-K) negativ und umgekehrt. Die höhere Speicherkapazität in Modellvariante C.5 führt, wie schon in **Abbildung 26** erkennbar, zu niedrigeren Temperaturschwankungen im Erdreichmodul. Diese wirken positiv auf die Wärme- und Kälte-erzeugung der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K. In Modellvariante C.5 weisen daher die Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K höhere Leistungszahlen aus. In Modellvariante C.4 liegt hingegen für beide eine entsprechend niedrige Leistungszahl vor. Modellvariante C.1 stellt diesbezüglich einen Sonderfall dar. Das Erdreichmodul ist mit 10 °C deutlich kühler als der Kühlkreis des Gebäudes. Eine direkte Kühlung mittels Wärmetauscher wäre sinnvoll. Die errechneten Leistungszahlen bei Einsatz des Wärmepumpenmoduls werden in der Praxis nicht sicher erreicht. Hier liegen niedrige Temperaturdifferenzen vor, welche zu Abweichungen im Wärmeübergang des Wärmetauschers und der Einschaltung der Wärmepumpe führen.

In der folgenden **Tabelle 20** werden die CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten der Modellvarianten aufgezeigt.

Tabelle 20: Modellvarianten C – CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß [t]			Gesamtenergiekosten [€]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
C.1	2.258	2.326	2.258	364.704	343.810	364.609
C.2	2.302	2.384	2.302	374.969	355.488	374.911
A	2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
C.3	2.328	2.353	2.327	373.104	349.063	372.943
C.4	2.333	2.375	2.332	376.956	353.586	376.843
A	2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
C.5	2.305	2.362	2.305	373.100	350.995	372.948

Während Modellvariante C.1 im Vergleich nennenswert günstiger ausfällt, ist zwischen den anderen Modellvarianten (C.2 bis C.5) nur ein geringer Unterschied festzustellen.

In Modellvariante C.2 stehen die Einsparungen in der Wärmeerzeugung gegenüber Basisvariante A höheren Energiekosten bzw. CO₂-Emissionen in der Kälteerzeugung gegenüber. Beide sind durch das wärmere Erdreichmodul für die Wärmepumpenmodule WP-H (Einsparung) und WP-K (Kostensteigerung) verursacht. Modellvariante C.3 zeigt umgekehrtes Verhalten. Hier fallen die Einsparungen der Wärmeerzeugung gegenüber Basisvariante A geringer aus. Dies wird aber mit einer günstigeren Kälteerzeugung wieder relativiert.

Zwischen den Modellvarianten C.4, C.5 und der Basisvariante A ist eine eindeutige Rangfolge feststellbar. Der Unterschied in den CO₂-Emissionen oder Gesamtenergiekosten fällt aber deutlich geringer als in den Modellvarianten B aus. Dies liegt ursächlich an den geringen Temperaturunterschieden im Erdreichmodul. Für die klassische Regelungsvariante liegen diese mit 6,9 °C (C.4) bzw. 8,9 °C (C.5) deutlich näher beieinander als die Heizkreistemperaturen in den Modellvarianten B (insbesondere B.1 bis B.3). Zwischen den Modellvarianten C.4 und C.5 beträgt der Unterschied der CO₂-Emissionen 28 t und der Gesamtenergiekosten 3.856 €. Zwischen den Modellvarianten B.1, B.2 und B.3 hingegen beträgt der Unterschied der CO₂-Emissionen 81 t bzw. 334 t und der Gesamtenergiekosten 14.114 € bzw. 8.124 €.

Für die Beurteilung einer Wirkung der neuen Regelstrategie ist ein Vergleich der resultierenden Einsparungen erforderlich. Diese sind in folgender **Tabelle 16** aufgezeigt.

Tabelle 21: Modellvarianten C – Einsparung CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß			Gesamtenergiekosten		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
C.1	-	-3,0 %	0,0 %	-	+5,7 %	0,0 %
C.2	-	-3,6 %	0,0 %	-	+5,2 %	0,0 %
A	-	-2,2 %	+0,1 %	-	+6,1 %	+0,1 %
C.3	-	-1,1 %	0,0 %	-	+6,4 %	0,0 %
C.4	-	-1,8 %	0,0 %	-	+6,2 %	0,0 %
A	-	-2,2 %	+0,1 %	-	+6,1 %	+0,1 %
C.5	-	-2,5 %	0,0 %		+5,9 %	0,0 %

Die Einsparungen durch die ökonomische bzw. ökologische Regelungsvariante fallen durchweg ähnlich hoch aus wie in den Modellvarianten B.1 und B.2. Dies liegt darin begründet, dass auch hier mit der ökonomischen Regelungsvariante große Teile der Wärmeerzeugung von Wärmepumpenmodul WP-H auf das Brennwertkesselmodul verlagert werden, während die ökologische Regelungsvariante nahezu keine Änderung gegenüber der klassischen zeigt.

5.3 Modellvarianten D: Kennlinien des Wärmepumpenmoduls

Im folgenden Kapitel werden die Wärmepumpenkennlinien direkt verändert. Hier wird nun einerseits die Kennlinie einer weiteren Wärmepumpe WP-II⁹² verwendet. Sie hat einen niedrigeren Wirkungsgrad als Wärmepumpe WP-I der Basisvariante A. Andererseits werden die Kennlinien der Wärmepumpe WP-I dreifach verändert. Hierdurch entstehen fiktive Wärmepumpen. Folgende **Tabelle 22** stellt die vier Variationen gegenüber.

Tabelle 22: Modellvarianten D – Übersicht der Kennlinienvariationen des Wärmepumpenmoduls

	Veränderung gegenüber Basisvariante A	Bemerkung
D.1	Kennlinien der WP-II	andere Kennlinien, insbesondere höherer Energiebedarf, COP etwa 5 % bis 9 % niedriger
D.2	Doppelte Leistungsaufnahme (P_{el}) der Solepumpe (WP-I)	höherer Energiebedarf, COP niedriger
D.3	$\dot{Q}_h + 10 \%$ (WP-I)	$\dot{Q}_h$ und $\dot{Q}_k$ höher, COP + 10 %
A	-	(WP-I)
D.4	$\dot{Q}_h - 10 \%$ (WP-I)	$\dot{Q}_h$ und $\dot{Q}_k$ niedriger, COP - 10 %

Die durch diese Änderungen resultierenden Kennlinien und Leistungszahlen können dem Anhang (**Abbildung 31** bis **Abbildung 38** und **Tabelle 45** bis **Tabelle 48**) entnommen werden.

Die Modellvarianten D.1 und D.2 führen mit der klassischen Regelungsvariante zu niedrigeren Leistungszahlen bei vergleichbarer Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls. Modellvariante D.3 führt zu einer höheren Wärme- und Kälteerzeugung bei besseren Leistungszahlen gegenüber der Basisvariante A. Modellvariante D.4 weist dazu im Gegensatz eine niedrigere Wärme- und Kälteerzeugung bei schlechteren Leistungszahlen auf. Dieser Zusammenhang wird in folgender **Tabelle 23** ersichtlich, die Leistung des Wärmepumpenmoduls WP-S ist hierin nicht berücksichtigt.

⁹² Die verwendeten Kennlinien der WP-II stammen vom gleichen deutschen Wärmepumpenhersteller wie die der WP-I, welche in der Basisvariante A zum Einsatz kommt. Um die erforderliche Leistung zu erzielen, wird hier der Einsatz eineinhalb gleicher Wärmepumpen angenommen. Die abgebildeten Kennlinien berücksichtigen dies. Hiermit wird eine direkte Vergleichbarkeit gewährleistet.

Tabelle 23: Modellvarianten D – Wärme- bzw. Kälteerzeugung Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum

	WP-H Wärmeerzeugung [MWh]			WP-K Kälteerzeugung [MWh]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
D.1	1.983	120	1.981	885	791	860
D.2	2.011	120	1.995	891	722	790
D.3	2.149	148	2.146	1.044	977	1.049
A	2.004	129	1.994	910	855	913
D.4	1.839	113	1.836	781	674	731

Die Erzeugung der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K sind in den Modellvarianten D.1 und D.2 trotz der unabhängigen Kennlinien insbesondere auf der Wärmeseite sehr ähnlich. Gegenüber der Basisvariante A wird jedoch deutlich weniger Kälte erzeugt. Basisvariante A, Modellvarianten D.3 und D.4 zeigen mit allen Regelungsvarianten eine klare Tendenz; die größte Erzeugung erfolgt in Modellvariante D.3 und die niedrigste in Modellvariante D.4.

Tabelle 24: Modellvarianten D – durchschnittliche Leistungszahlen der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum

	WP-H Leistungszahlen [-]			WP-K Leistungszahlen [-]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
D.1	2,47	2,55	2,47	3,83	3,81	3,86
D.2	2,51	2,67	2,50	3,56	3,60	3,64
D.3	2,91	3,24	2,91	4,52	4,44	4,51
A	2,70	2,94	2,70	4,10	4,04	4,10
D.4	2,48	2,62	2,48	3,67	3,69	3,72

Diese klare Tendenz wird auch in den Leistungszahlen der **Tabelle 24** ersichtlich. Die Leistungszahlen der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K differieren in den Modellvarianten D.1 und D.2 hingegen stark. Die Temperaturen an den Wärmepumpenmodulen sind hierfür kaum ursächlich, sie stimmen zwischen den einzelnen Modellvarianten bei gleicher Regelungsvariante nahezu überein. Auf eine gesonderte Ausweisung wird daher an dieser Stelle verzichtet und auf den Anhang (**Tabelle 49**) verwiesen. Die Unterschiede in den Leistungszahlen resultiert im Wesentlichen aus den unterschiedlichen Kennlinien des Wärmepumpenmoduls. Sie beeinflussen folglich auch die CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten. In folgender **Tabelle 25** sind diese gegenüber gestellt.

Tabelle 25: Modellvarianten D – CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß [t]			Gesamtenergiekosten [€]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
D.1	2.398	2.414	2.398	390.646	361.113	390.456
D.2	2.368	2.384	2.365	385.015	355.251	384.253
D.3	2.241	2.324	2.241	362.563	344.259	362.454
A	2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
D.4	2.400	2.415	2.399	387.973	360.563	387.710

Modellvariante D.3 weist mit den hohen Leistungszahlen des Wärmepumpenmoduls die niedrigsten CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten aus. Die drei weiteren Modellvarianten zeigen gegenüber der Basisvariante A relativ hohe CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten. Dabei ist (entsprechend der Konzeption der Kennlinien) eine eindeutige Reihenfolge zwischen Basisvariante A, Modellvariante D.3 und Modellvariante D.4 auszumachen.

Die Einsparungen der unterschiedlichen Regelungsvarianten für die Modellvarianten D sind in folgender **Tabelle 26** gegenüber gestellt.

Tabelle 26: Modellvarianten D – Einsparung CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß			Gesamtenergiekosten		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
D.1	-	-0,6 %	0,0 %	-	+7,6 %	0,0 %
D.2	-	-0,7 %	+0,1 %	-	+7,7 %	+0,2 %
D.3	-	-3,7 %	0,0 %	-	+5,0 %	0,0 %
A	-	-2,2 %	+0,1 %	-	+6,1 %	+0,1 %
D.4	-	-0,6 %	0,0 %	-	+7,1 %	+0,1 %

Die monetären Einsparungen fallen mit der ökonomischen Regelungsvariante durchweg ähnlich hoch aus wie in den Modellvarianten B.1, B.2 und C. Dies liegt wieder darin begründet, dass große Teile der Wärmeherzeugung vom Wärmepumpenmodul auf das Brennwertkesselmodul verlagert werden. Die ökologische Regelungsvariante zeigt auch hier nahezu keine Wirkung.

5.4 Modellvarianten E: Energiepreise und CO₂-Emissionswerte

Nachdem Einflussfaktoren (Heizkreis- und Soletemperaturen) und Kennlinien der Wärmepumpen verändert wurden, wird folgend der Einfluss der Energiepreise und CO₂-Emissionswerte untersucht. Die Betrachtung erfolgt analog zur Basisvariante A mit über den Simulationszeitraum unveränderlichen Werten. Der Effekt verschiedener Extremwerte ist so einfacher zu beurteilen, weil ein direkter Zusammenhang zwischen Ergebnis und Energiepreisen bzw. CO₂-Emissionswerten besteht und nicht einzelne Phasen betrachtet werden müssen.

Für die Wahl der Erzeugermodule mit der ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante ist lediglich das Preisverhältnis von Strom und Gas bzw. das deren CO₂-Emissionswerten relevant. Der CO₂-Emissionswert von Gasbrennwertkesseln kann als dauerhaft konstant angenommen werden. Bedeutende Wirkungsgradsteigerungen sind schon aus physikalischen Gründen für Gasbrennwertkessel nicht möglich.⁹³ Der CO₂-Emissionswert für Strom schwankt im Betrachtungszeitraum nur unwesentlich zwischen 564 g/kWh_{el.} und 579 g/kWh_{el.} (vgl. **Abbildung 5**). Das Preisverhältnis hingegen steigt von 3,0 auf 3,4.⁹⁴ Mit den Modellvarianten muss mindestens dieses Spektrum abgedeckt werden, um auf Basis der Extremwerte den minimalen und maximalen Einfluss beurteilen zu können.

Drei Modellvarianten werden für die Auswertung der Einflüsse aus Energiepreisen bzw. deren CO₂-Emissionswerten erstellt. Modellvariante E.1 ist mit den letzten Preisen, die zum Zeitpunkt der Simulationsauswertungen beim Statistischen Bundesamt verfügbar waren, parametrisiert. Modellvariante E.2 nimmt einen höheren Strom- und niedrigeren Gaspreis an. Dieses Szenario könnte durch den im Jahr 2014 stark gesunkenen Rohölpreis und einen höheren Anteil regenerativen Stroms entstehen. Der regenerative Strom führt gleichzeitig zu einem geringeren CO₂-Emissionswert. In Modellvariante E.3 werden hingegen stark gesunkene Strompreise aber auch ein weiter gesunkener CO₂-Emissionswert untersucht. Dieses Szenario könnte z. B. durch den Einsatz eines BHKWs bei anderweitiger Verwendung der Wärme begründet sein. Der CO₂-Emissionswert ist daher mit dem des Gaskessels gleichgesetzt, weil moderne BHKWs mit einem Gesamtwirkungsgrad von 99 %⁹⁵ betrieben werden können.

In den drei Modellvarianten wird keine vollumfängliche Variation der CO₂-Emissionswerte für Strom vorgenommen. Es werden gegenüber der Basisvariante A nur niedrigere CO₂-Emissionswerte angenommen. Dies begünstigt zwar das Wärmepumpenmodell

⁹³ Vgl. Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2013, S. 604.

⁹⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung, 2014, S. 22 u. S. 49, bzw. Tabelle 3.

⁹⁵ Vgl. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (Hrsg.), BHKW-Kenndaten 2011, 2011, S. 9.

einseitig. Jede andere Annahme (höhere CO₂-Emissionswerte für Strom) widerspricht aber dem politischen Willen, den regenerativen Anteil am Stromverbrauch auf 40 % bis 45 % im Jahr 2025 und auf 80 % im Jahr 2050 zu steigern.⁹⁶

In folgender **Tabelle 27** sind die drei Modellvarianten mit den Werten der Parameter gegenüber gestellt.

Tabelle 27: Modellvarianten E – Übersicht der Variationen von Energiepreisen und CO₂-Emissionswerten

	Veränderung gegenüber Basisvariante A			Preis-verhältnis	Bemerkung
	Strompreis [€/MWh]	Gaspreis [€/MWh]	CO ₂ Strom [t/MWh]		
A	112,0	31	0,562	3,61	
E.1	127,2 (+ 14 %)	38 (+ 23 %)	(± 0 %)	3,35	Preise 2. HJ 2013, vgl. Tabelle 3
E.2	150 (+ 20 %)	25 (- 42 %)	0,350 (- 38 %)	6,00	fallender Gaspreis, steigender Anteil regenerativen Stroms
E.3	100 (- 45 %)	38 (+ 42 %)	0,251 (- 18 %)	2,63	z. B. Strom aus eigenem BHKW

Energiepreis und CO₂-Emissionswert sind in den Auswertungen voneinander unabhängig. Der Energiepreis nimmt nur mit der ökonomischen und der CO₂-Emissionswert nur mit der ökologischen Regelungsvariante Einfluss. Lediglich in der Berechnung der CO₂-Emissionen für die ökonomische und der Gesamtenergiekosten für die ökologische Regelungsvariante besteht eine Abhängigkeit. Effekte hieraus sind hier aber nicht von Bedeutung.

Das Spektrum des Preisverhältnisses von Strom und Gas (2,63 bis 6,00) deckt die Veränderungen im Betrachtungszeitraum mehr als umfassend ab, vgl. auch Preise für Industrie- und Privatkunden in **Tabelle 3**. Mit diesem breiten Spektrum kann gleichzeitig die Heterogenität von Lieferverträgen unterschiedlicher Kundentypen abgedeckt werden.

In folgender **Tabelle 28** ist die Wärmeerzeugung der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-S dargestellt.

⁹⁶ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, 2014, S. 7.

Tabelle 28: Modellvarianten E – Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls im Betrachtungszeitraum

	WP-H Wärmeerzeugung [MWh]			WP Wärmeerzeugung [MWh] (WP-H + WP-S)		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
A	2.004	129	1.994	3.107	1.310	3.103
E.1		141			1.319	
E.2		121	2.002		1.308	3.105
E.3		1.318	2.000		2.423	3.103

Mit der klassischen Regelungsvariante stimmen die Modellvarianten E mit Basisvariante A überein, weil die Eigenschaftsfaktoren keinen Einfluss nehmen. Das Wärmepumpenmodul wird hier unabhängig von den Eigenschaftsfaktoren als Grundlastherzeuger eingesetzt. Auch die Erzeugerverteilung mit der ökologischen Regelungsvariante von Basisvariante A und Modellvariante E.1 stimmen aufgrund der unveränderten CO₂-Emissionswerte überein.

Die Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls nimmt mit der ökonomischen Regelungsvariante mit steigendem Preisverhältnis von Strom zu Gas ab. Modellvariante E.3 zeigt beim niedrigsten Preisverhältnis die höchste Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls. Dies gilt sowohl für das Wärmepumpenmodul WP-H als auch die gesamte Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls (WP-H und WP-S). Die ökologische Regelungsvariante ist hiervon unabhängig.

Folgende **Tabelle 29** zeigt die Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls.

Tabelle 29: Modellvarianten E – Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls im Betrachtungszeitraum

	WP-K Kälteerzeugung [MWh]			WP Kälteerzeugung [MWh] (WP-K + WP-S)		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
A	910	855	913	1.689	1.689	1.697
E.1		860			1.692	
E.2		857	912		1.695	1.692
E.3		910	913		1.691	1.693

Die alleinige Betrachtung der Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls WP-K zeigt für Modellvariante E.3 mit der ökonomischen Regelungsvariante einen relativ hohen Wert. Dieser Wert wird durch den geringen Simultanbetrieb des Wärmepumpenmoduls

(WP-S) wieder ausgeglichen. Die gesamte Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls (WP-K und WP-S) fällt mit der ökonomischen Regelungsvariante in allen Modellvarianten E ähnlich hoch aus. Für den Unterschied im Wärmepumpenmodul WP-K ist der geringere Einsatz des Wärmepumpenmoduls WP-S ursächlich. Dieses wiederum resultiert aus dem hohen Wärmeanteil des Wärmepumpenmoduls WP-H, vgl. **Tabelle 28**. Ansonsten nehmen die unterschiedlichen Parameter keinen Einfluss auf den Einsatz der Kälteerzeugermodule.

Temperaturen und Wirkungsgrad bzw. Leistungszahlen der Erzeugermodule sind mit den drei Regelungsvarianten jeweils ähnlich und werden an dieser Stelle nicht ausgewiesen. Sie sind dem Anhang (**Tabelle 51**) zu entnehmen. Lediglich die ökonomische Regelung der Modellvariante E.3 führt zu niedrigeren Soletemperaturen (9,7 °C statt 14 °C), weil das Wärmepumpenmodul einen höheren Anteil übernimmt.

Folgende **Tabelle 30** zeigt die CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten. Sie sind direkt von den hier vorgenommenen Parametervariationen abhängig.

Tabelle 30: Modellvarianten E – CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß [t]			Gesamtenergiekosten [€]		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
A	2.319	2.368	2.317	375.048	352.243	374.727
E.1		2.368		438.724	417.732	438.371
E.2	1.877	2.071	1.877	426.730	367.548	426.535
E.3	1.671	1.770	1.671	382.082	380.225	382.048

Die Reduktion des CO₂-Emissionswertes für Strom in Modellvariante E.2 und E.3 führt zu absolut sinkenden CO₂-Emissionen. Modellvariante E.1 hingegen entspricht der Basisvariante A mit der klassischen und ökologischen Regelungsvariante. Auch mit der ökonomischen Regelungsvariante sind kaum Änderungen feststellbar (vgl. u. a. **Tabelle 30**).

Die Gesamtenergiekosten fallen in Modellvariante E.1 gegenüber der Basisvariante A deutlich höher aus, weil Strom- und Gaspreis angehoben sind. In Modellvariante E.2 und E.3 sind diese Gesamtenergiekosten vom Verhältnis des Strom- und Gasverbrauchs abhängig. Von größerer Bedeutung sind aber die Einsparmöglichkeiten durch den neuen Regelungsansatz. Die Einsparmöglichkeiten sind nicht von den absoluten Zahlen, sondern den Änderungen gegenüber der klassischen Regelungsvariante abhängig. Diese sind in der folgenden **Tabelle 31** dargestellt.

Tabelle 31: Modellvarianten E – Einsparung CO₂-Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum

	CO ₂ -Ausstoß			Gesamtenergiekosten		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
A	-	-2,2 %	+0,1 %	-	+6,1 %	+0,1 %
E.1	-	-2,1 %	+0,1 %	-	+4,8 %	+0,1 %
E.2	-	-10,3 %	0,0 %	-	+13,9 %	0,0 %
E.3	-	-5,9 %	0,0 %	-	+0,5 %	0,0 %

Während Modellvariante E.1 durch das geringfügig niedrigere Preisverhältnis von Strom und Gas ein etwas geringeres Energiekosteneinsparpotential aufweist, liegt dieses in Modellvariante E.2 mehr als doppelt so hoch. In dieser Modellvariante führt der angenommene geringere CO₂-Emissionswert für die Stromerzeugung gleichzeitig zu einem deutlichen Anstieg der CO₂-Emissionen. In Modellvariante E.3 reduziert die ökonomische gegenüber der klassischen Regelungsvariante die Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls um etwa 30 %. Trotzdem sinkt das Energiekosteneinsparpotential hier gegen null. Die Abschaltung sorgt aber auch noch für erhöhte CO₂-Emissionen.

5.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Zwischenfazit

Mit den Modellvarianten B bis E wurde ein Regelungsansatz für bivalente Wärmepumpenanlagen untersucht. Dieser zeigt Einsparpotential durch eine reine Betriebsoptimierung, d. h. durch Reduktion von Betriebsphasen mit niedrigen Leistungszahlen der Wärmepumpenmodule. Eine exakte Bestimmung von Erzeugerkennlinien und Lastgang ist in der Praxis kaum möglich, Veränderungen im Lebenszyklus sind unvermeidbar. Der Regelungsansatz kann für die Anlagenauslegung oder eine Investitionsentscheidung zwar nicht in der Planungsphase herangezogen werden, aber für den Anlagenbetrieb und deren Optimierung ist er sehr gut geeignet.

Die untersuchten Modellvarianten zeigen unterschiedliches Einsparpotential auf. Folgende **Tabelle 32** fasst noch einmal das Einsparpotential der ökonomischen und ökologischen Regelungsvarianten in allen untersuchten Modellvarianten zusammen. Weiterhin zeigt sie die Abweichung der Gesamtenergiekosten jeder Modellvariante mit der klassischen Regelungsvariante von der Basisvariante A.

Tabelle 32: Kostenänderung gegenüber Basisvariante A mit klassischer Regelungsvariante und Einsparpotential aller Modellvarianten durch Regelungsansatz im Betrachtungszeitraum (0,0 %-Ergebnisse sind ausgeblendet)

Modellvariante	Veränderung	Kostenänderung gegenüber Basisvariante (klassisch)	CO ₂ -Ausstoß [t]		Gesamtenergiekosten [€]	
			monetär	ökologisch	monetär	ökologisch
A	Basisvariante		-2,2 %	+0,1 %	+6,1 %	+0,1 %
B	1 Temperaturen HK - 10 K	-5,8 %	-5,6 %		+4,8 %	
	2 Temperaturen HK - 5 K	-2,0 %	-4,1 %		+6,4 %	
	3 Temperaturen HK + 5 K	+0,1 %	-0,5 %	+0,1 %	+1,1 %	+0,1 %
	4 Temperaturen HK + 10 K	+1,8 %	+0,1 %	+0,2 %	+0,4 %	+0,2 %
C	1 Sole-RL fix 10 °C	-2,8 %	-3,0 %		+5,7 %	
	2 Soletemperaturen + 5 K		-3,6 %		+5,2 %	
	3 Soletemperaturen - 5 K	-0,5 %	-1,1 %		+6,4 %	
	4 geringere Speicherkapazität Erdreich	+0,5 %	-1,8 %		+6,2 %	
	5 höhere Speicherkapazität Erdreich	-0,5 %	-2,5 %		+5,9 %	
D	1 Wärmepumpenkennlinie WP-II	+4,2 %	-0,6 %		+7,6 %	
	2 Nebenstromverbrauch der WP-I erhöht	+2,7 %	-0,7 %	+0,1 %	+7,7 %	+0,2 %
	3 WP-I Heizkennlinie + 10 %	-3,3 %	-3,7 %		+5,0 %	
	4 WP-I Heizkennlinie - 10 %	+3,4 %	-0,6 %		+7,1 %	+0,1 %
E	1 Energiepreis Destatis 2013	+17,0 %	-2,1 %	+0,1 %	+4,8 %	+0,1 %
	2 Strom teurer, weniger Emissionen; Gas billiger	+13,8 %	-10,3 %		+13,9 %	
	3 Strom günstiger, noch weniger Emissionen	+1,9 %	-5,9 %		+0,5 %	

Mit den Modellvarianten konnte gezeigt werden, dass für die Wärmeerzeugung monetär nennenswertes Einsparpotential entstehen kann. Ein ökologischer Vorteil konnte für die untersuchte Anlagenkonstellation nicht nachgewiesen werden. Nur in drei extremen Situationen fallen auch die Energiekosteneinsparungen sehr gering aus. In den beiden Modellvarianten B.3 und B.4 erzeugt das Wärmepumpenmodul schon mit der klassischen Regelungsvariante kaum Wärme. Von einer sinnvollen Erzeugungsanlage kann in diesen Fällen nicht gesprochen werden. In Modellvariante E.3 ist der Strom so günstig, dass die ökonomische Regelungsvariante nur eine geringe Verschiebung bewirkt. In allen anderen Modellvarianten sind monetäre Einsparungen von über 5 % möglich. Diese Einsparungen resultieren immer aus starker Verlagerung der Wärmeerzeugung vom Wärmepumpenmodul WP-H auf das Brennwertkesselmodul.

Aus den Ergebnissen können einige Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Diese berücksichtigen einerseits bivalente Wärmepumpen allgemein und andererseits die hier vorgestellte Regelstrategie in großen Wärmepumpenanlagen.

Die Modellvariante B zeigt deutlich die Notwendigkeit niedriger Systemtemperaturen. Modellvarianten B.3 und B.4 bilden dabei einen für Wärmepumpen ungeeigneten Zustand ab. Hier beträgt die Einsatzdauer der Wärmepumpenmodule WP-H und WP-S im Durchschnitt lediglich 0,5 h/d (B.4) bzw. 2,8 h/d (B.3). Niedrigere Temperaturen im Heizkreis hingegen führen mit der ökonomischen Regelungsvariante zu ähnlichem Einsparpotential wie Basisvariante A. Stark reduzierte Temperaturen im Heizkreis (B.1) führen aufgrund einer deutlich besseren Ausgangssituation zu leicht reduziertem Einsparpotential. Auffallend ist aber, dass durch Reduktion der Rücklauftemperatur des Heizkreises am Wärmepumpenmodul um $9,1\text{ K}^{97}$ schon 5,8 % ($\triangleq 21.750\text{ €}$) mit der klassischen Regelungsvariante gespart werden können. Die Basisvariante A bietet mit der ökonomischen Regelungsvariante ein vergleichbares Einsparpotential von 6,1 % ($\triangleq 22.805\text{ €}$). Auch Modellvarianten B.1 und B.2 besitzen mit der ökonomischen Regelungsvariante ein ähnliches Einsparpotential. Für die Praxis bedeutet dies, Wärmepumpen so zu dimensionieren und einzubinden, dass möglichst dauerhaft günstige Systemtemperaturen für die Wärmepumpe anfallen. Günstige Rücklauftemperaturen zur Wärmepumpe (niedrig im Heiz- und hoch im Kühlkreis) führen ebenso wie die ökonomische Regelungsvariante zu nennenswertem monetären Einsparpotential und sollten immer angestrebt werden. Hydraulische Kurzschlüsse (z. B. in Speichern, Weichen und bei parallelen Wärmetauschern) gilt es zu vermeiden.

Die Temperaturen im Erdreichmodul, wie sie in der Modellvariante C verändert wurden, nehmen deutlich geringeren Einfluss. Schon die Gesamtenergiekosten mit der klassischen Regelungsvariante differieren kaum gegenüber der Basisvariante A. Lediglich Modellvariante C.1, welche die Eigenschaft des Grundwassers mit konstanter Temperatur abbilden soll, zeigt hier eine Energiekostenreduktion von 2,8 %. Diese resultiert jedoch im Wesentlichen aus der günstigen Situation des Wärmepumpenmoduls im Kühlbetrieb. Die Erdreicherschließung stellt in der Praxis oft eine zeitkritische Größe dar (Bohrungen und deren Genehmigung können den Baufortschritt behindern). Vorhersagen zur Erdreichbeschaffenheit und zukünftiger Belastung sind mit Unsicherheiten behaftet. Gleiches gilt für die hier verwendete Modellierung des Erdreichs. Die dargestellten Unterschiede in der Einsparung stehen in der Praxis selten im akzeptablen Verhältnis zu Aufwand und Energiekosteneinsparung. Die absolute Temperaturverschiebung in den Modellvarianten C.2 und C.3 stellt einen im Wesentlichen standortspezifischen Einflussfaktor dar. Modellvariante C.4 und C.5 bedeuten eine kleinere bzw. größere Erdreicherschließung (z. B. Sondenzahl). Das Simulationsverhalten der Basisvariante A mit klassischer Regelungsvariante ist durch eine relativ ausgeglichene Belastungsbilanz im Erdreichmodul bestimmt. Dem Erdreichmodul werden hier durch das Wärmepumpenmodul WP-H über drei Jahre 1.267 MWh entzogen und durch das

⁹⁷ In der Basisvariante A beträgt die Rücklauftemperatur zum Wärmepumpenmodul WP-H $42,1\text{ °C}$, in B.1 beträgt sie $33,0\text{ °C}$.

Wärmepumpenmodul WP-K 1.128 MWh zugeführt. Das ausgeglichene Verhältnis führt zu gegenläufigen Effekten für die Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K. In den Modellvarianten C.2 und C.3 mit ökonomischer Regelungsvariante stehen knapp 100 MWh Wärmeentzug knapp 1.100 MWh Wärmezufuhr im Erdreichmodul gegenüber. Trotz dieses Ungleichgewichtes können hier bei Anwendung der ökonomischen Regelungsvariante lediglich 1,8 %⁹⁸ der Gesamtenergiekosten eingespart werden. Grund ist, dass bei vergleichbarer Laufzeit des Wärmepumpenmoduls WP-K lediglich die Leistungszahl um 34 %⁹⁹ höher ausfällt. Hier ist die Sole für das Wärmepumpenmodul WP-K um durchschnittlich 9,9 K¹⁰⁰ kälter.

Die sicher einfachste Beeinflussung der Anlageneffizienz ist über die Wärmepumpenkennlinien möglich, welche in Modellvariante D untersucht wurden. In der Praxis bedeutet dies, geeignete und effiziente (auf die Anwendungsumgebung abgestimmte) Wärmepumpen einzusetzen. Dazu gehört auch, ausreichende Volumenströme dauerhaft sicherzustellen und die Anzahl der Schaltvorgänge zu reduzieren. Größere Wärmepumpen sollten in ihrer Leistung regelbar sein bzw. mehrstufig ausgeführt werden. Dabei ist regelungstechnisch ebenfalls auf einen möglichst konstanten Betrieb der einzelnen Kompressoren zu achten. Modellvariante D.1 zeigt, welche Wirkung der Einsatz von zwei unterschiedlichen realen Wärmepumpen haben kann. Es entstehen 4,2 % Mehrkosten mit der klassischen Regelungsvariante, nur weil die Kennlinien des Wärmepumpenmoduls eine andere Wärmepumpe abbilden. Je effizienter die eingesetzte Wärmepumpe ist, desto geringer fällt das Einsparpotential durch die ökonomische Optimierung aus. Bei der in Modellvariante D.3 um 10 % angehobenen Wärmeleistungskennlinie fällt das Einsparpotential mit 5,0 % statt 6,1 % in der Basisvariante A aber noch immer nennenswert aus.

Deutlich schwieriger sind die Energiepreise bzw. deren CO₂-Emissionswerte zu beeinflussen. Die Modellvarianten E zeigen deren extremen Einfluss. Schon die Anwendung der Energiepreise gemäß Auswertung des Statistischen Bundesamtes aus 2013 (Modellvariante E.1) führt zu einer Energiekostensteigerung von 17,0 % mit der klassischen Regelungsvariante. Das Einsparpotential mit der ökonomischen Regelungsvariante fällt mit 4,8 % aber geringer als in der Basisvariante A aus. Dieses ist insbesondere vom Verhältnis zwischen Strom- und Gaspreis beeinflusst, das hier zugunsten des Stroms verändert ist. Auch in Modellvariante E.2 wird dieser Einfluss deutlich. Das extreme Preisverhältnis führt hier mit 13,9 % zu einem gegenüber Basisvariante A mehr als dop-

⁹⁸ In Modellvariante C.2 betragen die Gesamtenergiekosten 355.488 €, in Modellvariante C.3 betragen sie 349.063 €.

⁹⁹ Vgl. Tabelle 41, die durchschnittliche Leistungszahl des Wärmepumpenmoduls WP-K beträgt 3,51 für Modellvariante C.2 und 4,69 für Modellvariante C.3.

¹⁰⁰ Vgl. Tabelle 41, die durchschnittliche Rücklauftemperatur aus dem Erdreichmodul beträgt 27,3 °C für Modellvariante C.2 und 17,4 °C für Modellvariante C.3.

pelt so hohen Einsparpotential. Günstiger Strom (z. B. aus Eigenerzeugung) kann das Einsparpotential aber auch vollständig auf null reduzieren, wie Modellvariante E.3 zeigt.

Mit den Ergebnissen aus allen Modellvarianten kann der Regelungsansatz im Wesentlichen beurteilt und beschrieben werden. Einige Unsicherheiten bleiben aber bestehen.

Die Aussagen sind absolut betrachtet auch von den getroffenen Annahmen abhängig. Insbesondere der Lastgang und dessen Temperaturschwankungen nehmen einen unkalkulierbaren Anteil ein. Im Extremfall der vollständigen Beheizung mit Flächenheizsystemen und konstant niedrigen Temperaturanforderungen besteht dauerhaft ein sehr geringes Einsparpotential. Hiervon kann in größeren Anlagen mit gleichzeitiger Kühlfunktion aber nicht ausgegangen werden. Schon eine Lüftungsanlage oder statische Heizkörper in Bereichen mit hohen Lastschwankungen führen zu nicht konstanten Temperaturanforderungen. Ein veränderter Lastgang wird hier nicht direkt untersucht. Hier werden nur Temperaturverschiebungen (vgl. Modellvariante B) direkt ausgewertet.

Die technischen Anwendungsgrenzen der Wärmepumpen nehmen ebenfalls eine zentrale Rolle im Anlagenverhalten ein. Durch diese wird direkt Einfluss genommen, welcher Anteil mit der klassischen Regelungsvariante von der Wärmepumpe übernommen wird. Die Grenzwerte sind mit hier 45 °C und 14 °C hier sehr eng gesetzt. In der Praxis sind Wärmepumpen mit größerem Anwendungsbereich zu finden. Eine Vergrößerung würde auf beiden Seiten zu höheren Einsatzzeiten mit der klassischen Regelungsvariante führen. Die Arbeitszahl der Wärmepumpe würde gleichzeitig sinken, weil weitere Phasen ungünstigerer Temperaturzustände hinzukämen. Die ökonomische Regelungsvariante würde diese zusätzlichen Einsatzzeiten im Wesentlichen wieder ausschließen, da es sich nicht um wirtschaftlich günstige Betriebsbedingungen handelt. Dadurch würde das monetäre Einsparpotential steigen.

Die hier aufgezeigte mögliche Heterogenität von bivalenten Wärmepumpenanlagen belegt auch eine Feldstudie der Fraunhofer ISE¹⁰¹. Diese untersuchte erdgekoppelte Wärmepumpen von Nichtwohngebäuden. Ein direkter Vergleich zu den sieben bivalenten Anlagen mit Kompressionswärmepumpe ist aufgrund der fehlenden Detailinformationen nicht möglich. Schon die Kombination von Umweltwärmequelle bzw. Wärmesenke und Übergabesysteme im Gebäude ist aber in jeder der sieben Anlagen unterschiedlich. Jedoch ist auch der zweite Wärmeezeuger nur in zwei Fällen ein Gaskessel. Die Jahresarbeitszahl (im Heizfall) schwankt in den sieben Anlagen zwischen 3,6 und 6,1. Inwiefern der hier vorgestellte Regelungsansatz für die dortigen Anlagen erfolgversprechend ist, kann damit nicht beurteilt werden. Die Zahlen zeigen aber, wie unterschiedlich Wärmepumpenanlagen in der Praxis sind.

¹⁰¹ Vgl. Kalz, D. et al., Felduntersuchung von erdgekoppelten Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden, 2014, S. 30 ff.

6 Wetterprognosen und aktive Erdreichbewirtschaftung

Der beschriebene und ausgewertete Regelungsansatz erfordert für die Mindestlaufzeiten von Erzeugern kurzfristig konstante Systemzustände. Insbesondere jeder Schaltvorgang führt aber zu Systemveränderungen. Pumpen verändern Strömungsverhältnisse in Speichern. Stagnationsbedingte Zustände verschwinden. Eine getroffene Entscheidung zur Zuschaltung der Wärmepumpe sollte aber idealerweise mindestens 20 Minuten vorhalten.

Verschiedene Einflüsse können nicht exakt vorhergesehen werden. Zwei davon sollen hinsichtlich der Prognosemöglichkeit analysiert werden. Zunächst soll die Wirkung des allgemein bekannten positiven Effekts von Wetterprognosen im Zusammenhang mit diesem Regelungsansatz diskutiert werden. Nachfolgend soll anhand konkreter Messwerte aus einer Realanlage untersucht werden, ob hier Prognosen für die zu erwartenden Erdreichtemperaturen möglich sind. Ziel wäre, mit dieser Art das Erdreich unter Berücksichtigung zukünftiger Lastfälle gezielt als Speicher zu verwenden.

6.1 Effekt von Wetterprognosen auf den Regelungsansatz

Außentemperatur und andere Wettereinflüsse wie z. B. die Sonneneinstrahlung haben erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf von Gebäuden und damit den Einsatz gebäudetechnischer Anlagen. Der Wärme- und Kältebedarf eines Gebäudes sowie die erforderlichen Vorlauftemperaturen der Heiz- und Kühlkreise sind vom Außenklima abhängig. Das Außenklima kann weiterhin maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz bzw. Einsatzmöglichkeiten verschiedener Erzeugungssysteme wie z. B. von Kältemaschinen oder freier Kühlung nehmen. Aus diesem Grund werden gelegentlich Wettervorhersagen verwendet, um Kennwerte zu prognostizieren und mit einer darauf beruhenden prospektiven Steuerung Erzeuger- und Anlageneinsatz zu optimieren.

6.1.1 Anbieter von Wettervorhersagen

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt Wettervorhersagen in Deutschland bereit. Basierend auf globalen Simulationen der meteorologischen Prozesse werden sogenannte Punkt-Termin-Prognosen erstellt. Hierbei wird ein Gitterpunktmodell mit einer Auflösung von 5 km verwendet und für jeden dieser Punkte eine Prognose der voraussichtlichen Wetterelemente ermittelt. Neben anderen Wetterparametern umfassen diese Daten maßgebende Einflussfaktoren auf Gebäude wie Lufttemperatur, Globalstrahlung und Bedeckungsgrad. Daten stehen für einen Prognosezeitraum von sieben Tagen zu Verfügung. Drei Tage im Voraus können stündliche Werte, alle weiteren Werte in drei

Stundenintervallen bereitgestellt werden. Diese Datensätze sind recht kostentreibend und nur für größere Objekte bzw. Liegenschaften sinnvoll.¹⁰²

Für kleinere Objekte werden auch einfache Systeme angeboten. Die „Wetterprognose-Station Kompakt (WS-K)“ des Herstellers HKW Elektronik ermöglicht z. B. die Wetterabfrage über Langwellen-Rundfunk. Hierfür fallen lediglich einmalige Anschaffungs- und Lizenzkosten an. Die Vorhersagewerte werden regionenbezogen im sechs Stundenintervall aktualisiert.¹⁰³

Auch die skriptbasierte automatisierte Abfrage von allgemein zugänglichen Wettervorhersagen im Internet ist möglich. Das Angebot ist hier sehr vielfältig, aber noch ungenauer als die zuvor genannten Varianten.

6.1.2 Verwendungsmöglichkeiten von Wetterprognosen in der Gebäudetechnik

In Berichten zu Projekten mit Wettervorhersage-Steuerung der gebäudetechnischen Anlagen wird in erster Linie der energetische Bedarf des Objekts prognostiziert. Hierbei wird die thermische Trägheit der Gebäudemasse genutzt. Diese führt bei veränderter Außentemperatur je nach Dämmstandard und Luftwechsel erst mit einer Phasenverschiebung zu Reaktionen der Innenraumtemperaturen bzw. des Wärmebedarfs. Konventionelle Regelungsansätze arbeiten mit Schaltprogrammen und reagieren stets direkt auf eine Außen- oder Innenraumtemperaturänderung. Solare Gewinne und die phasenverschobenen Reaktionen des Innenraumklimas finden hierbei keine Berücksichtigung. Überhöhte Vorlauftemperaturen können die Folge sein und zu schwankenden Raumtemperaturen sowie instabilen Anlagenzuständen führen. Ein Takten der Anlagen führt zu erhöhtem Primärenergieverbrauch und ist für gewisse Erzeuger wie Wärmepumpen ungünstig.¹⁰⁴

Eine Steuerung, die neben physikalischen Eigenschaften und Nutzerverhalten auch Wetterprognosen berücksichtigt, kann durch eine prospektive Simulation des Raumklimas den Wärme- und Kältebedarf sowie den Einsatz der gebäudetechnischen Anlagen optimieren. Die folgende **Abbildung 27** zeigt im Vergleich den beispielhaften Verlauf von Wärmeleistung, Außen- und Estrichtemperatur bei konventioneller Steuerung und bei wetterbasierter vorausschauender Steuerung.

¹⁰² Gemäß telefonischer Auskunft DWD.

¹⁰³ Vgl. Dunker, R., Effizienz-Elektronik für Wohnhäuser, 2013, S. 35.

¹⁰⁴ Vgl. ebd.

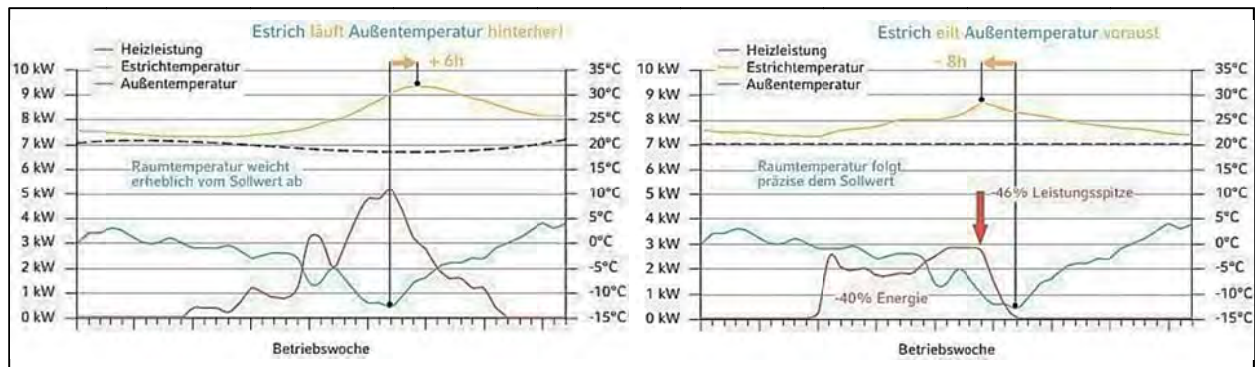


Abbildung 27: Beispielhafter Verlauf von Wärmeleistung, Außen- und Estrichtemperatur bei konventioneller Regelung (links) und wetterbasierter vorausschauender Steuerung (rechts)¹⁰⁵

Das Beispiel der **Abbildung 27** zeigt eine komplexe Lösung der Firma MeteoViva. Hier können mit der wetterbasierten vorausschauenden Steuerung die Leistungsspitze um im Beispiel 46 % und der Energieverbrauch um 40 % reduziert werden. Bei konventioneller Regelung (links) kann der spiegelbildliche Verlauf von Außentemperatur und Wärmeleistung beobachtet werden. Im Gegensatz dazu reagiert die GLT auf Grundlage von Wetterprognosen vorausschauend (rechtes Beispiel). Die Wärmeleistung wird etwa eineinhalb Tage vor Beginn des Temperaturrückgangs und etwa zweieinhalb Tage vor dem Außentemperaturminimum gesteigert. Mit Erreichen der minimalen Außentemperatur wird die Wärmeleistung angesichts erwarteter steigender Außentemperaturen zurückgefahren.

Die Wettervorhersage-Steuerung kann zu reduziertem Energieverbrauch führen. Prognosen erlauben eine optimierte Wärme- und Kälteversorgung. Positiver Nebeneffekt ist eine konstante Innenraumtemperatur. Weitere Einsparungen können auf der Erzeugerseite erzielt werden. Geringere Lastspitzen können zu günstigeren Betriebsbedingungen führen. Bivalente Erzeugungssysteme bieten mehr Wahlfreiheit und längerfristige stabile Systemzustände.¹⁰⁶

6.1.3 Effekt von Wetterprognosen in bivalenten Wärmepumpensystemen

Wetterprognosen sollen, unabhängig von Genauigkeit und Anwendung, zukünftige Klimaänderungen in der Versorgung und Temperierung von Gebäuden berücksichtigen. Hierzu können die drei folgenden Ansätze verfolgt werden:

- vorausschauende Ladung der thermischen Speicher;
- vorausschauende Temperierung der Gebäudemasse;
- vorausschauende Erzeugerwahl.

¹⁰⁵ Hardt, S., Wetterprognosen senken Energiekosten, 2012, S. 56.

¹⁰⁶ Vgl. Werner, M., Wetterprognosen nutzen, 2012, S. 16.

Grundsätzlich gilt, dass langanhaltende konstante Systemzustände mit günstigen Systemtemperaturen und geringen Lasten erstrebenswert sind. So können ideale Betriebsbedingungen für Wärmepumpen geschaffen werden. Geringe Lasten erlauben gleichzeitig eine hohe Freiheit in der Wahl zwischen den Erzeugern.

Der Ladung thermischer Speicher sind i. d. R. enge Grenzen gesetzt, weil selten große thermische Speicher verwendet werden. Größere Speicher erlauben insbesondere in der Übergangszeit eine Ladung zu günstigen Zeitpunkten. Die freie Kühlung oder der Simultanbetrieb der Wärmepumpe kann in den frühen Morgenstunden Kälte für Kühllasten am Tag erzeugen. Auch der Wärmespeicher kann durch Simultanbetrieb tagsüber für die kalten Abendstunden geladen werden. Phasen günstigeren Primärenergiebezugs oder Überschüsse aus der Eigenerzeugung können zur Bevorratung von thermischer Energie genutzt werden.

Die Temperierung der Gebäudemasse bietet demgegenüber oft deutlich größere Speichermöglichkeiten. Sie kann je nach Berechnungsmethode so vorausschauend geladen werden, dass Lastspitzen deutlich reduziert werden. Leicht schwankende Innenraumtemperaturen können auch erzeugt werden, um innerhalb kurzer Zeit wechselnde Heiz- und Kühllasten zu vermeiden. Nachts kann aus verschiedenen Gründen oft günstiger gekühlt werden. Stark gekühlte Räume in den Morgenstunden können zu reduziertem Kältebedarf am Tag führen.

Beide Ansätze erlauben dann einen günstigeren Erzeugereinsatz, wenn konstante langanhaltende Systemzustände mit geringen Lasten entstehen. Dann besteht oft die freie Wahlmöglichkeit zwischen den Erzeugern, welche zusammen nur für die Lastspitze erforderlich sind. Eine langanhaltende Temperierung der Bauteilmassen kann mit günstigeren Temperaturen erfolgen, als eine schnelle Temperierung. Dies zeigt schon **Abbildung 27**. Nicht zuletzt können so sehr lange Laufzeiten für einzelne Erzeuger entstehen.

Auf den vorgestellten Regelungsansatz nehmen die Effekte jedoch kaum Einfluss. Sie führen zu günstigeren Gesamtbedingungen und eine höhere Wahlfreiheit. Die beiden Ansätze konkurrieren jedoch auch nicht, sie können sogar gut kombiniert werden.

6.2 Prognose der Erdreichtemperaturen und aktive Bewirtschaftung

Im Zusammenhang mit Wärmepumpen wird häufig Erdreich in verschiedenen Erschließungsformen als Wärmequelle bzw. Wärmesenke genutzt. Als Erschließungsform kommen für Großanlagen im Wesentlichen Erdsonden und Brunnenanlagen in Frage, andere sind aber möglich. Im Weiteren werden nur noch Sonden betrachtet. Erdwärmequellen haben i. d. R. unterschiedliche Eigenschaften. Erdreichbeschaffenheit, Grundwassereinfluss und Sondenanordnung sind standortabhängig. Weiterhin sind kaum Lastgänge und die aus ihnen resultierenden Erdreichreaktionen einheitlich. Auch

eine Übereinstimmung in unterschiedlichen Kalenderjahren für ein und dasselbe Gebäude ist höchst unwahrscheinlich.

Üblicherweise wird das Erdsondenfeld im Planungsprozess unter Annahme eines Lastgangs einmal ausgelegt. Im Betrieb wird die Nutzung selten geregelt, meist nur die Einhaltung von Temperaturgrenzwerten (z. B. aus der Genehmigung oder Frostgrenze) überwacht.

Zu erörtern gilt die Frage, ob Soletemperaturen aktiv genutzt und dazu in Abhängigkeit von der Nutzung vorhergesagt werden können.

Erdreichtemperaturen sind im Wesentlichen von äußerer Belastung und Regeneration abhängig. Temperaturveränderungen entstehen kurzfristig durch eine Belastung und langfristig durch Regeneration. Für ein vermessenes Realobjekt werden die Soletemperaturverläufe (Rücklauf aus dem Erdreich) monatsweise sortiert und über die Belastungsdauer ausgewertet. Die Folgende **Abbildung 28** stellt den Zusammenhang für Dezember des ersten Jahres (als Erklärung zu **Abbildung 29**) dar.

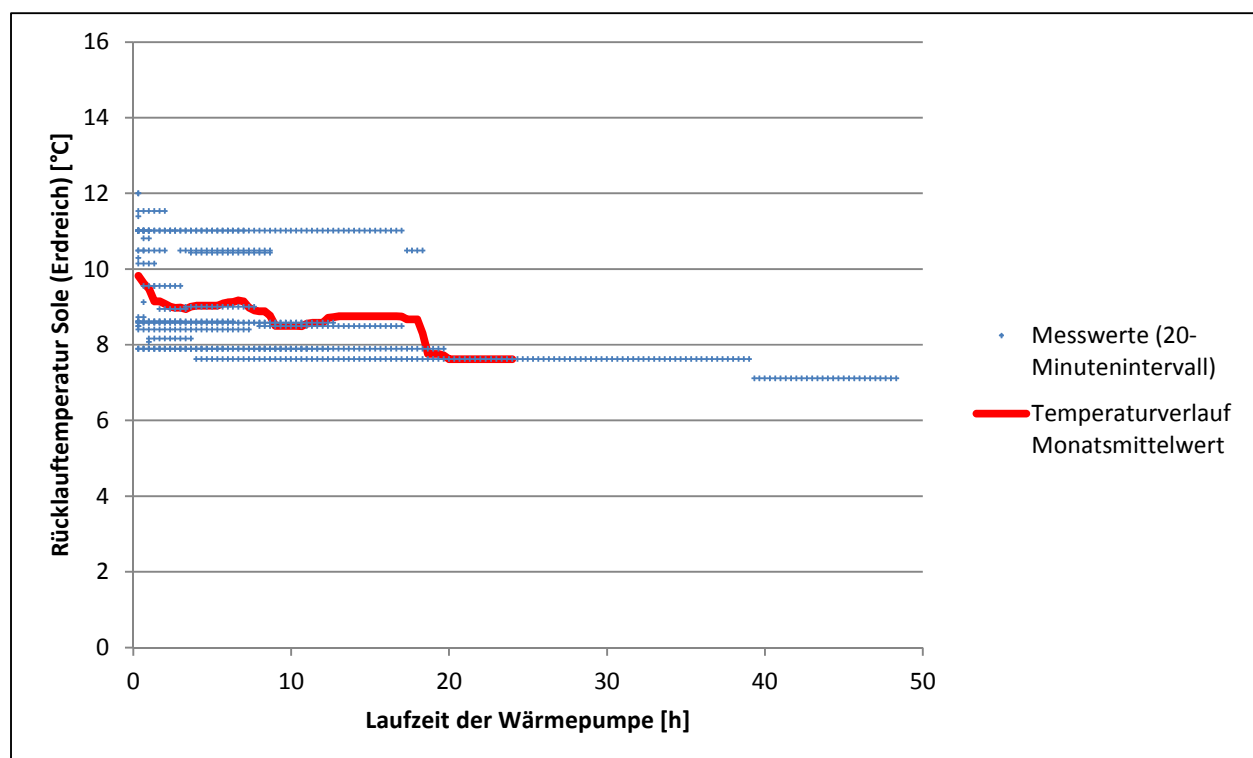


Abbildung 28: Erdreichtemperaturen Messdaten und gemittelter Temperaturverlauf im Dezember 1. Jahr

Im Wärmepumpenbetrieb (Wärmeentzug aus Erdreich) wird alle 20 Minuten die Solerücklauftemperatur aufgetragen. Die Laufzeit der Wärmepumpen ist stark unterschiedlich. Während viele Phasen wenige Stunden dauern, liegt die längste im Beispielmonat bei 48 Stunden. Aus allen Messwerten wird laufzeitabhängig ein Mittelwert gebildet. Ab der 20. Stunde liegt hier nur noch ein Temperaturverlauf vor. Zur 24. Stunde wird die Mittelwertbildung beendet, weil nur wenige längere Betriebsphasen existieren. **Abbildung 28** zeigt nur eine Betriebsphase, die länger als 24 Stunden dauert.

Die folgende **Abbildung 29** und **Abbildung 30** stellt für zwei aufeinanderfolgende Heizperioden die Temperaturverläufe gegenüber. Der in **Abbildung 28** einzeln dargestellte Temperaturverlauf ist in anderer Skalierung der Abszisse in **Abbildung 29** enthalten.

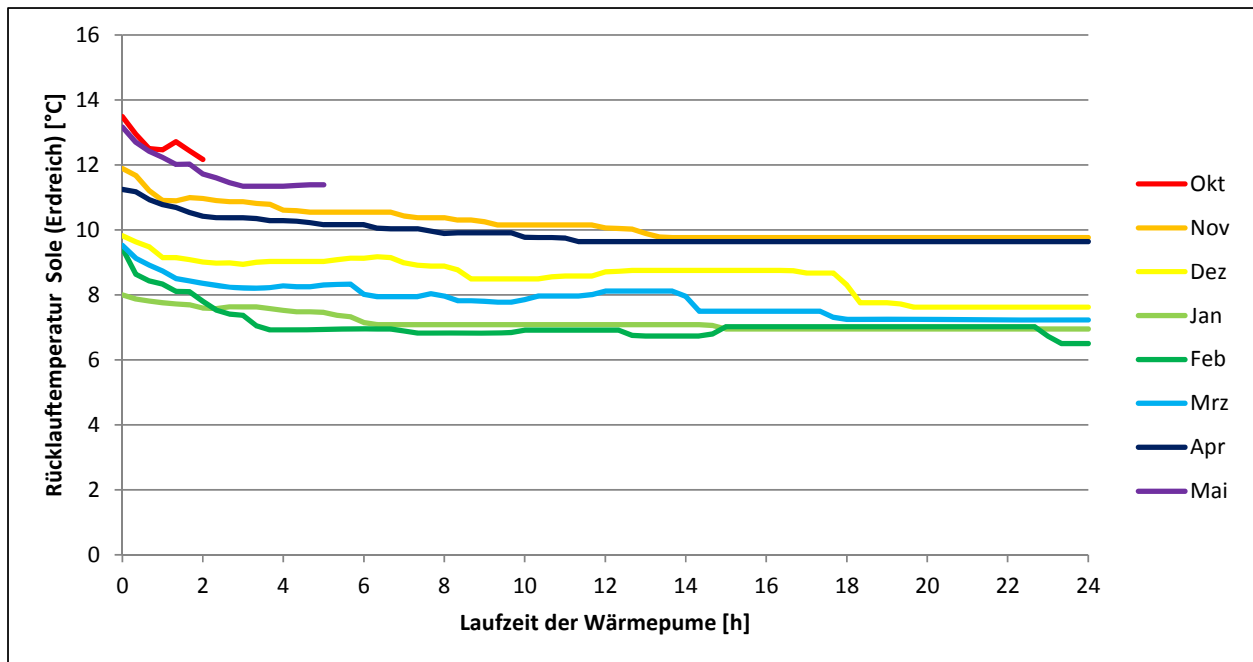


Abbildung 29: Rücklauftemperaturverlauf Sole monatsweise in Abhängigkeit der Belastungsdauer, 1. Jahr

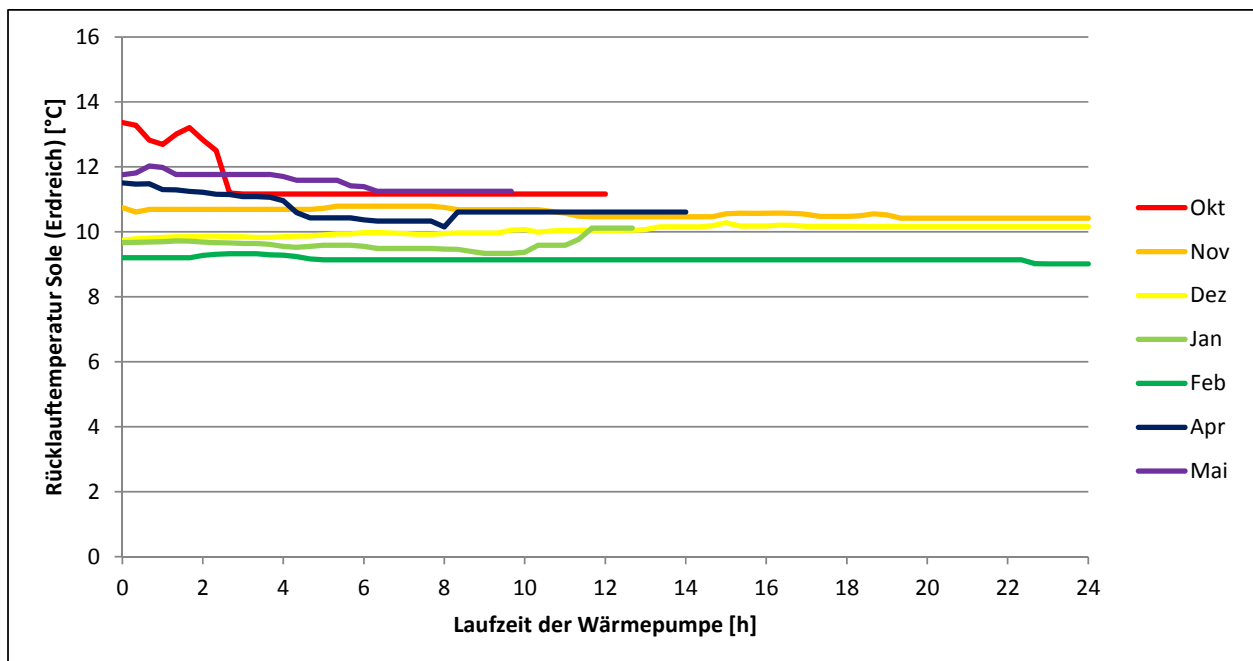


Abbildung 30: Rücklauftemperaturverlauf Sole monatsweise in Abhängigkeit der Belastungsdauer, 2. Jahr

Die beiden Abbildungen zeigen unterschiedliches Verhalten und differieren in den Temperaturen. In **Abbildung 29** sinken die Temperaturen mit zunehmender Belastungsdauer. **Abbildung 30** hingegen weist recht konstante von der Belastungsdauer unabhängige Temperaturen auf.

Die aufgezeigten Datenreihen resultieren aus einer einfachen Temperaturmessung. Daten zur zugefügten bzw. entzogenen Energie sind nicht verfügbar. Belastbare Aussagen sind mit der vorliegenden Datenbasis kaum möglich.

Der Temperaturabfall in den ersten Stunden von **Abbildung 29** resultiert aus Regeneration. D. h. hier liegen zwischen den Nutzungsphasen längere Unterbrechungen vor. In **Abbildung 30** findet eine gleichmäßigere und zeitlich umfangreichere Nutzung statt. In den Monaten November bis Februar des ersten Jahres (**Abbildung 29**) wird das Erdreich zu 59 % der Zeit, denen des zweiten Jahres (**Abbildung 30**) zu 82 % der Zeit belastet. Der absolute Wärmeentzug aus dem Erdreich kann aber sehr unterschiedlich ausfallen.

Die Temperaturen im ersten Jahr liegen im Wesentlichen niedriger als im zweiten Jahr. Entweder liegt ein höheres Temperaturniveau im Erdreich vor oder die absolute Belastung ist niedriger ausgefallen. Ein höheres Temperaturniveau könnte natürlich bedingt oder durch die sommerliche Nutzung als Wärmesenke resultieren. Die geringere absolute Nutzung kann aus dem Einsatz der Wärmepumpe im Teilleistungsbereich resultieren.

Für den Sommerfall (Wärmeeinspeisung ins Erdreich) ist eine analoge Auswertung möglich, hier ergeben sich ähnliche Ergebnisse. Festzustellen ist ein Temperaturanstieg um maximal ca. 2 K über längere Nutzungsphasen. Auf die Darstellung wird aufgrund der geringen Aussagekraft verzichtet.

Die geringen Temperaturänderungen (des hier zugrunde gelegten Erdsondenfeldes) bedeuten, dass bei Prognoseanwendung für das Beispielgebäude keine nennenswerten Temperatursprünge prognostiziert würden. Unter Berücksichtigung des in Modellvariante C (vgl. Kapitel 5.2, **Tabelle 32**) identifizierten geringen Einflusses der Soletemperaturen ist für dieses Beispielgebäude kein bedeutender Effekt zu erwarten.

Weiterhin dauert der Temperaturabfall hier mehrere Stunden. Eine Abschaltung wegen gesunkener Soletemperaturen ist regelungs- und maschinentechnisch nach diesem Zeitfenster unkritisch. Veränderliche Systemtemperaturen über solche Zeitspannen sind deutlich wahrscheinlicher. Die Erstellung solcher Temperaturverläufe scheint daher für das betrachtete Erdsondenfeld keine nennenswerten Vorteile zu bringen.

Grundsätzlich wäre ein solcher Ansatz auf jede Anlage übertragbar. Eine Differenzierung nach vorhergehender Regenerationszeit und ggf. entgegengesetzter Belastung ist dabei erforderlich. Wie hoch der Speichereffekt ausfällt ist stark vom Erdreich abhängig. Die vorliegenden Daten erlauben hierzu keine detaillierte Auswertung und Aussagen. Der Effekt in Kombination mit Wetterprognosen kann auf Basis der vorliegenden Messdaten somit nicht beurteilt werden.

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Leistungszahlen von Wärmepumpen sind vom Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke abhängig. Sie schwanken nutzungsabhängig und jahreszeitlich. So können zeitweise ungünstige Betriebszustände für die Wärmepumpe entstehen, während der zweite Erzeuger freie Leistungskapazitäten hat. Diese Betriebszustände senken die Gesamteffizienz der Erzeugungsanlage, bleiben oft unerkannt und finden in geläufigen Anlagenregelungen keine Berücksichtigung.

7.1 Zusammenfassung der Arbeitsschritte und des Lösungsweges

Im vorgestellten Forschungsvorhaben wurde ein Regelungsansatz für bivalente Wärmepumpenanlagen untersucht. Dieser soll unterschiedliche Eigenschaften von Erzeugern in bivalenten Systemen gezielt nutzen. Er kann eine effiziente Alternative zum klassischen Grundlasteinsatz der Wärmepumpe darstellen.

Ziel des Regelungsansatzes ist, den bivalenten Einsatz einer Wärmepumpe zu optimieren. Zeiträume unwirtschaftlichen Betriebs (geringe Leistungszahl) sollen automatisch erkannt werden, um auf günstigere Erzeuger umzustellen und so im Jahresverlauf bessere Gesamt-Arbeitszahlen zu erreichen. Die Beurteilung der Erzeuger kann unter ökonomischen wie ökologischen Aspekten erfolgen. Verschiedene Einflussfaktoren können Berücksichtigung finden. Die vorgenommenen Auswertungen berücksichtigen die Preise bzw. CO₂-Emissionswerte der Primärenergie. Es könnten aber z. B. auch kapital- bzw. betriebsgebundenen Kosten bzw. deren CO₂-Emissionen Berücksichtigung finden.

Die Auswertungen erfolgten mittels eines validierten Simulationsmodells. Dieses bildet den Ausschnitt einer realen Erzeugungsanlage ab und berücksichtigt Anlagenaufbau, zugehörige Erzeugerkennlinien und eine das Realverhalten beschreibende Regelung. Der Lastgang ist mit zugehörigem Temperaturverlauf für einen Zeitraum von drei Jahren hinterlegt. Die Abweichungen zwischen Realdaten und Simulationsergebnisdaten von Vorlauftemperaturen, Erzeugungsleistung und die Verteilung auf die unterschiedlichen Erzeuger deuten auf ein realistisches Verhalten des validierten Simulationsmodells hin. Aus datenschutzrechtlichen Gründen und der möglichen Rückschlüsse auf den Nutzerbetrieb wird aus diesem validierten Simulationsmodell eine losgelöste Basisvariante erstellt. Zwecks Anonymisierung sind insbesondere die Kennlinien der Erzeuger ersetzt. Diese Basisvariante weist aber weiterhin eine deutliche Übereinstimmung mit der Realanlage auf.

Die Erzeugerzuschaltung erfolgt im Simulationsmodell über je einen PI-Regler, welcher die Vorlauftemperatur des Heiz- bzw. Kühlkreises mit den Sollwerten aus dem Lastgang vergleicht. Mit steigendem Reglerwert wird zunächst das Wärmepumpenmodul und folgend das Modellelement des entsprechenden konventionellen Erzeugers eingeschaltet, sofern die Systemzustände im jeweiligen Betriebsbereich liegen.

Die Regelung kann ökonomisch oder ökologisch optimiert betrieben werden. Hierzu sind CO₂-Emissionswerte und Energiepreise hinterlegt. Aus den Kennlinien werden jederzeit die erwarteten Wirkungsgrade aller Erzeuger berechnet. Wenn das Wärmepumpenmodul höhere CO₂-Emissionen bzw. Energiekosten als das Modellelement des jeweiligen konventionellen Erzeugers verursacht, würde diese für den Grundlastbetrieb gesperrt. Das Simulationsmodell wird mit einer klassischen, ökonomischen und ökologischen Regelungsvariante berechnet. Die Simulationsergebnisdaten, insbesondere Systemtemperaturen an den Erzeugermodulen und deren Leistung, Primärenergieverbrauch, Leistungszahlen sowie Regelungsgüte der Vorlauftemperaturen, konnten für die drei Regelungsvarianten direkt miteinander verglichen werden.

Von der Basisvariante des Simulationsmodells ausgehend ist eine Parametervariation durchgeführt worden. Hiermit konnten die Einflüsse wesentlicher Parameter auf die Ergebnisse beurteilt und Anwendungsgrenzen definiert werden. Unter den angenommenen Rahmenbedingungen (insbesondere Anlagenaufbau, Erzeugereigenschaften, Regelungstechnik und Lastgang) wurden in der Parametervariation unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Ausgehend von akzeptablen Wärmepumpeneinsatzzeiten mit der klassischen Regelungsvariante wurden trotz unterschiedlicher Parametrierung der Systemtemperaturen, Wärmequelle und Wärmepumpenkennlinien 5 % bis 8 % Einsparung durch die ökonomische Optimierung festgestellt. Veränderte Energiepreise führten durch eine ökonomische Optimierung zu Einsparungen zwischen 0,5 % und 14 %. Die CO₂-Emissionseinsparungen fielen in allen Parametervariationen sehr gering aus. Für CO₂-Emissionseinsparungen wäre ein umfangreicherer Wärmepumpenbetrieb erforderlich. Dies ist gegenüber dem Grundlasteinsatz nicht möglich, weil dieser schon einen maximalen Wärmepumpeneinsatz anstrebt und einen ökologisch guten Erzeugereinsatz darstellt.

7.2 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen unter den gestellten Rahmenbedingungen beachtliche Effizienzsteigerungen mit der ökonomischen Regelungsvariante. Die CO₂-Emissionseinsparungen fielen hingegen gering aus. Entscheidend ist der Umsetzungsaufwand für einen solchen Regelungsansatz, insbesondere in unterschiedlichen Erzeugerkombinationen und hydraulischen Schaltungen von Großanlagen. Großen Einfluss hat die zukünftige Entwicklung des Energiemarktes. Hier sind Energiepreis, Energiemix (und folglich

CO₂-Emissionswert) und Vertriebssysteme (insbesondere Tarifstruktur) von Bedeutung. Schwankungen dieser können zu einer sehr positiven Wirkung des Regelungsansatzes (auch bezüglich CO₂-Emissionen) führen.

7.2.1 Anlagenmonitoring und Umsetzbarkeit des Regelungsansatzes

In den Unterkapiteln von Kapitel 3.2 wurden u. a. Arbeitszahlen kleiner Wärmepumpen der Feldstudie „Wärmepumpen Effizienz“ von Fraunhofer ISE zitiert. Wesentliche Erkenntnis der Studie ist, dass die Arbeitszahlen von Wärmepumpenanlagen deutlich differieren. Diese sind gemäß der Studie in der Praxis nicht nur vom Temperaturhub der Wärmepumpe abhängig.¹⁰⁷ Die Feldstudie untersuchte kleine, einfache Wärmepumpenanlagen. Großanlagen (i. d. R. gebäudespezifisch zusammengestellt) unterliegen solchen Schwankungen ebenso, wie eine weitere Feldstudie¹⁰⁸ von Fraunhofer ISE zeigt. Auch der Bearbeiter des Forschungsvorhabens konnte diese Erfahrung bei mehreren Anlagen sammeln. Einfluss auf die Effizienz nehmen insbesondere Planung und Betrieb, teilweise auch die Ausführung der Anlage.

Unabhängig von der Regelstrategie sollte in größeren und komplexeren Anlagen ein betriebsbegleitendes Monitoring durchgeführt werden. Hierdurch kann dann nicht nur eine gute Einregulierung erfolgen, sondern die Effizienz der Anlage langfristig beobachtet werden.¹⁰⁹ Wenn ein Monitoring durchgeführt wird, sollte eine ausreichende Messtechnik in den Anlagen vorhanden sein. Die Wirkung eines Monitorings und einer Einregulierung kann mit der hier untersuchten Regelstrategie nicht erzielt werden. Häufig können sogar höhere Einsparungen durch eine gute Einregulierung als einen solchen Regelungsansatz erlangt werden. Energieeinsparungen von 10 %¹¹⁰ können i. d. R. durch die Überwachung und Optimierung gebäudetechnischer Anlagen erreicht werden. Stabilere Anlagenzustände, welche für den Regelungsansatz Grundvoraussetzung sind, können ebenfalls durch eine Einregulierung erzielt werden.

¹⁰⁷ Vgl. Fraunhofer ISE (Hrsg.), Wärmepumpen Monitor.

¹⁰⁸ Vgl. Kalz, D. et al., Felduntersuchung von erdgekoppelten Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden, 2014, S. 30 ff.

¹⁰⁹ Vgl. Köberle, T.; Becker, M., Übersicht zu Energieeffizienzkenngrößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik, 2013, S. 55.

¹¹⁰ Vgl. z. B. Quednau, M., Bis zu zehn Prozent Energie sparen – auch bei Neuanlagen, 2012, S. 50.

Für die automatisierte Umsetzung der neuen Regelstrategie ist ein Datenlogger vorstellbar. Dieser muss die erforderlichen Messdaten erfassen und automatisiert statistisch auswerten. Ein solcher Datenlogger könnte nicht nur die (von Einflussfaktoren abhängige) Effizienz einzelner Erzeuger bestimmen, sondern auch die Erzeuger überwachen. D. h. Leistungseinbrüche, weil z. B. Volumenströme nicht mehr stimmen, Kälte- oder Schmiermittel fehlen oder andere Maschinendefekte vorliegen, könnten automatisiert erkannt und zu einer qualifizierten Störmeldung verarbeitet werden.

Der Autor kann sich vorstellen, dass ein solcher, hier ansatzweise beschriebener Datenlogger, Grundlage für eine wirtschaftliche Umsetzung ist. Gleichzeitig würde dieser eine bessere Betriebsüberwachung erlauben. Ob solche Datenlogger als gesondertes Bauteil oder integriert in die Gebäudeleittechnik entwickelt werden ist dabei unerheblich. Entscheidend sind der Entwicklungs- und Implementationsaufwand.

7.2.2 Energiepreisentwicklung und CO₂-Emissionswerte

Für die Wirtschaftlichkeit ist weiterhin entscheidend, wie lange eingangs angenommene Parameter bestehen bleiben. Eine gut geplante und einmal einregulierte Anlage ändert selten nachhaltig ihre Systemtemperaturen. D. h. die Temperaturabhängigkeit einzelner Verbraucherkreise insbesondere vom Außenklima bleibt unverändert. Das Nutzerverhalten beeinflusst dann im Wesentlichen den Energieverbrauch. Auch die Soletemperaturen sollten (bei richtiger Auslegung) langfristig nur innerhalb eines gewissen Temperaturfensters schwanken. Wirkungsgrade der Erzeuger können schon gar nicht ohne größeren Eingriff verändert werden. Der Einfluss von Störungen und Defekten sei hier ausgenommen. Kritisch und unvorhersehbar sind und bleiben die Eigenschaftsfaktoren der Primärenergie. Energiepreise und CO₂-Emissionswerte können schwanken oder sich dauerhaft verändern. Wie die Auswertungen gezeigt haben, vgl. Kapitel 5.4, können sie sogar extremen Einfluss nehmen. Einerseits beeinflussen sie die CO₂-Emissionen bzw. Gesamtenergiekosten schon mit der klassischen Regelungsvariante stark, andererseits nehmen diese nicht unerheblich Einfluss auf das Einsparpotential mit dem neuen Regelungsansatz.

Politischer Wille ist, den regenerativen Anteil am Stromverbrauch auf 40 % bis 45 % im Jahr 2025 und auf 80 % im Jahr 2050 zu steigern.¹¹¹ Um das Ziel zu erreichen, ist ein Mix verschiedener Energiequellen erforderlich. Während beispielsweise der Ertrag aus Photovoltaik im Sommer höher ausfällt, kann Windkraft im Winter mehr Strom liefern. Die Stromnetze bilden Verbindungs- und Ausgleichselement zwischen Erzeugern und Verbrauchern. Mit den nicht exakt vorherseh- und beeinflussbaren regenerativen Erzeugern am Netz steigt der Regelungsaufwand. Deshalb werden sogenannte intelligente Stromnetze benötigt. Kernaufgabe ist die Erzeugung und den Verbrauch soweit wie möglich aufeinander abzustimmen, dass ein möglichst geringer Ausgleich erforderlich wird. Die Verbraucher benötigen intelligente Zähler, auch Smart-Meter genannt. Variable Stromtarife könnten dann Anreize schaffen, dass der Verbrauch an aktuelle Netzsituationen angepasst wird.¹¹²

Nur ein Teil der Verbraucher ist in der Lage, seinen Stromeinsatz zeitlich variabel zu gestalten. Ziel eines intelligenten Stromnetzes ist, mögliche Verbraucher bei Lastspitzen ab- bzw. bei Überangebot zuzuschalten. Dafür benötigt der Verbraucher Informationen zum aktuellen Strompreis und möglichst Informationen zum erwarteten weiteren Verlauf. Wärmepumpen können zur Lastverschiebung einen guten Beitrag leisten. Voraussetzung ist eine gewisse Preisstabilität, damit Mindestlaufzeiten erreicht werden können.

Wärmepumpenanlagen können sowohl kurzfristig ab- als auch zugeschaltet werden. Somit kann eine Netzentlastung oder der Verbrauch überschüssigen Stroms erreicht werden. Die Erzeugerleistung kann im einfachsten Fall auf einen Erzeuger mit anderem Energieträger verlagert werden. Gebäude (inkl. hydraulischer Speicher) können auch als große thermische Speicher betrachtet werden. Zu Zeiten hohen Stromangebots wird mehr als die benötigte Wärme bzw. Kälte erzeugt. Diese kann in Pufferspeichern kurzzeitig eingelagert werden. Das Gebäude kann darüber hinaus in schmalen Grenzen zu Heizzeiten überheizt bzw. Kühlzeiten unterkühlt werden. Zu Zeiten teuren Stroms kann anstelle von Wärmepumpenbetrieb die thermisch gespeicherte Energie genutzt werden. Wärme- und Kältespeicher können dazu entladen werden. Außerdem reagieren Räume trägheitsbedingt nur verzögert auf eine kurzfristig reduzierte bzw. unterbrochene Versorgung.

¹¹¹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, 2014, S. 7.

¹¹² Vgl. Motsch, W. in: Aichele, C. (Hrsg.), Smart Energy, 2012, S. 232 f.

Variable Stromtarife können den hier beschriebenen Regelungsansatz positiv unterstützen. Der wirtschaftliche Effekt kann dadurch deutlich gesteigert werden. Es sind aber auch CO₂-Emissionseinsparungen vorstellbar. Auf absehbare Zeit ist eine ausschließlich regenerative Stromerzeugung in Deutschland unwahrscheinlich. Teurer Strom ist ein Zeichen notwendiger konventioneller Stromerzeugung. Sollte diese beispielsweise aus Stein- oder Braunkohle erfolgen, kann von einem deutlich höheren CO₂-Emissionswert (vgl. **Tabelle 1**) für den Spitzenlaststrom ausgegangen werden. Die Energiepreisschwankung wird die Effizienz des Regelungsansatzes entscheidend beeinflussen. Je größer die Preisunterschiede im Tages- und Jahresverlauf, desto effektiver kann die hier vorgestellte Regelstrategie werden. Im Jahr 2014 betrug der durchschnittliche Haushaltsstrompreis 29,8 ct/kWh_{el}. Davon entfiel auf die Beschaffungskosten jedoch nur ein Anteil von 19 %.¹¹³ Entscheidender als die Strombeschaffungskosten wird aus Sicht des Autors aber, welche Gesamtkosten für anderweitigen Netzausgleich anfallen und wie diese auf die Preise umgelegt werden.

Variantenmodell E (vgl. Kapitel 5.4) hat den Einfluss der Energiepreise und CO₂-Emissionswerte mittels statischer Veränderung über den gesamten Betrachtungszeitraum untersucht. Festgestellt wurde ein deutlicher Einfluss. Variable Stromtarife oder die Kenntnis der CO₂-Emissionswerte des aktuellen Strommixes führen bei Veränderung in kleineren Zeitabschnitten zu einer entsprechenden Wirkung. Hierbei sind insbesondere deren Verhältnisse relevant.

7.2.3 Vorteile der Systementwicklung und Umsetzungsempfehlung

Ausgehend von einer hydraulisch intakten und einregulierten Erzeugungsanlage kann die Anwendung des hier vorgestellten Regelungsansatzes zu Einsparungen führen. Diese sind, wie die Parametervariationen (vgl. Kapitel 5) gezeigt haben, von den Rahmenbedingungen abhängig. Stark schwankende (System- bzw. Sole-) Temperaturen deuten auf ein hohes Einsparpotential hin. Insbesondere zeitweise hohe Temperaturspreizungen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke fördern dies. Auch (zukünftig) veränderliche Energiepreise können den Regelungsansatz positiv unterstützen.

Die Anwendung des Regelungsansatzes kann zu keinen wesentlichen Nachteilen führen. Größtes Risiko liegt in der Umschalthäufigkeit zwischen den Erzeugern, welche es durch geeignete Wahl der Hysterese (vgl. **Formel 9**) zu minimieren gilt. Weiterhin steht der Implementationsaufwand dem Nutzen des Regelungsansatzes entgegen. Dieser hängt stark von erforderlicher Messtechnik und dem möglichen Automatisierungsgrad ab.

¹¹³ Vgl. Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.), Strompreis 2014 und seine Bestandteile, 2015.

Der Regelungsansatz bleibt bei ordnungsgemäßer Anwendung für den Wärme- bzw. Kältenutzer unerkannt. Der Regelungsansatz nimmt lediglich eine andere Verteilung auf unterschiedliche Erzeuger vor. Eine Unterversorgung ist hierdurch aber nicht zu erwarten.

Gebäude und Erzeugungsanlagen werden nach der Inbetriebnahme meist mehrere Jahre (oder Jahrzehnte) genutzt, bestenfalls ohne Änderungen. Oft ist über die Betriebsphase unterschiedliches Betreiber- und Wartungspersonal für die Anlage zuständig. Unvermeidbar sind über die Zeitspannen veränderte Rahmenbedingungen. Energieeigenschaftsfaktoren werden mit der Zeit andere Werte annehmen. Innere- und äußere Lasten schwanken und verändern sich nutzungs- und klimabedingt. Hieraus können veränderliche System-, Erdwärmequellen- und Wärmesenktemperatures entstehen. Vorteil des Regelungsansatzes ist die automatisierte Anpassung an über die Zeit veränderliche Zustände. Es brauchen lediglich die aktuellen Energieeigenschaftsfaktoren parametrisiert werden, sofern diese zukünftig nicht automatisiert verfügbar sein sollten.

Der Regelungsansatz beugt dem vor, dass unter stark abweichenden Rahmenbedingungen nach mehreren Jahren Nutzung eine grundlegende Anpassung der Regelungsstrategie erforderlich wird. Mit zunehmendem Alter der Erzeugungsanlage und Technikfortschritt werden solche Eingriffe immer komplizierter.

Entscheidend bleiben jedoch die Schwankungsbreiten der Systemtemperaturen, aus welchen unterschiedlichen Einsatzbedingungen der Erzeuger resultieren. Eine zustandsbedingt unterschiedliche Präferenzierung der Erzeuger führt insbesondere mit variablen Stromtarifen im zukünftig intelligenten Stromnetz zu Effizienzsteigerungen. Es ist kein nennenswerter Einfluss auf die Heiz- und Kühlkreise des Gebäudes und damit keine Beeinträchtigung der konditionierten Räume zu erwarten. Das vorgestellte Konzept ist somit hervorragend geeignet, in bivalenten Wärmepumpenanlagen eingesetzt zu werden, um Energiekosten oder CO₂-Emissionen ohne Veränderung der Versorgungssicherheit zu erzielen.

ANHANG

ÜBERSICHT

Basisvariante A – hydraulischer Aufbau (Kurzübersicht und Attribute).....	106
Basisvariante A – Erzeuger (Kurzübersicht und Attribute).....	107
Basisvariante A – Regelungstechnik (Kurzübersicht und Attribute).....	108
Basisvariante A – Primärenergiefaktoren (Kurzübersicht und Attribute).....	108
Basisvariante A – Simulationsergebnisdaten.....	109
Basisvariante A – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten	109
Modellvarianten B – Simulationsergebnisdaten.....	110
Modellvarianten B – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten.....	111
Modellvarianten C Teil 1 – Simulationsergebnisdaten.....	112
Modellvarianten C Teil 2 – Simulationsergebnisdaten.....	113
Modellvarianten C Teil 1 – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten.....	114
Modellvarianten C Teil 2 – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten.....	115
Modellvariante D.1 – Leistungskennlinien und Leistungszahlen WP.....	116
Modellvariante D.2 – Leistungskennlinien und Leistungszahlen WP.....	117
Modellvariante D.3 – Leistungskennlinien und Leistungszahlen WP.....	118
Modellvariante D.4 – Leistungskennlinien und Leistungszahlen WP.....	119
Modellvarianten D – Simulationsergebnisdaten.....	120
Modellvarianten D – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten	121
Modellvarianten E – Simulationsergebnisdaten.....	122
Modellvarianten E – Übersicht CO ₂ -Emissionen und Energiekosten.....	123

Tabelle 33: Basisvariante A – hydraulischer Aufbau des Simulationsmodells

	Ansatz in Basisvariante	Bemerkung
Hydraulischer Aufbau	Parallele Einspeisung der Erzeuger in hydraulische Weiche, Belastung der hydraulischen Weiche mit Lastgang	Vgl. Abbildung 10
Erzeugerkombination	BWK, WP, KM	
Verbraucher	Werden mit dem Lastgang abgebildet, keine Berücksichtigung einzelner Verbraucher.	Lastgang vgl. Abbildung 18 und Abbildung 19
Volumen der hydraulischen Weiche Wärme	4 m ³	
Volumen der hydraulischen Weiche Kälte	4 m ³	
Systemverluste	Keine	In Lastgang enthalten

Tabelle 34: Basisvariante A – Erzeugermodule

		Ansatz in Basisvariante	Bemerkung
Leistung	BWK	1.620 kW _{th.}	Leistung regelbar
	WP	200 - 250 kW _{th.} 200 - 250 kW _{Kälte}	Heiz- und/oder Kühlbetrieb; Leistung nicht regelbar
	KM	2 · 690 kW _{Kälte}	VL-Temperatur geregelt
Kennlinien	BWK	Vgl. Abbildung 11	
	WP	Vgl. Abbildung 12	
	KM	Vgl. Abbildung 14	
Temperatur	BWK	Berechnet im Simulationsmodell: - RL-Temperatur aus Speichermodul - VL-Temperatur resultiert aus Erzeugermodul	
	KM		
	WP Wärme-erzeugung		
	WP Kälte-erzeugung		
	WP Sole	Berechnet im Erdreichmodul	Erdreichmodul vgl. Abbildung 17
Volumenstrom	BWK	37 m ³ /h	
	WP Wärme-erzeugung	24 m ³ /h	
	WP Kälte-erzeugung	30 m ³ /h	
	WP Sole	106 m ³ /h	
	KM	2 · 144 m ³ /h	

Tabelle 35: Basisvariante A – Ablaufstruktur (Regelungstechnik)

	Ansatz in Basisvariante	Bemerkung
Erzeugerwahl Wärme	PI-Regler vergleicht Speicher- austrittstemperatur mit Sollwert und schaltet Erzeuger zu bzw. ab	
Erzeugerwahl Kälte	PI-Regler vergleicht Speicher- austrittstemperatur mit Sollwert und schaltet Erzeuger zu bzw. ab	
Leistungsregelung BWK	Durch Volumenstrom für kleine Leistungen Durch VL-Temperatur für größere Leistungen	
Leistungsregelung WP	keine	
Grenztemperatur WP Heizkreis	RL HK < 45 °C	
Grenztemperatur WP Kühlkreis	RL KK > 14 °C	
Grenztemperatur WP Erdreich	Sole-RL > 0 °C	
Leistungsregelung KM	Regelung auf feste VL- Temperaturen (über Kennlinie)	

Tabelle 36: Basisvariante A – Primärenergiefaktoren

		Ansatz in Basisvariante	Bemerkung
Emissions- wert	Gas	251 g/kWh _{Gas}	konstant
	Strom	562 g/kWh _{el.}	konstant
Preis	Gas	0,031 €/kWh _{Gas}	konstant
	Strom	0,112 €/kWh _{el.}	konstant

Tabelle 37: Basisvariante A – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum

	Basisvariante			
	klassisch	monetär	ökologisch	HK: monetär KK: klassisch
Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,45	0,32	0,44	0,33
Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06
RL-Temp. [°C]	42,2	41,8	42,2	41,8
Wärmeerzeugung [MWh]	4.745	6.548	4.749	6.549
Gasverbrauch [MWh]	4.575	6.296	4.579	6.297
Wirkungsgrad [-]	1,051	1,051	1,051	1,051
RL-Temp. Heizkreis [°C]	42,1	41,6	42,1	41,6
RL-Temp. Sole [°C]	7,9	14,0	8,0	14,0
Wärmeerzeugung [MWh]	2.004	129	1.994	129
Stromverbrauch [MWh]	737	43	733	43
Leistungszahl [-]	2,70	2,94	2,70	2,94
Wärmeerzeugung [MWh]	1.103	1.181	1.109	1.181
Kälteerzeugung [MWh]	780	834	784	834
Stromverbrauch [MWh]	323	347	325	347
Leistungszahl [-]	5,70	5,70	5,70	5,70
RL-Temp. Kühlkreis [°C]	16,2	16,1	16,1	16,1
RL-Temp. Sole [°C]	21,8	22,4	21,8	22,4
Kälteerzeugung [MWh]	910	855	913	860
Stromverbrauch [MWh]	218	208	219	210
Leistungszahl [-]	4,10	4,04	4,10	4,03
Kälteerzeugung [MWh]	2.683	2.684	2.675	2.687
Stromverbrauch [MWh]	805	805	802	806
Leistungszahl [-]	3,45	3,45	3,45	3,45

Tabelle 38: Basisvariante A – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

CO ₂ -Ausstoß [t]		Basisvariante			
		klassisch	monetär	ökologisch	HK: monetär KK: klassisch
BWK	Gas	1.148	1.580	1.149	1.580
WP-H	Strom	414	24	412	24
WP-S	Strom	181	195	182	195
WP-K	Strom	122	117	123	118
KM	Strom	452	452	451	453
	Summe	2.319	2.368	2.317	2.370
Einsparung absolut			-50	1	-51
Einsparung relativ			-2,2 %	0,1 %	-2,2 %

Energiekosten [€]		Basisvariante			
		klassisch	monetär	ökologisch	HK: monetär KK: klassisch
BWK	Gas	141.819	195.185	141.946	195.198
WP-H	Strom	82.566	4.794	82.118	4.771
WP-S	Strom	36.165	38.819	36.366	38.842
WP-K	Strom	24.360	23.307	24.472	23.475
KM	Strom	90.138	90.138	89.824	90.272
	Summe	375.048	352.243	374.727	352.558
Einsparung absolut			22.805	321	22.490
Einsparung relativ			6,1 %	0,1 %	6,4 %

Tabelle 39: Modellvarianten B – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum

	Temperaturen HK - 10 K			Temperaturen HK - 5 K			Temperaturen HK + 5 K			Temperaturen HK + 10 K		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,53	0,43	0,53	0,50	0,39	0,50	0,11	0,06	0,11	-0,01	-0,03	-0,01
Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07
RL-Temp. [°C]	32,1	31,9	32,1	37,1	36,9	37,1	47,0	46,8	47,0	51,6	51,5	51,6
Wärmeerzeugung [MWh]	4.122	6.429	4.120	4.162	6.468	4.163	7.124	7.485	7.119	7.715	7.754	7.713
Gasverbrauch [MWh]	3.817	5.964	3.815	3.920	6.100	3.921	6.996	7.341	6.992	7.702	7.739	7.700
Wirkungsgrad [-]	1,091	1,088	1,091	1,073	1,071	1,073	1,029	1,030	1,029	1,011	1,011	1,011
RL-Temp. Heizkreis [°C]	33,0	30,6	33,0	38,0	36,7	38,0	42,8	43,0	42,8	40,9	42,7	40,9
RL-Temp. Sole [°C]	6,5	13,1	6,5	6,8	13,5	6,8	12,6	15,9	12,6	15,1	16,0	15,1
WP-H Wärmeerzeugung [MWh]	2.589	227	2.594	2.545	177	2.545	401	14	403	57	2	57
Stromverbrauch [MWh]	820	63	822	883	55	883	139	5	140	19	1	19
Leistungszahl [-]	3,14	3,53	3,15	2,87	3,18	2,87	2,85	2,93	2,85	3,02	3,00	3,02
Wärmeerzeugung [MWh]	1.134	1.204	1.130	1.138	1.214	1.136	330	355	331	84	99	84
Kälteerzeugung [MWh]	855	906	852	831	885	830	233	251	234	60	71	60
WP-S Stromverbrauch [MWh]	280	298	279	307	329	306	97	104	97	24	28	24
Leistungszahl [-]	6,95	6,92	6,95	6,28	6,26	6,28	5,65	5,67	5,64	5,81	5,83	5,81
RL-Temp. Kühlkreis [°C]	16,2	16,1	16,2	16,2	16,1	16,2	16,1	16,2	16,2	16,1	16,2	16,2
RL-Temp. Sole [°C]	21,4	22,4	21,5	21,5	22,4	21,5	24,8	24,7	24,6	25,7	25,2	25,2
WP-K Kälteerzeugung [MWh]	894	838	894	889	836	893	1.573	1.509	1.531	1.781	1.686	1.696
Stromverbrauch [MWh]	212	204	212	211	204	212	411	392	397	477	445	447
Leistungszahl [-]	4,14	4,04	4,14	4,14	4,04	4,14	3,78	3,80	3,81	3,70	3,74	3,74
Kälteerzeugung [MWh]	2.620	2.628	2.624	2.650	2.651	2.649	2.565	2.608	2.605	2.528	2.608	2.606
KM Stromverbrauch [MWh]	787	788	787	795	795	794	770	782	781	759	781	781
Leistungszahl [-]	3,44	3,45	3,44	3,45	3,45	3,45	3,44	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45

Tabelle 40: Modellvarianten B – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

CO ₂ -Ausstoß [t]												
Temperaturen HK - 10 K			Temperaturen HK - 5 K			Temperaturen HK + 5 K			Temperaturen HK + 10 K			
klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	
BWK Gas	958	1.497	958	1.531	984	1.756	1.843	1.755	1.933	1.943	1.933	
WP-H Strom	461	35	496	31	496	78	3	78	10	0	10	
WP-S Strom	157	168	172	185	172	54	59	55	14	16	13	
WP-K Strom	119	115	118	114	119	231	220	223	268	250	251	
KM Strom	442	443	447	447	446	433	439	439	427	439	439	
Summe	2.137	2.257	2.137	2.308	2.218	2.552	2.564	2.550	2.651	2.648	2.647	
Einsparung absolut		-120		-90	0		-12	2		4	5	
Einsparung relativ		-5,6 %		-4,1 %	0,0 %		-0,5 %	0,1 %		0,1 %	0,2 %	

Energiekosten [€]												
Temperaturen HK - 10 K			Temperaturen HK - 5 K			Temperaturen HK + 5 K			Temperaturen HK + 10 K			
klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	
BWK Gas	118.333	184.869	118.271	189.094	121.554	216.888	227.583	216.755	238.768	239.915	238.712	
WP-H Strom	91.840	7.056	92.008	6.104	98.918	15.534	504	15.635	2.072	67	2.072	
WP-S Strom	31.315	33.398	31.203	36.814	34.317	10.853	11.693	10.909	2.699	3.170	2.688	
WP-K Strom	23.722	22.826	23.733	22.814	23.722	46.010	43.938	44.430	53.368	49.806	50.109	
KM Strom	88.088	88.278	88.166	89.029	88.962	86.251	87.550	87.461	84.997	87.506	87.427	
Summe	353.298	336.427	353.382	343.855	367.473	375.536	371.268	375.190	381.904	380.464	381.008	
Einsparung absolut		16.871		23.556	-61		4.268	346		1.440	896	
Einsparung relativ		4,8 %		6,4 %	0,0 %		1,1 %	0,1 %		0,4 %	0,2 %	

Tabelle 42: Modellvarianten C Teil 2/2 – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum

	geringere Speicher- kapazität Erreich	höhere Speicher- kapazität Erreich	
	klassisch	monetär	ökologisch
Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,44	0,33	0,44
Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,05	-0,05
RL-Temp. [°C]	42,1	41,8	42,2
Wärmeerzeugung [MWh]	4.794	6.548	4.799
Gasverbrauch [MWh]	4.622	6.296	4.626
Wirkungsgrad [-]	1,051	1,051	1,051
RL-Temp. Heizkreis [°C]	42,1	41,5	42,1
RL-Temp. Sole [°C]	6,9	13,8	6,8
WP-H Wärmeerzeugung [MWh]	1.950	130	1.948
Stromverbrauch [MWh]	728	43	728
Leistungszahl [-]	2,66	2,94	2,66
Wärmeerzeugung [MWh]	1.108	1.181	1.105
Kälteerzeugung [MWh]	783	834	782
Stromverbrauch [MWh]	325	347	324
Leistungszahl [-]	5,70	5,70	5,70
RL-Temp. Kühlkreis [°C]	16,1	16,2	16,2
RL-Temp. Sole [°C]	23,7	24,2	23,4
WP-K Kälteerzeugung [MWh]	900	811	879
Stromverbrauch [MWh]	228	208	220
Leistungszahl [-]	3,89	3,83	3,92
Kälteerzeugung [MWh]	2.687	2.726	2.712
Stromverbrauch [MWh]	806	817	813
Leistungszahl [-]	3,45	3,45	3,45

Tabelle 43: Modellvarianten C Teil 1/2 – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

CO ₂ -Ausstoß [t]												
Sole-RL fix 10 °C			Soletemperaturen + 5 K			Soletemperaturen - 5 K						
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
BWK Gas	1.125	1.581	1.126	1.106	1.579	1.106	1.198	1.581	1.199			
WP-H Strom	421	25	420	422	24	422	392	25	390			
WP-S Strom	182	195	182	181	195	181	183	195	183			
WP-K Strom	91	85	91	137	130	136	109	104	109			
KM Strom	440	440	439	456	456	457	446	447	446			
Summe	2.258	2.326	2.258	2.302	2.384	2.302	2.328	2.353	2.327			
Einsparung absolut		-69	0		-82	0		-25	0			
Einsparung relativ		-3,0 %	0,0 %		-3,6 %	0,0 %		-1,1 %	0,0 %			

Energiekosten [€]												
Sole-RL fix 10 °C			Soletemperaturen + 5 K			Soletemperaturen - 5 K						
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
BWK Gas	138.889	195.275	139.041	136.555	195.015	136.586	147.917	195.254	148.047			
WP-H Strom	83.877	4.995	83.619	84.168	4.704	84.078	78.053	5.029	77.773			
WP-S Strom	36.277	38.808	36.310	36.008	38.819	36.053	36.501	38.853	36.534			
WP-K Strom	18.043	17.035	18.066	27.272	25.995	27.115	21.672	20.787	21.717			
KM Strom	87.618	87.696	87.573	90.966	90.955	91.078	88.962	89.141	88.872			
Summe	364.704	343.810	364.609	374.969	355.488	374.911	373.104	349.063	372.943			
Einsparung absolut		20.894	95		19.481	59		24.041	161			
Einsparung relativ		5,7 %	0,0 %		5,2 %	0,0 %		6,4 %	0,0 %			

Tabelle 44: Modellvarianten C Teil 2/2 – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

		CO ₂ -Ausstoß [t]					
		geringere Speicher- kapazität Erreich			höhere Speicher- kapazität Erreich		
		klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
BWK	Gas	1.160	1.580	1.161	1.138	1.580	1.139
WP-H	Strom	409	24	409	417	25	415
WP-S	Strom	182	195	182	182	195	182
WP-K	Strom	128	117	124	118	113	118
KM	Strom	453	459	457	450	450	450
	Summe	2.333	2.375	2.332	2.305	2.362	2.305
	Einsparung absolut		-43	0		-57	0
	Einsparung relativ		-1,8 %	0,0 %		-2,5 %	0,0 %

		Energiekosten [€]					
		geringere Speicher- kapazität Erreich			höhere Speicher- kapazität Erreich		
		klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
BWK	Gas	143.279	195.173	143.412	140.532	195.080	140.694
WP-H	Strom	81.570	4.827	81.514	83.048	4.883	82.768
WP-S	Strom	36.355	38.830	36.243	36.243	38.842	36.221
WP-K	Strom	25.480	23.285	24.662	23.542	22.422	23.587
KM	Strom	90.272	91.470	91.011	89.734	89.768	89.678
	Summe	376.956	353.586	376.843	373.100	350.995	372.948
	Einsparung absolut		23.370	113		22.105	152
	Einsparung relativ		6,2 %	0,0 %		5,9 %	0,0 %

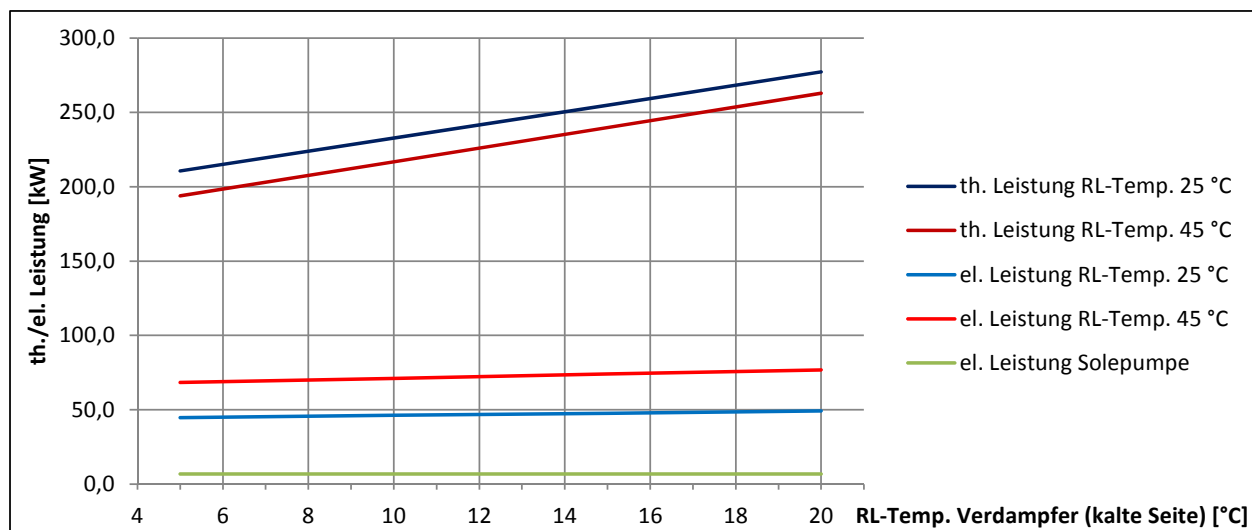


Abbildung 31: Modellvariante D.1 – Leistungskennlinien WP-II

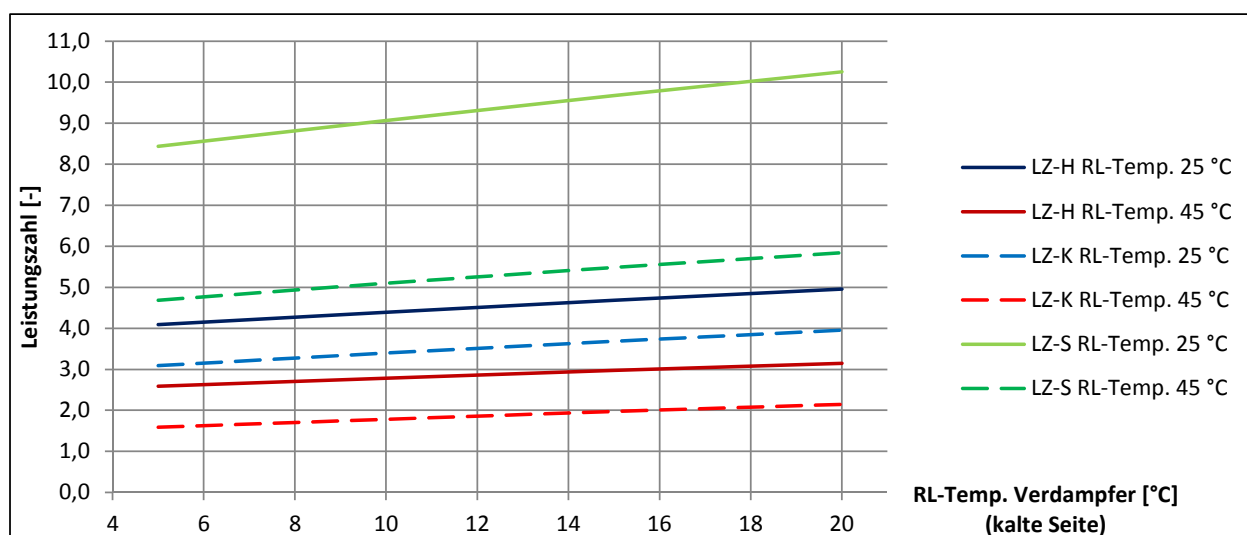
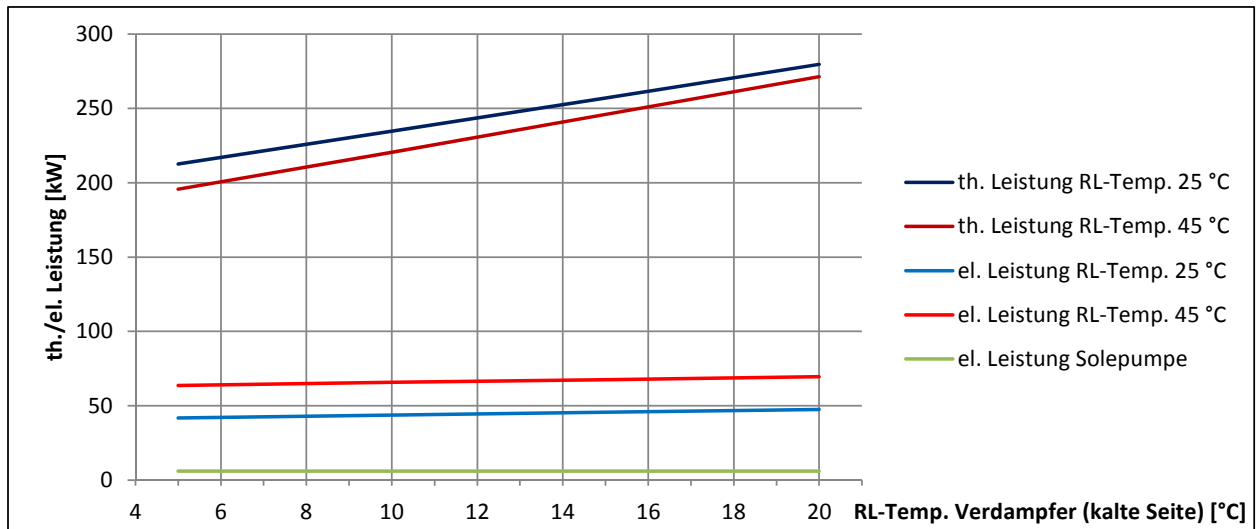
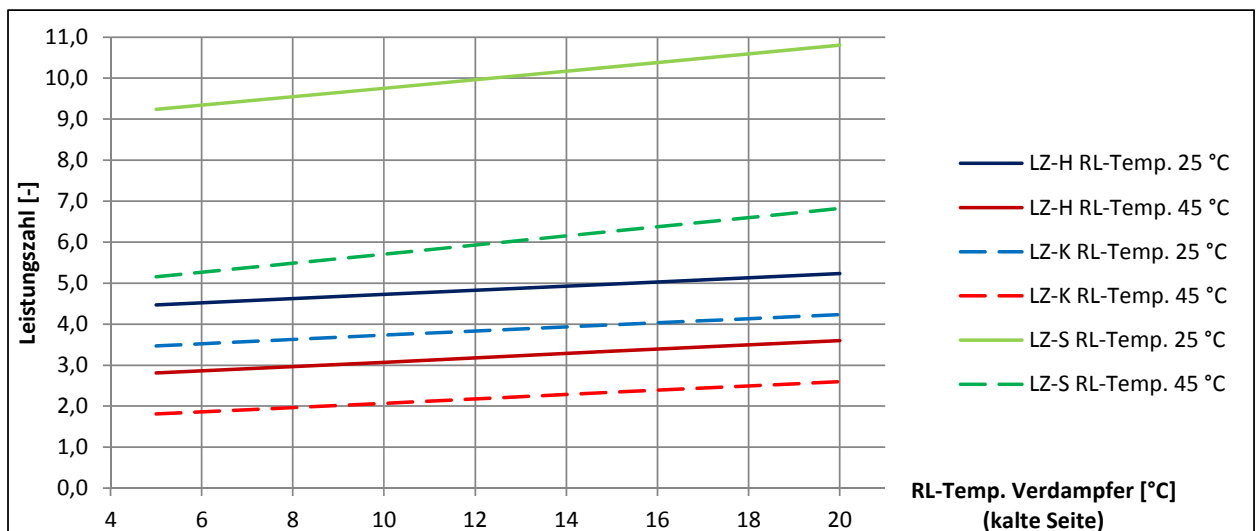


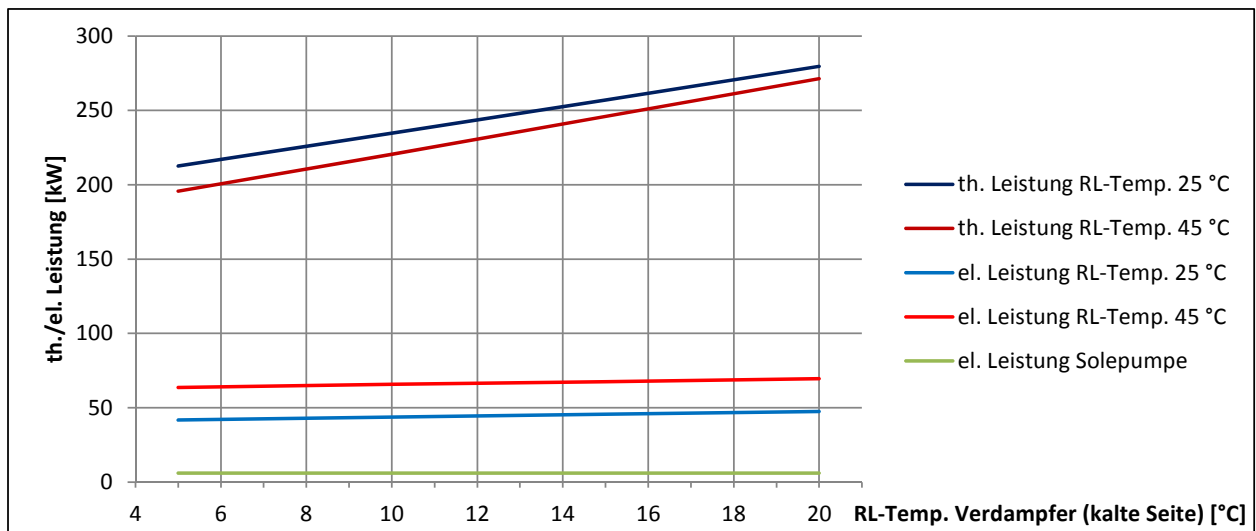
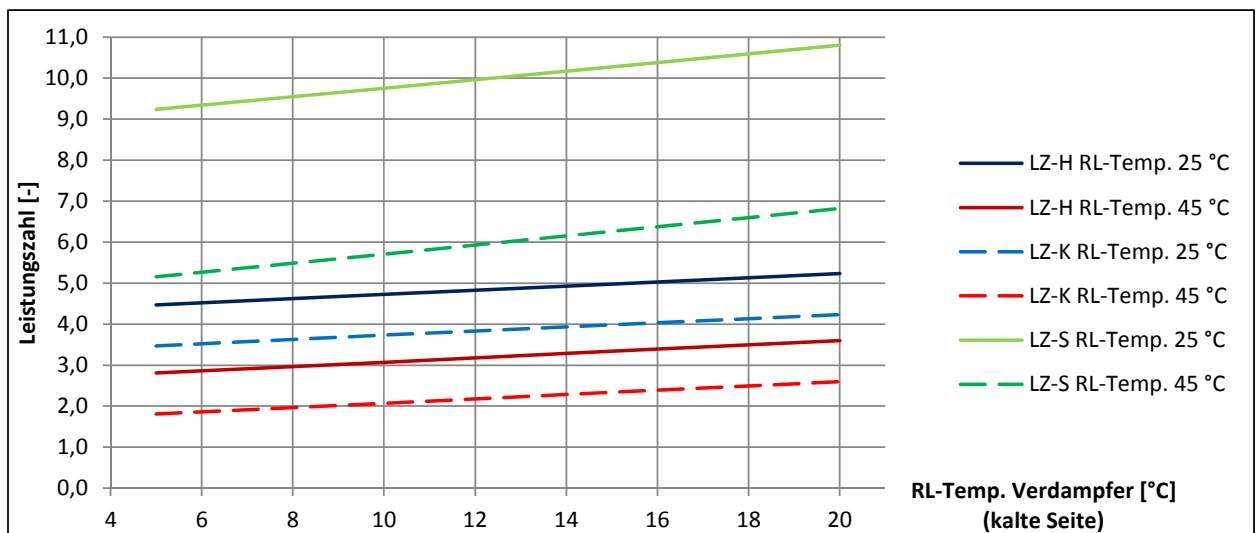
Abbildung 32: Modellvariante D.1 – Leistungszahlen WP-II

Tabelle 45: Modellvariante D.1 – Kennlinien WP-II, numerisch

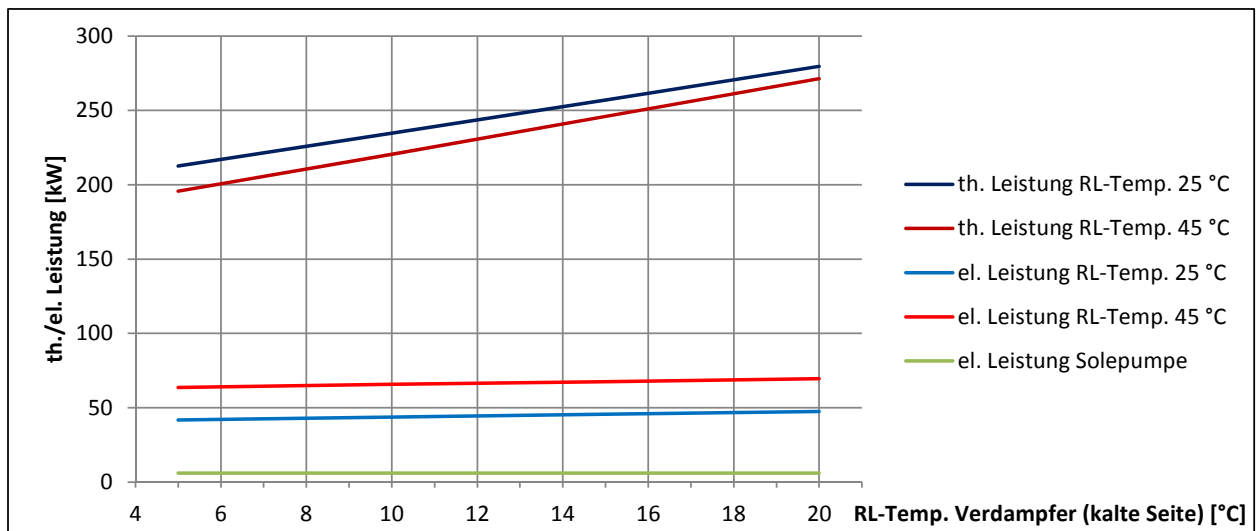
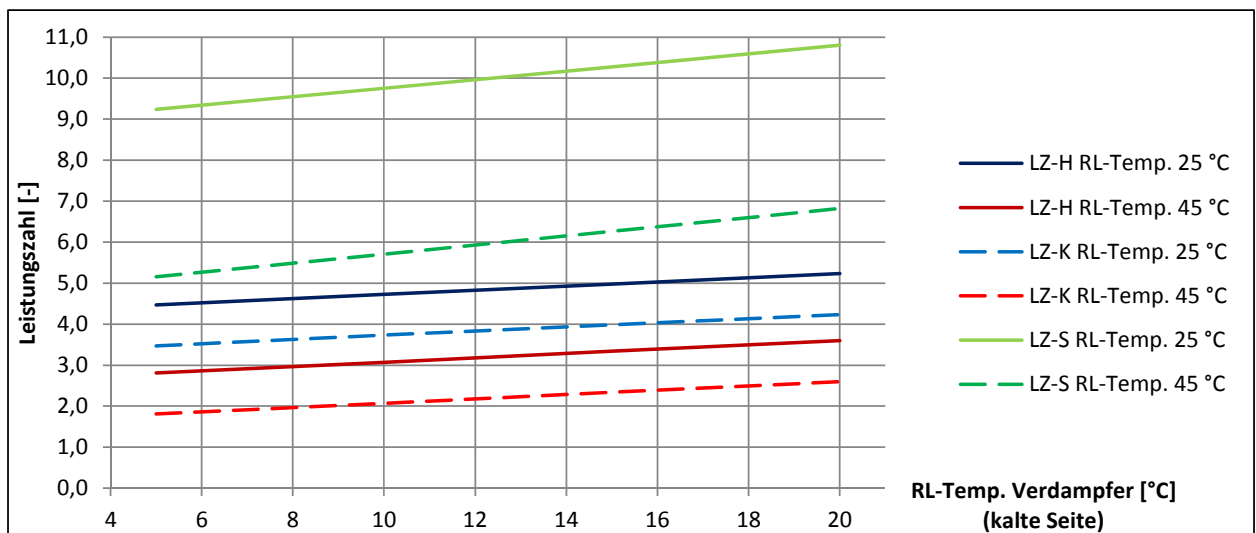
[illegible]

Abbildung 33: Modellvariante D.2 – Leistungskennlinien WP-I mit $P_{el, \text{Solepumpe}} \cdot 2$ Abbildung 34: Modellvariante D.2 – Leistungszahlen WP-I mit $P_{el, \text{Solepumpe}} \cdot 2$ Tabelle 46: Modellvariante D.2 – Kennlinien WP-I mit $P_{el, \text{Solepumpe}} \cdot 2$, numerisch

		RL-Temp. zum Kondensator [°C]	RL-Temp. zum Verdampfer [°C]						
			0	5	10	15	20	25	
th. Leistung	25	191,2	212,6	234,6	257,0	279,6	302,6	[kW]	
	45	163,0	195,6	220,4	245,8	271,4	297,4	[kW]	
el. Leistung	25	41,2	41,6	43,6	45,6	47,4	49,0	[kW]	
	45	56,4	63,6	65,8	67,6	69,4	70,8	[kW]	
el. Leistung Solepumpe	25	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	[kW]	
	45	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	[kW]	

Abbildung 35: Modellvariante D.3 – Leistungskennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h + 10\%$ Abbildung 36: Modellvariante D.3 – Leistungszahlen WP-I mit $\dot{Q}_h + 10\%$ Tabelle 47: Modellvariante D.3 – Kennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h + 10\%$, numerisch

		RL-Temp. zum Kondensator [°C]	RL-Temp. zum Verdampfer [°C]						
			0	5	10	15	20	25	
th. Leistung	25	210,3	233,9	258,1	282,7	307,6	332,9	[kW]	
	45	179,3	215,2	242,4	270,4	298,5	327,1	[kW]	
el. Leistung	25	41,2	41,6	43,6	45,6	47,4	49,0	[kW]	
	45	56,4	63,6	65,8	67,6	69,4	70,8	[kW]	
el. Leistung Solepumpe	25	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	
	45	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	

Abbildung 37: Modellvariante D.4 – Leistungskennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h$ - 10 %Abbildung 38: Modellvariante D.4 – Leistungszahlen WP-I mit $\dot{Q}_h$ - 10 %Tabelle 48: Modellvariante D.4 – Kennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h$ - 10 %, numerisch

		RL-Temp. zum Kondensator [°C]	RL-Temp. zum Verdampfer [°C]						
			0	5	10	15	20	25	
th. Leistung	25	172,1	191,3	211,1	231,3	251,6	272,3	[kW]	
	45	146,7	176,0	198,4	221,2	244,3	267,7	[kW]	
el. Leistung	25	41,2	41,6	43,6	45,6	47,4	49,0	[kW]	
	45	56,4	63,6	65,8	67,6	69,4	70,8	[kW]	
el. Leistung Solepumpe	25	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	
	45	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	[kW]	

Tabelle 49: Modellvarianten D – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum

	Wärmepumpenkennlinie der WP-II			Nebenstromverbrauch der WP-I erhöht			WP-I Heizkennlinie + 10 %			WP-I Heizkennlinie - 10 %		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,42	0,30	0,42	0,44	0,31	0,44	0,55	0,40	0,55	0,35	0,26	0,35
Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,07	-0,06	-0,04	-0,04	-0,04
RL-Temp. [°C]	42,2	41,8	42,2	42,2	41,8	42,2	42,2	41,9	42,2	42,1	41,7	42,1
Wärmeerzeugung [MWh]	4.761	6.556	4.764	4.737	6.555	4.748	4.580	6.504	4.583	4.925	6.598	4.930
Gasverbrauch [MWh]	4.590	6.303	4.592	4.567	6.302	4.577	4.417	6.255	4.420	4.746	6.343	4.751
Wirkungsgrad [-]	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,050	1,051	1,050	1,051	1,052	1,051
RL-Temp. Heizkreis [°C]	42,1	42,9	42,1	42,1	42,8	42,1	42,1	40,6	42,1	42,1	42,9	42,1
RL-Temp. Sole [°C]	8,2	14,0	8,2	8,1	13,8	8,0	7,6	14,0	7,6	8,4	13,9	8,3
Wärmeerzeugung [MWh]	1.983	120	1.981	2.011	120	1.995	2.149	148	2.146	1.839	113	1.836
Stromverbrauch [MWh]	798	46	797	795	44	791	732	45	731	737	42	736
Leistungszahl [-]	2,47	2,55	2,47	2,51	2,67	2,50	2,91	3,24	2,91	2,48	2,62	2,48
Wärmeerzeugung [MWh]	1.108	1.183	1.108	1.104	1.184	1.109	1.123	1.206	1.122	1.089	1.147	1.086
Kälteerzeugung [MWh]	739	789	739	780	836	784	820	880	819	739	778	737
Stromverbrauch [MWh]	369	394	368	323	347	325	303	327	303	349	369	349
Leistungszahl [-]	4,92	4,93	4,92	5,70	5,71	5,70	6,23	6,23	6,24	5,15	5,15	5,15
RL-Temp. Kühlkreis [°C]	16,1	16,2	16,2	16,1	16,3	16,3	16,2	16,2	16,2	16,1	16,2	16,2
RL-Temp. Sole [°C]	21,8	21,9	21,5	21,9	21,4	21,0	22,3	22,9	22,3	21,3	21,2	20,8
Kälteerzeugung [MWh]	885	791	860	891	722	790	1.044	977	1.049	781	674	731
Stromverbrauch [MWh]	227	204	218	246	196	212	227	216	228	209	180	192
Leistungszahl [-]	3,83	3,81	3,86	3,56	3,60	3,64	4,52	4,44	4,51	3,67	3,69	3,72
Kälteerzeugung [MWh]	2.750	2.794	2.774	2.700	2.810	2.794	2.506	2.516	2.502	2.855	2.921	2.906
Stromverbrauch [MWh]	825	837	831	810	841	836	753	755	751	856	874	870
Leistungszahl [-]	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,44	3,44	3,44	3,45	3,45	3,45

Tabelle 50: Modellvarianten D – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

CO ₂ -Ausstoß [t]												
Wärmepumpen- kennlinie der WP-II			Nebenstromverbrauch der WP-I erhöht			WP-I Heizkennlinie + 10 %			WP-I Heizkennlinie - 10 %			
klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	
BWK Gas	1.152	1.582	1.153	1.146	1.582	1.149	1.109	1.570	1.191	1.592	1.193	
WP-H Strom	448	26	448	447	25	445	411	25	414	24	414	
WP-S Strom	207	221	207	182	195	182	170	184	196	207	196	
WP-K Strom	127	115	123	138	110	119	127	121	117	101	108	
KM Strom	463	470	467	455	472	470	423	424	481	491	489	
Summe	2.398	2.414	2.398	2.368	2.384	2.365	2.241	2.324	2.400	2.415	2.399	
Einsparung absolut		-15	1		-16	3		-84		-15	1	
Einsparung relativ		-0,6 %	0,0 %		-0,7 %	0,1 %		-3,7 %		-0,6 %	0,0 %	

Energiekosten [€]												
Wärmepumpen- kennlinie der WP-II			Nebenstromverbrauch der WP-I erhöht			WP-I Heizkennlinie + 10 %			WP-I Heizkennlinie - 10 %			
klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	
BWK Gas	142.275	195.387	142.364	141.583	195.371	141.896	136.939	193.899	147.117	196.618	147.290	
WP-H Strom	89.365	5.107	89.286	89.074	4.906	88.603	81.995	4.995	82.510	4.715	82.443	
WP-S Strom	41.272	44.106	41.250	36.187	38.898	36.366	33.958	36.579	39.133	41.294	39.032	
WP-K Strom	25.390	22.826	24.461	27.496	21.930	23.744	25.368	24.203	23.386	20.104	21.538	
KM Strom	92.344	93.688	93.094	90.675	94.147	93.643	84.302	84.582	95.827	97.832	97.406	
Summe	390.646	361.113	390.456	385.015	355.251	384.253	362.563	344.259	387.973	360.563	387.710	
Einsparung absolut		29.533	190		29.764	762		18.305		27.410	263	
Einsparung relativ		7,6 %	0,0 %		7,7 %	0,2 %		5,0 %		7,1 %	0,1 %	

Tabelle 51: Modellvarianten E – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum

	Energiepreis Destatis 2013			Strom teurer, weniger Emissionen; Gas billiger			Strom günstiger, noch weniger Emissionen		
	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch	klassisch	monetär	ökologisch
Temperaturabweichung Heizkreis [K]	0,45	0,33	0,44	0,45	0,32	0,45	0,45	0,45	0,44
Temperaturabweichung Kühlkreis [K]	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
BWK	42,2	41,9	42,2	42,2	41,8	42,2	42,2	42,2	42,2
	4.745	6.540	4.749	4.745	6.551	4.747	4.745	5.433	4.748
	4.575	6.289	4.579	4.575	6.298	4.577	4.575	5.238	4.578
	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,049	1,051
WP-H	42,1	40,4	42,1	42,1	42,9	42,1	42,1	41,3	42,1
	7,9	14,0	8,0	7,9	13,9	7,9	7,9	9,7	7,9
	2.004	141	1.994	2.004	121	2.002	2.004	1.318	2.000
	737	46	733	737	41	736	737	465	735
WP-S	2,70	3,01	2,70	2,70	2,86	2,70	2,70	2,81	2,70
	1.103	1.177	1.109	1.103	1.187	1.103	1.103	1.105	1.103
	780	831	784	780	838	780	780	781	780
	323	346	325	323	348	323	323	324	323
WP-K	5,70	5,69	5,70	5,70	5,71	5,70	5,70	5,70	5,70
	16,2	16,1	16,1	16,2	16,1	16,2	16,2	16,2	16,2
	21,8	22,4	21,8	21,8	22,4	21,8	21,8	22,0	21,8
	910	860	913	910	857	912	910	910	913
KM	218	210	219	218	209	218	218	219	219
	4,10	4,04	4,10	4,10	4,04	4,10	4,10	4,07	4,10
	2.683	2.681	2.675	2.683	2.678	2.680	2.683	2.682	2.680
	805	804	802	805	803	803	805	804	804
	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45

Die drei Modellvarianten mit der klassischen Regelungsvariante sind nicht durch die Energieeigenschaftsfaktoren beeinflusst. Modellvariante E.1 ist durch die Emissionen beeinflusst, deren Werte sind mit denen der Basisvariante A identisch. Die Ergebnisse stimmen mit dem Ausgangsmodell A überein. Die Ergebnisse werden hier in grau zur einheitlichen Darstellung und einfacheren Lesbarkeit wiederholt dargestellt.

Tabelle 52: Modellvarianten E – CO₂-Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum

		CO ₂ -Ausstoß [t]											
		Energiepreis Destatis 2013				Strom teurer, weniger Emissionen; Gas billiger				Strom günstiger, noch weniger Emissionen			
		klassisch	monetär	ökologisch		klassisch	monetär	ökologisch		klassisch	monetär	ökologisch	
BWK	Gas	1.148	1.579	1.149		1.148	1.581	1.149		1.148	1.315	1.149	
WP-H	Strom	414	26	412		258	14	258		185	117	185	
WP-S	Strom	181	194	182		113	122	113		81	81	81	
WP-K	Strom	122	118	123		76	73	76		55	55	55	
KM	Strom	452	452	451		282	281	281		202	202	202	
Summe		2.319	2.368	2.317		1.877	2.071	1.877		1.671	1.770	1.671	
Einsparung absolut			-50	1			-194	0			-99	0	
Einsparung relativ			-2,1 %	0,1 %			-10,3 %	0,0 %			-5,9 %	0,0 %	

		Energiekosten [€]											
		Energiepreis Destatis 2013				Strom teurer, weniger Emissionen; Gas billiger				Strom günstiger, noch weniger Emissionen			
		klassisch	monetär	ökologisch		klassisch	monetär	ökologisch		klassisch	monetär	ökologisch	
BWK	Gas	173.842	238.978	173.998		114.370	157.458	114.415		173.842	199.055	173.968	
WP-H	Strom	93.772	5.838	93.263		110.580	6.165	110.415		73.720	46.490	73.540	
WP-S	Strom	41.073	43.986	41.302		48.435	52.200	48.450		32.290	32.370	32.310	
WP-K	Strom	27.666	26.661	27.793		32.625	31.290	32.745		21.750	21.900	21.850	
KM	Strom	102.371	102.269	102.014		120.720	120.435	120.510		80.480	80.410	80.380	
Summe		438.724	417.732	438.371		426.730	367.548	426.535		382.082	380.225	382.048	
Einsparung absolut			20.991	353			59.183	195			1.857	35	
Einsparung relativ			4,8 %	0,1 %			13,9 %	0,0 %			0,5 %	0,0 %	

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

allg.	allgemein
BWK	Brennwertkessel bzw. Brennwertkesselmodul
CO ₂	Kohlenstoffdioxid oder Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance
c _p	massenbezogene (spezifische) Wärmekapazität
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EER	Energy Efficiency Ratio
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
el.	elektrisch
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GLT	Gebäudeleittechnik
HK	Heizkreis
H _u	unterer Heizwert
i. d. R.	in der Regel
IDA ICE	Simulationsumgebung IDA Indoor Climate and Energy
JAZ	Jahresarbeitszahl
KK	Kühlkreis
KM	Kompressionskältemaschine bzw. Kompressionskältemaschinenmodul
LZ	Leistungszahl
-H	für den Heizbetrieb
-K	für den Kühlbetrieb
-S	für den simultanen Heiz- und Kühlbetrieb
P	Leistung
-H	Wärmeleistung (geschrieben P _H bzw. P-H)
-K	Kälteleistung (geschrieben P _K bzw. P-K)
PI (-Regler)	Regler mit proportionalem und integralem Anteil

Q_h	Heizarbeit
Q_k	Kühlarbeit
$\dot{Q}$	Leistung
$\dot{Q}_h$	Wärmeleistung
$\dot{Q}_k$	Kälteleistung
RL	Rücklauf
RLT	Raumluftechnik
stat.	statisch
T, Temp	Temperatur
th.	thermisch
U	Wärmedurchgangskoeffizient
V	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom
VL	Vorlauf
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
Vw	Vergleichswert
W	Energiemenge
WP	Wärmepumpe bzw. Wärmepumpenmodul
-H	für den Heizbetrieb
-K	für den Kühlbetrieb
-S	für den simultanen Heiz- und Kühlbetrieb
X	Primärenergie-Eigenschaftsfaktor (Preis bzw. CO ₂ -Emissionswert)
β	Jahresarbeitszahl
ε	Leistungszahl
η	Wirkungsgrad
φ	rel. Feuchte
θ	Temperatur
ρ	Dichte (volumenbezogene Masse)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Zusammenhang Realanlage und Simulationsmodell in den Varianten	7
Abbildung 2:	Beispiel bivalent-paralleler Betrieb, Zahlen exemplarisch.....	12
Abbildung 3:	Beispiel bivalent-alternativer Betrieb, Zahlen exemplarisch	13
Abbildung 4:	Beispiel bivalent-teilparalleler Betrieb, Zahlen exemplarisch	13
Abbildung 5:	Verlauf Bruttostromerzeugung und Treibhausgasemissionen BRD	23
Abbildung 6:	Messkonzept für Kältemaschine	32
Abbildung 7:	Messkonzept für Heizkessel allg.....	32
Abbildung 8:	Messkonzept für Wärmepumpe	32
Abbildung 9:	Erzeugungsanlage einer Realanlage inkl. Leistungs- und Volumen- stromangaben (Anlagenschema)	35
Abbildung 10:	Aufbaustruktur des Simulationsmodells	37
Abbildung 11:	Wirkungsgrade Brennwertkesselmodul.....	40
Abbildung 12:	Leistungskennlinien WP-I für RL-Temperaturen von 25 °C bzw. 45 °C im Heizkreis	43
Abbildung 13:	Leistungszahlen WP-I	44
Abbildung 14:	Leistungszahlen Kältemaschinenmodul.....	45
Abbildung 15:	Leistungskennlinien Kältemaschinenmodul	46
Abbildung 16:	Ablaufstruktur des Simulationsmodells (Regelungstechnik)	49
Abbildung 17:	Aufbaustruktur des vereinfachten Erdreichmoduls.....	52
Abbildung 18:	Lastgang (Heizen und Kühlen), Tagesmittelwerte	54
Abbildung 19:	VL/RL-Temperaturverläufe des Lastgangs, Tagesmittelwerte	55
Abbildung 20:	Variablenübergabe im Simulationsmodell.....	57
Abbildung 21:	Einflussfaktoren der Realanlage und Parameter (funktional) des Simulationsmodells	60
Abbildung 22:	Basisvariante A, Wärme- und Kälteleistungsverteilung im ökonomischen Fall für den Betrachtungszeitraum, Tagesmittelwerte.....	64
Abbildung 23:	Basisvariante A, Leistungszahlen und Temperaturen der Wärmepumpe im Heizbetrieb für den Betrachtungszeitraum, Tagesmittelwerte.....	65

Abbildung 24: Basisvariante A, Rücklauftemperaturen des Erdreichmoduls, klassische Regelungsvariante über den Betrachtungszeitraum	66
Abbildung 25: Modellvarianten C.2 und C.3 – Rücklauftemperatur des Erdreichmoduls mit klassischer Regelungsvariante	73
Abbildung 26: Modellvariante C.4 und C.5 – Rücklauftemperatur des Erdreichmoduls mit klassischer Regelungsvariante	74
Abbildung 27: Beispielhafter Verlauf von Wärmeleistung, Außen- und Estrich-temperatur bei konventioneller Regelung (links) und wetterbasierter vorausschauender Steuerung (rechts)	93
Abbildung 28: Erdreichtemperaturen Messdaten und gemittelter Temperaturverlauf im Dezember 1. Jahr	95
Abbildung 29: Rücklauftemperaturverlauf Sole monatsweise in Abhängigkeit der Belastungsdauer, 1. Jahr	96
Abbildung 30: Rücklauftemperaturverlauf Sole monatsweise in Abhängigkeit der Belastungsdauer, 2. Jahr	96
Abbildung 31: Modellvariante D.1 – Leistungskennlinien WP-II	116
Abbildung 32: Modellvariante D.1 – Leistungszahlen WP-II	116
Abbildung 33: Modellvariante D.2 – Leistungskennlinien WP-I mit $P_{el, \text{ Solepumpe}} \cdot 2$	117
Abbildung 34: Modellvariante D.2 – Leistungszahlen WP-I mit $P_{el, \text{ Solepumpe}} \cdot 2$	117
Abbildung 35: Modellvariante D.3 – Leistungskennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h + 10 \%$	118
Abbildung 36: Modellvariante D.3 – Leistungszahlen WP-I mit $\dot{Q}_h + 10 \%$	118
Abbildung 37: Modellvariante D.4 – Leistungskennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h - 10 \%$	119
Abbildung 38: Modellvariante D.4 – Leistungszahlen WP-I mit $\dot{Q}_h - 10 \%$	119

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1	Arbeitszahl	IV
Formel 2	Coefficient of Performance, Leistungszahl im Heizbetrieb	V
Formel 3	Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl im Kühlbetrieb	V
Formel 4	Leistungszahl	VII
Formel 5	Wärmeleistung Stoffstrom.....	XI
Formel 6	Vergleichswert Erzeuger A	28
Formel 7	Vergleichswert Erzeuger B	28
Formel 8	Erzeugerwahl	28
Formel 9	Erzeugerwahl mit Hysterese	29

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	CO ₂ -Äquivalente (Emissionen) in der Stromerzeugung	21
Tabelle 2:	CO ₂ -Äquivalente (Emissionen) in der Wärmeerzeugung	21
Tabelle 3:	Energiepreise Strom und Gas für private Haushalte und Industrie in der BRD	22
Tabelle 4:	Lastgang, Übersicht Spitzenleistungen für den Heiz- und Kühlfall sowie Wärme- und Kälteenergiemengen im Betrachtungszeitraum	35
Tabelle 5:	Lastgang, Durchschnittstemperaturen und Extremwerte (Tagesmittelwert) im Betrachtungszeitraum.....	36
Tabelle 6:	Kennlinien WP-I, numerisch.....	44
Tabelle 7:	Eigenschaften des Lastgangs	53
Tabelle 8:	Lastspitzen im Lastgang (1 h-Mittelwert) und Leistungen der Erzeugermodule	56
Tabelle 9:	Basisvariante A – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum (01.05.2010 bis 12.05.2013).....	61
Tabelle 10:	Basisvariante A – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum.....	62
Tabelle 11:	Basisvariante A – Einfluss der Wärme- und Kälteerzeugung auf die CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	63
Tabelle 12:	Modellvarianten B – Übersicht der Variationen der Heizkreistemperatur ...	68
Tabelle 13:	Modellvarianten B – Wärmeerzeugung und durchschnittliche RL-Temperaturen des Wärmepumpenmoduls WP-H im Betrachtungszeitraum	68
Tabelle 14:	Modellvarianten B – durchschnittliche Leistungszahlen Wärmepumpenmodul WP-H im Betrachtungszeitraum	69
Tabelle 15:	Modellvarianten B – CO ₂ -Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum	70
Tabelle 16:	Modellvarianten B – Einsparung CO ₂ -Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum	70
Tabelle 17:	Modellvarianten C – Übersicht der Variationen von Temperatur und Kapazität des Erdreichmoduls.....	71
Tabelle 18:	Modellvarianten C – Wärmeerzeugung und durchschnittliche RL-Temperaturen des Wärmepumpenmoduls WP-H im Betrachtungszeitraum	75

Tabelle 19: Modellvarianten C – durchschnittliche Leistungszahlen Wärmepumpenmodule WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum.....	76
Tabelle 20: Modellvarianten C – CO ₂ -Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum	77
Tabelle 21: Modellvarianten C – Einsparung CO ₂ -Emissionen und Gesamt- energiekosten im Betrachtungszeitraum	78
Tabelle 22: Modellvarianten D – Übersicht der Kennlinienvariationen des Wärme- pumpenmoduls.....	79
Tabelle 23: Modellvarianten D – Wärme- bzw. Kälteerzeugung Wärmepumpen- module WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum	80
Tabelle 24: Modellvarianten D – durchschnittliche Leistungszahlen der Wärme- pumpenmodule WP-H und WP-K im Betrachtungszeitraum	80
Tabelle 25: Modellvarianten D – CO ₂ -Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum	81
Tabelle 26: Modellvarianten D – Einsparung CO ₂ -Emissionen und Gesamt- energiekosten im Betrachtungszeitraum	81
Tabelle 27: Modellvarianten E – Übersicht der Variationen von Energiepreisen und CO ₂ -Emissionswerten	83
Tabelle 28: Modellvarianten E – Wärmeerzeugung des Wärmepumpenmoduls im Betrachtungszeitraum	84
Tabelle 29: Modellvarianten E – Kälteerzeugung des Wärmepumpenmoduls im Betrachtungszeitraum	84
Tabelle 30: Modellvarianten E – CO ₂ -Emissionen und Gesamtenergiekosten im Betrachtungszeitraum	85
Tabelle 31: Modellvarianten E – Einsparung CO ₂ -Emissionen und Gesamt- energiekosten im Betrachtungszeitraum	86
Tabelle 32: Kostenänderung gegenüber Basisvariante A mit klassischer Regelungsvariante und Einsparpotential aller Modellvarianten durch Regelungsansatz im Betrachtungszeitraum	87
Tabelle 33: Basisvariante A – hydraulischer Aufbau des Simulationsmodells	106
Tabelle 34: Basisvariante A – Erzeugermodule	107
Tabelle 35: Basisvariante A – Ablaufstruktur (Regelungstechnik)	108
Tabelle 36: Basisvariante A – Primärenergiefaktoren	108

Tabelle 37: Basisvariante A – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum	109
Tabelle 38: Basisvariante A – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	109
Tabelle 39: Modellvarianten B – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum	110
Tabelle 40: Modellvarianten B – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	111
Tabelle 41: Modellvarianten C Teil 1/2 – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum.....	112
Tabelle 42: Modellvarianten C Teil 2/2 – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum.....	113
Tabelle 43: Modellvarianten C Teil 1/2 – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	114
Tabelle 44: Modellvarianten C Teil 2/2 – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	115
Tabelle 45: Modellvariante D.1 – Kennlinien WP-II, numerisch	116
Tabelle 46: Modellvariante D.2 – Kennlinien WP-I mit $P_{el, Solepumpe} \cdot 2$, numerisch.....	117
Tabelle 47: Modellvariante D.3 – Kennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h + 10 \%$, numerisch	118
Tabelle 48: Modellvariante D.4 – Kennlinien WP-I mit $\dot{Q}_h - 10 \%$, numerisch	119
Tabelle 49: Modellvarianten D – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum	120
Tabelle 50: Modellvarianten D – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	121
Tabelle 51: Modellvarianten E – Simulationsergebnisdaten, Summen/Mittelwerte über Betrachtungszeitraum	122
Tabelle 52: Modellvarianten E – CO ₂ -Emissionen und Energiekosten im Betrachtungszeitraum	123

LITERATURVERZEICHNIS

Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.) [Strompreis 2014 und seine Bestandteile]

Strompreis 2014 und seine Bestandteile, www.unendlich-viel-energie.de;
www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/strompreis-2014, Zugriff am 30.01.2015.

Aichele, Christian (Hrsg.) [Smart Energy]

Smart Energy – Von der reaktiven Kundenverwaltung zum proaktiven Kundenmanagement; Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 2012.

ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (Hrsg.) [BHKW-Kenndaten 2011]

BHKW-Kenndaten 2011, Module, Anbieter, Kosten, Stand: Juli 2011; Essen: Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, 2011.

Baumgartner, Thomas et al. [Wärmepumpen]

Wärmepumpen, Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen; Bern: Eidgenössische Drucksa-
chen- und Materialzentrale, 1993.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) [Aktionsprogramm Klimaschutz 2020]

Aktionsprogramm Klimaschutz 2020; Rostock: Publikationsversand der Bundesregierung, 2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) [Klimaschutz in Zahlen]

Klimaschutz in Zahlen, Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Stand: Juni 2014; Rostock: Publikati-
onsversand der Bundesregierung, 2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) [Kurzinformatio Emissionshandel]

Kurzinformatio Emissionshandel, www.bmub.bund.de;
www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/emissionshandel/kurzinformatio/, Zugriff am: 11.09.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.) [Energiedaten: Gesamt- ausgabe]

Energiedaten: Gesamtausgabe, www.bmwi.de, Stand: Juni 2014;
www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe, Zugriff am
16.09.2014.

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) [DIN EN 14511-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung]

DIN EN 14511-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung – Teil 1: Begriffe und Klassifizierung, Deutsche Fassung EN 14511-1:2013; Berlin: Beuth Verlag, 2013.

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) [DIN EN 15450, Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen]

DIN EN 15450, Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen, Deutsche Fassung EN 15450:2007; Berlin: Beuth Verlag, 2007.

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) [DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung]

DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung; Berlin: Beuth Verlag, 2012.

Dunker, Ralf [Effizienz-Elektronik für Wohnhäuser]

Effizienz-Elektronik für Wohnhäuser, in HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, 64. Jg., Heft 1, S. 33-35.

Form, Georg [Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien]

Validierung eines Simulationsmodells einer bivalenten Wärmepumpenanlage zur Untersuchung neuer Regelstrategien; Aachen: Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik, RWTH Aachen, 2013, unveröffentlicht.

Fraunhofer ISE (Hrsg.) [Wärmepumpen Monitor]

Wärmepumpen Monitor, www.ise.fraunhofer.de; Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, www.wp-monitor.ise.fraunhofer.de, Zugriff am 15.09.2014.

Großklos, Marc; Frank, Milena [Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix]

Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 63. Jg., Heft 9, 2013, S. 32-35.

Hardt, Stefan [Wetterprognosen senken Energiekosten]

Wetterprognosen senken Energiekosten – Erfahrungen aus einem Pilotprojekt beim BLB NRW, in: tab – Das Fachmedium in der TGA-Branche, 43. Jg, Heft 11, 2012, S. 56-58.

Kalz, Doreen et al. [Felduntersuchung von erdgekoppelten Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden]

Felduntersuchung von erdgekoppelten Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden: Analyse der Energie- und Effizienzperformance, in: KI Kälte – Luft – Klimatechnik, 50. Jg., Heft 12-14, 2014, S. 30-38.

Kropf, Sven [PV/T-Schiefer]

PV/T-Schiefer, Anwendungsbeispiele und Fallstudien; Bern: Eigenverlag Bundesamt für Energie BFE, 2003.

Köberle, Thomas; Becker, Martin [Übersicht zu Energieeffizienzkenngößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik]

Übersicht zu Energieeffizienzkenngößen und Bewertung der Energieeffizienz in der Kältetechnik, in: GI – GebäudeTechnik/InnenraumKlima, 134. Jg., Heft 1, 2013, S. 54-64.

Koenigsdorff, Roland [Oberflächennahe Geothermie für Gebäude]

Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung; Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.

Miara, Marek et al. [Wärmepumpen]

Wärmepumpen, Heizen – Kühlen – Umweltenergie nutzen; Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.

Miara, Marek et al. [Wärmepumpen Effizienz]

Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, www.wp-effizienz.ise.fraunhofer.de; Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2011, http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf, Zugriff am: 13.09.2014.

Niesing, Birgit [Energie-Produzent Gebäude]

Energie-Produzent Gebäude, in: weiter.vorn, Das Fraunhofer Magazin, Heft 4, 2011, S. 8-13.

O. V. [EnEV 2007]

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), in der Fassung vom 24. Juli 2007; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, ausgegeben zu Bonn am 24. Juli 2007.

O. V. [EnEV 2014]

Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, in der Fassung vom 18. November 2013; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67, ausgegeben zu Bonn am 21. November 2013.

O. V. [EEWärmeG]

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG), in der Fassung vom 7. August 2008; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 36, ausgegeben zu Bonn am 18. August 2008.

Pistohl, Wolfram [Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 2009]

Handbuch der Gebäudetechnik – Band 2, Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen; Köln: Werner Verlag, 2009.

Quednau, Martin [Bis zu zehn Prozent Energie sparen – auch bei Neuanlagen]

Bis zu zehn Prozent Energie sparen – auch bei Neuanlagen, Kontinuierliche Anlagenüberwachung mit Gebäude-Performance-Optimierung, in: KI Kälte – Luft – Klimatechnik, 48. Jg., Heft 04-12, 2012, S. 50-51.

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor [Energie]

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar; Heidelberg: Springer Verlag, 2012.

Schramek, Ernst-Rudolf (Hrsg.) [Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik]

Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik, 76. Auflage; München: Oldenbourg Industrieverlag, 2013.

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) [Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung]

Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung – Lange Reihen von Januar 2000 bis Juli 2014, www.destatis.de, Stand: 27.08.2014;
www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/Energiepreisentwicklung.html, Zugriff am 15.09.2014.

Umweltbundesamt (Hrsg.) [Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen]

Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, www.umweltbundesamt.de, Stand: März 2014;
www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen, Zugriff am 12.09.2014.

Vaillant (Hrsg.) [Heiztechniklexikon - Bivalent]

Heiztechniklexikon - Bivalent, www.Vaillant.de;
www.vaillant.de/Heizung-finden/Technik-verstehen/Heiztechniklexikon/glossar_standard/Bivalent.html, Zugriff am 27.02.2015.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) [VDI 2067-1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen]

VDI 2067 Blatt 1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Berlin: Beuth Verlag, 2012.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) [VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe]

VDI 3633 Entwurf, Simulation von Logistik, Materialfluss und Produktionssystemen – Begriffe; Berlin: Beuth Verlag, 2013.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) [VDI 4700-1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik]

VDI 4700 Blatt 1 Entwurf, Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik; Berlin: Beuth Verlag, 2013.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) [VDI 6012-1.1 Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude]

VDI 6012 Blatt 1.1 Regenerative und dezentrale Energiesysteme für Gebäude, Grundlagen; Berlin: Beuth Verlag, 2014.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) [VDI 6041 Entwurf, Technisches Anlagenmonitoring]

VDI 6041 Entwurf, Technisches Anlagenmonitoring; Berlin: Beuth Verlag, 2015.

Vohrer, Philipp et al. [Erneuerbare Wärme]

Erneuerbare Wärme – Klimafreundlich, wirtschaftlich, technisch ausgereift, Renew's Spezial, Stand: Januar 2013; Berlin: Eigenverlag Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2013.

Wagner, Hermann-Josef et al. [CO₂-Emissionen der Stromerzeugung]

CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, in: BWK Das Energie-Fachmagazin, 59. Jg., Heft 10, 2007, S. 44-52.

Werner, Markus [Wetterprognosen nutzen]

Wetterprognosen nutzen, in: cci Zeitung, 46. Jg., Heft 12, 2012, S. 15-16.

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.) [Wärmepumpen]

Wärmepumpen, Empfehlungen für Planung, Ausführung und Betrieb von Wärmepumpen-Heizungsanlagen, Stand: April 2008; Stuttgart: Eigenverlag Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2008.