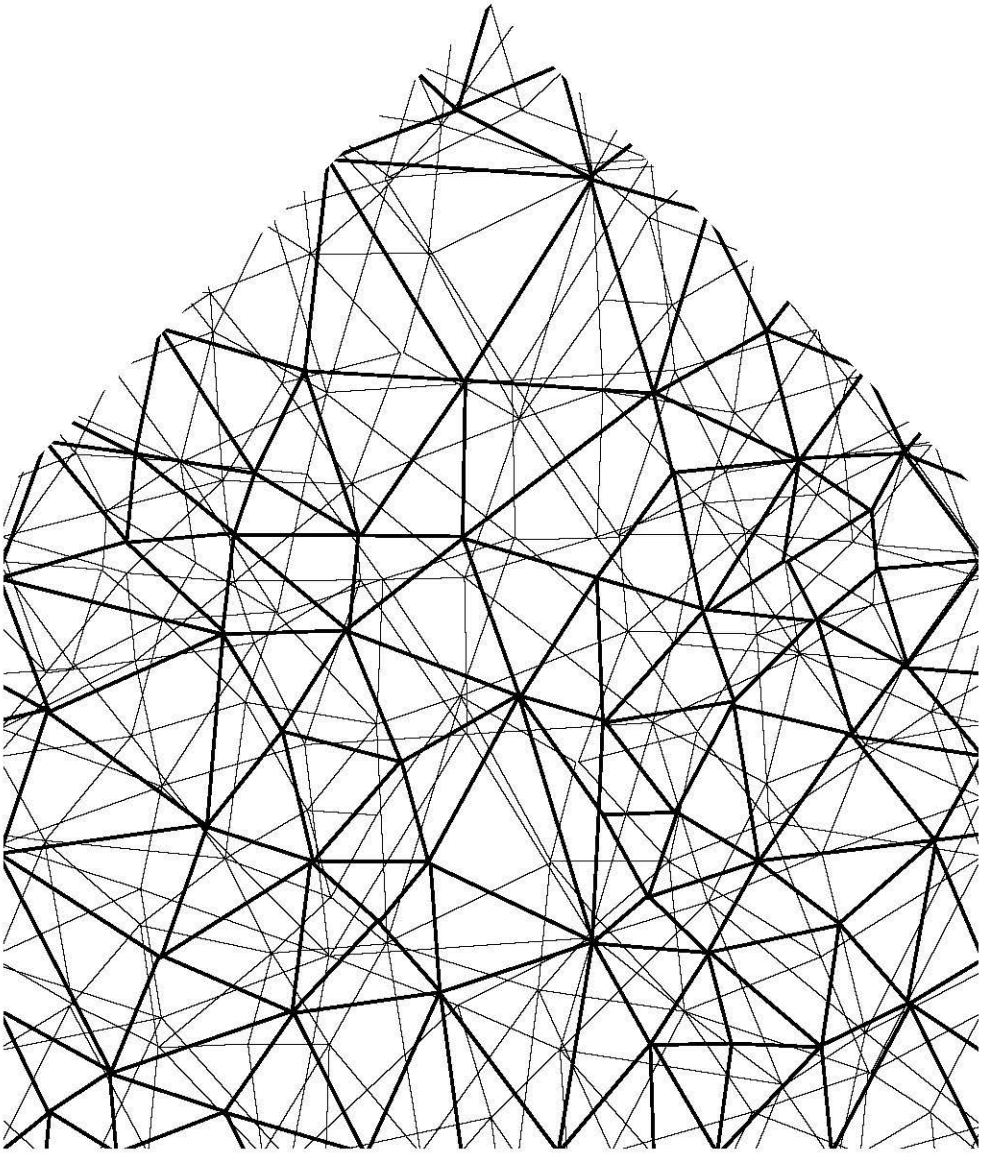
Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem

Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland



Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem

Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland

Endbericht

Impressum:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Dipl.-Ing. (Univ.) Dennis Atabay
Dipl.-Ing. (Univ.) Manuel de-Borja-Torrejón, M.Sc.
Dipl.-Ing. (Univ.) Rita Dornmair
Dr.-Ing. Philipp Kuhn
Dipl.-Ing. (FH) Johannes Maderspacher, M.Sc.
Dipl.-Ing. (Univ.) Florian Sänger

Studentische Mitarbeiter:
Johanna Laenge
Jonathan-Leon Finkbeiner

München, Juli 2017

Das Forschungsvorhaben wurde unterstützt von:
Bayerischer Bauindustrieverband e.V., Beton Bauteiele Bayern, Bundesverband Transpoertbeton (BTB), Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., EnBW Energie Baden Wüttemberg AG, Forschungsvereinigung der deutschen Beton-Fertigsteilindustrie e.V., InformationsZentrum Beton GmbH, Schlagmann Poroton GmbH & Co KG, Uponor GmbH

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.44)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Allgemeine Grundlagen 3

2.1 Lastmanagement mit Gebäuden 3

2.2 Forschungsstand 4

2.2.1 Speicher- und Lastmanagementpotenziale von Gebäuden 4

2.2.2 Lastmanagement mit Modelprädiktiver Regelung 6

2.2.3 Einfluss auf das Stromsystem 8

2.3 Methodik 9

3 Gekoppeltes Simulationsmodell 11

3.1 Gebäude 11

3.1.1 Gebäudetypen und Energieeffizienzkategorien 11

3.1.2 Gebäudemodelle 14

3.2 Erzeugungsanlage und intelligente Regelung 17

3.2.1 Gebäudetechnische Erzeugungsanlage 17

3.2.2 Regelung der Gebäude 17

3.3 Entwicklung der Gebäude- und Anlagenstruktur und Berechnung des Gesamtlastgangs 19

3.3.1 Eingangsdaten 20

3.3.2 Abriss 22

3.3.3 Neubau 22

3.3.4 Sanierung 22

3.3.5 Berechnung des Gesamtlastgangs 23

3.4 Stromsystemmodell 24

4 Rahmenbedingungen und Szenariodefinition 27

4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen 27

4.1.1 Wetterdaten 27

4.1.2 Thermische Behaglichkeit 27

4.2 Spezifische Rahmenbedingungen für das Stromsystemmodell 28

4.2.1 Stromnachfrage 28

4.2.2 Erneuerbare und KWK-Stromerzeugung 28

4.2.3 Konventionelle Bestandskraftwerke 30

4.2.4 Großtechnische Speicheranlagen 31

4.2.5 Neubauoptionen für Kraftwerke und Speicher 31

4.2.6 Preise und Restriktionen von Brennstoffen und CO_2-Emissionen 33

4.2.7 Grenzen der Modellierung 34

4.3 Szenariendefinition der Gebäudeentwicklung 34
4.3.1 Gebäudeentwicklung im Szenario „Basis“..... 34
4.3.2 Gebäudeentwicklung im Szenario „Wärmepumpe“ 35
4.3.3 Gebäudeentwicklung im Szenario „Wärmepumpe Altbau“ 36
4.3.4 Elektrische Gebäudelastgänge der betrachteten Szenarien..... 37
4.4 Szenarien „ohne Heiz“ und „mit Heiz“ 37
4.5 Szenarien „Wärmepumpe – nicht optimiert“ und „- optimiert“ 38
4.6 Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“..... 40
5 Ergebnisdarstellung 41
5.1 Szenarien „ohne Heiz“ und „mit Heiz“ 41
5.1.1 Ergebnisse im Szenario „mit Heiz“..... 41
5.1.2 Vergleich der Szenarien 45
5.2 Szenarien „Wärmepumpe – optimiert / nicht optimiert..... 49
5.3 Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“..... 53
6 Fazit 57
6.1 Zusammenfassung 57
6.2 Grenzen der Betrachtung..... 58
6.3 Weiterer Forschungsbedarf..... 59
Literaturverzeichnis..... 61
Abbildungsverzeichnis..... 65
Tabellenverzeichnis..... 69
Anhang 71
A.1. Konstruktive und technischen Kennwerte der Gebäudemodelle..... 71
A.2. Eingangsdaten für die Berechnug der Gebäudeentwicklung 84

1 Einleitung

Die Erzeugung elektrischer Energie richtet sich in Deutschland bislang weitgehend nach dem Verbrauch. So werden konventionelle Kraftwerke und Stromspeicher so betrieben, dass zu jedem Zeitpunkt genau die von den Verbrauchern geforderte Last gedeckt wird. Die Energiewende hin zu einem nachhaltigeren Energiesystem führt zu einer stark verändernden Erzeugungsstruktur in Deutschland, was insbesondere den Betrieb von Kraftwerken und Stromnetzen zu einer Anpassung zwingt. Der starke Anstieg der installierten Leistung fluktuierender regenerativer Erzeuger, wie Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen, gegenüber konventionellen Kraftwerken (siehe Abbildung 1.1) macht es in Zukunft immer wichtiger, flexibel auf das Stromangebot reagieren zu können. Dafür eignet sich neben dem Ausbau von Stromnetzen, Stromspeichern und flexiblen Erzeugungsanlagen auch Lastmanagement, also eine Flexibilisierung der Nachfrage [1]. Lastmanagement wird in der Industrie, zum Beispiel bei thermischen Anlagen, bereits seit langem erfolgreich eingesetzt. Die Raumheizung und Klimatisierung von Gebäuden kann zukünftig einen großen Beitrag leisten, wenn die thermische Masse der Gebäude als Speicher nutzbar gemacht wird.

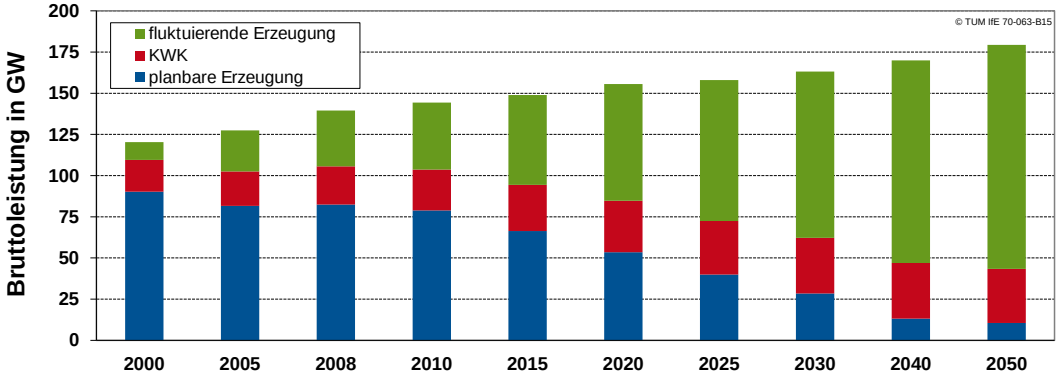


Abbildung 1.1 Entwicklung der Bruttoleistung der Kraftwerke in Deutschland, mit stark steigendem erneuerbarem fluktuierenden Anteil, bei sinkendem Anteil planbarere Konventioneller und steuerbarer Erzeugung aus KWK [2]

Der Wandel der Energieversorgung erfordert neben einen Paradigmenwechsel vom gegenwärtigen Prinzip der verbrauchsgesteuerten Erzeugung hin zum erzeugungsorientierten Verbrauch auch eine neue Infrastruktur, in der Speicher eine wichtige Rolle spielen und Erzeuger und Verbraucher intelligent miteinander vernetzt werden. Bisher passive Verbraucher wie Gebäude können durch eine Anpassung ihrer Verbrauchscharakteristik zu aktiven Teilnehmern des Energiesystems (Smart Grid) werden. Eine stärkere Kopplung der Wärmeseite mit der Stromversorgung könnte eine Nutzung von

Gebäuden als kostengünstige Energiespeicher ermöglichen, wodurch eine Synergie entsteht, die zu alternativen Konzepten für die energetische Sanierung des Gebäudebestands führen könnte.

Diese Studie untersucht das thermische Speicherpotenzial von Gebäuden in Verbindung mit dem deutschen Energiesystem. Hierbei wird analysiert, welche Auswirkungen bzw. Chancen die intelligente Integration von Gebäuden als Speicher auf das Energiesystem hat (z.B. Einfluss auf den Kraftwerkseinsatz, Ausbau der Erzeugungs- und Speicherkapazitäten).

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Lastmanagement mit Gebäuden

Im heutigen Stromsystem wird ein Großteil der Stromerzeugung durch konventionelle Kraftwerke gedeckt. Dies sind zum Beispiel Kohle- und Gaskraftwerke, die im Gegensatz zu fluktuierenden regenerativen Erzeugern, wie Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen, gezielt eingesetzt werden können. Die Kraftwerksbetreiber, Stromlieferanten und Netzbetreiber erstellen Prognosen über den Verbrauch und planen den Einsatz der Kraftwerke anhand wirtschaftlicher und technischer Rahmenbedingungen. Somit kann der benötigte Strom zu jedem Zeitpunkt bedarfsgerecht erzeugt und zum Verbraucher transportiert werden. Abweichungen von diesen Prognosen werden durch den Abruf von Regelenergie ausgeglichen. Speicher, wie Pumpspeicherkraftwerke, werden dafür und auch für den Ausgleich zwischen Spitzen-und Schwachlastzeiten genutzt.

In einem zukünftig von fluktuierenden regenerativen Erzeugern dominierten Stromsystem wird es zunehmend schwieriger diesen Ausgleich herbeizuführen, da die sogenannte Residuallast, die Differenz zwischen Nachfrage und erneuerbarer Erzeugung, immer stärker schwanken wird. Neben diesen Schwankungen nehmen auch die Zeiten zu, in denen mehr erneuerbare Energie zur Verfügung steht als insgesamt verbraucht wird. Diese zeitlichen Schwankungen können zum Beispiel durch großtechnische Speicher ausgeglichen werde. Daneben entsteht aber auch noch ein räumliches Problem, da sich die PV-Anlagen vornehmlich im Süden und die Windkraftanlagen hauptsächlich im Norden befinden. Um die elektrische Energie bedarfsgerecht zu den Verbrauchern zu befördern, ist ein Ausbau der Stromnetzte geplant.

Neben dem Speicher- und Netzausbau können weitere Maßnahmen, wie Lastmanagement, helfen, diese Probleme in den Griff zu bekommen. Unter Lastmanagement, oder Demand-Side-Management (DSM) versteht man den geplanten Einsatz von Verbrauchern. Ein Beispiel dafür sind Nachtspeicherheizungen, die früher gezielt nachts beladen wurden, um die Grundlast anzuheben. Mit Hilfe moderner Datenerfassungs- und Kommunikationstechnik können allerdings eine Vielzahl von Verbrauchern flexibel gesteuert werden. Im Gegensatz zu Haushaltsgeräten, haben Heizungsanlagen, wie Wärmepumpen ein hohes Potenzial.

Durch die Veränderung der Einsatzzeiten einer Heizungsanlage ergibt sich ein gewisser Speicherbedarf, um Überschüsse zu speichern und einen Mangel auszugleichen. Dieser Speicherbedarf kann einerseits über konventionelle Wärmespeicher, in Form von Wassertanks gedeckt werden, andererseits aber auch durch die Aktivierung der Gebäudemasse. Dabei wird durch gezieltes „Überheizen“ von Bauteilen, wie der Decke, dem Boden und / oder den Wänden, Energie in Form von fühlbarere Wärme gespeichert. Diese Wärmeenergie wird dann langsam an den Raum abgegeben. Durch eine ausgefeilte Regelung wird sichergestellt, dass die Komfortbedingungen im Inneren des Gebäudes eingehalten werden. Somit kann das Gebäude selbst als thermischer Speicher genutzt werden, und die zeitliche Flexibilität der Wärmeerzeugung erhöht werden.

2.2 Forschungsstand

In verschiedenen Studien und Arbeiten wurde bereits abgeschätzt, wie groß die Speichermasse verschiedener Gebäudetypen ist [3], und welchen Einfluss die Aktivierung dieser Speichermassen auf den Strompreis haben kann [4]. Des Weiteren konnte bereits ein positiver Einfluss von „thermisch aktivierten“ Gebäuden auf das deutsche Stromsystem gezeigt werden [5]. Jedoch wurden diese Aspekte bisher nur isoliert untersucht und gegenseitige Rückwirkungen weitestgehend vernachlässigt. Um das Potenzial von Gebäuden möglichst genau abzuschätzen, wird in dieser Studie auch die gegenseitige Beeinflussung berücksichtigt.

2.2.1 Speicher- und Lastmanagementpotenziale von Gebäuden

In der Studie „Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme“ [3] lag der Fokus auf der thermischen Speicherkapazität von Gebäuden und dem davon abgeleiteten Laststeuerungspotenzial.

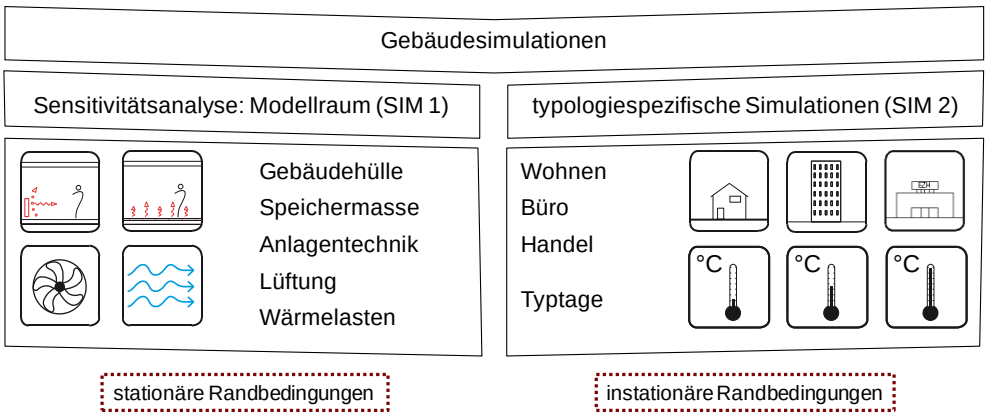


Abbildung 2.1 Überblick der in der Studie [3] durchgeführten Simulationen. Quelle: [3]

In einer ersten Sensitivitätsanalyse (s. Abbildung 2.1, links) wurde der Einfluss der Parameter Dämmstandard, Bauschwere, Wärmeübergabe, Lüftung und Wärmelasten auf das Aufheiz- und Abkühlverhalten eines Modellraums beim Ein- und Ausschalten der thermischen Anlagen untersucht. Dynamische Simulationen wurden dafür durchgeführt. Die Randbedingungen dieser Simulationen, wie z.B. Außentemperatur, Solarstrahlung und interne Lasten wurden zu Gunsten der Vergleichbarkeit als stationär angenommen.

Als Ausganslage diente ein Grundmodell nach Vorlage der EnEV 2009 (Konstruktion und Anlagetechnik), welches den Referenzfall widerspiegelt. Schrittweise wurden die einzelnen Parameter verändert, um die jeweiligen Auswirkungen feststellen zu können. Diese wurden unter Betrachtung der Variablen „Dauer" (Zeit zum Aufheizen oder Abkühlen des Raumes bis zum Verlassen des thermischen Komforts nach Ein- oder Abschaltung des Heiz- bzw. Kühlsystems) und „Leistung" (Heiz- bzw. Kühlleistung, die zu- bzw. abgeschaltet werden kann) bewertet. Durch diese beiden Kriterien, Dauer und Leistung, wurden die Potenziale für Lastmanagement jeder Variante ermittelt und miteinander verglichen. Abbildung 2.2 zeigt jeweils ein Beispiel dieser Integration und des Potenzialvergleichs.

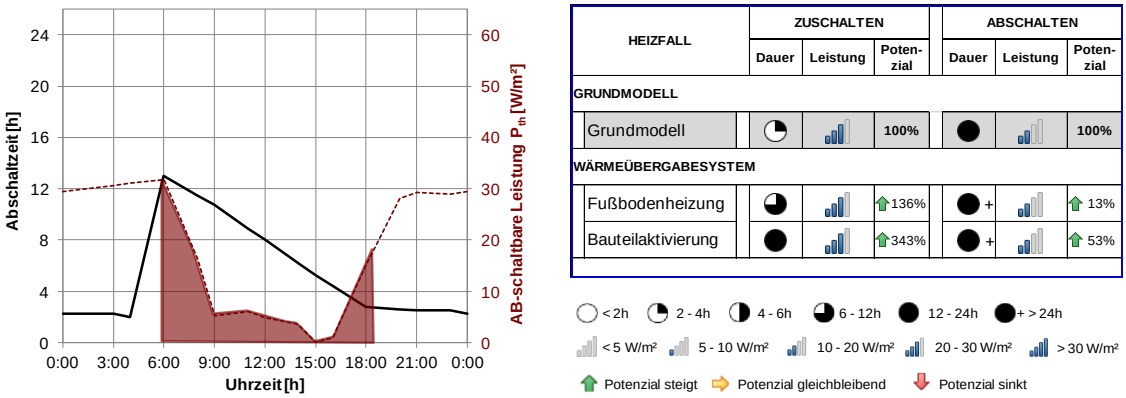


Abbildung 2.2 Exemplarische Integration der abschaltbaren Leistung über die Abschaltdauer (links). Vergleich der Zuschalt- bzw. Abschaltpotenziale von verschiedenen Modellvarianten zum Grundmodell (rechts). Quelle: [3]

Die Analyse zeigte, dass die untersuchten Parameter die Potenziale beeinflussen. Die konstruktiven Aspekte sowie das Wärmeübergabesystem im Raum stellen die entscheidenden Elemente dar. Mit einer Kombination aus mittlerem Dämmstandard (EnEV 2009) und einer schweren Bauweise sowie einer trägen Wärmeabgabe kann das maximale Lastmanagementpotenzial erreicht werden. Des Weiteren zeigt sich, dass aus einer hohen Anlagenleistung bzw. aus einem niedrigen Dämmstandard eine hohe zu- oder abschaltbare Leistung resultiert. In dieser Kombination sind allerdings die benötigten Zeiten für das Aufheizen oder Abkühlen des Raumes sehr gering. Deshalb können nur kurzfristige Lastspitzen ausgeglichen werden.

Anschließend wurde eine typologiespezifische Analyse durchgeführt, die zur Ermittlung des instationären Lastmanagementpotenzials verschiedener Gebäudetypen diente (s. Abbildung 2.1, rechts). Dabei wurden die Gebäudestandards „Altbau" und „Neubau" auf Grundlage des deutschen Gebäudebestandes für Bauten des Sektors Haushalt (Ein- und Mehrfamilienhaus) sowie GHD (Büro und Einzelhandel) definiert. Für jedes Objekt wurde ein entsprechendes Gebäudemodell generiert und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anlagensysteme mittels dynamischer Simulationen untersucht.

Die Ergebnisse der Analyse bestätigten die Feststellungen der Sensitivitätsanalyse, dass träge Systeme mit hoher Speichermasse ein höheres Lastmanagementpotenzial bieten. Außerdem wurde analysiert, welchen Einfluss unterschiedliche Parameter bei unterschiedlichen Gebäudenutzungen aufweisen. Die Abhängigkeit des Lastmanagementpotenzials von Jahreszeiten bzw. von klimatischen Außenbedingungen konnte ebenfalls dargelegt werden.

Im Einzelhandel zeigt sich auf Grund der leichten Bauweise ein geringeres Lastmanagement-Potenzial. In Bürogebäuden wurde dagegen aufgezeigt, dass die internen Lasten eine entscheidende Rolle einnehmen. In mitteleuropäischen Wohngebäuden sind im Allgemeinen keine Kühlanlagen installiert. Deshalb wurde für den Sektor Wohngebäude während der Kühlperiode auch kein Lastmanagementpotenzial identifiziert.

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurde für jeden Gebäudetyp ein flächenspezifisches Lastmanagementpotenzial (Wh/m²) ermittelt und auf den Gebäudebestand hochgerechnet. Dabei wurde zwischen kurzzeitigen (Ein- und Abschaltung unter 2 Stunden) und langfristigen (längst mögliche Ein- und Abschaltung) Potenzialen unterschieden. Diese Hochrechnungen beruhen auf der Annahme, dass alle Gebäude elektrisch beheizt werden. Diese Annahme spiegelt zwar nicht den aktuellen Zustand wieder, jedoch ist eine ansteigende Elektrifizierung des Wärmesektors in Zukunft denkbar. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass sowohl im Sommer als auch im Winter hohe Möglichkeiten zur Netzstabilisierung durch die Aktivierung des Gebäudebestandes bestehen.

2.2.2 Lastmanagement mit Modelprädiktiver Regelung

In der Arbeit „Lastmanagement in Gebäuden - Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden“ [4] wird eine modellprädiktive Regelung zur Flexibilisierung des Energiebezugs für Heiz- und Kühlanwendungen in Gebäuden beschrieben. Mithilfe eines Gebäudemodells, welches einen Büroraum abbildet, wird ein Regelungsverfahren zur Umsetzung von Lastmanagement implementiert. Die Wärmebereit-

stellung erfolgt mittels einer Wärmepumpe, als Wärmeübergabesystem wird eine Betonkernaktivierung angenommen.

Zunächst wird gezeigt, dass ein Gebäude mittels modellprädiktiver Regelung innerhalb seiner Komfortgrenzen betrieben werden kann, wobei bei Annahme eines konstanten Stromtarifs, wie er heute üblich ist, ca. 17% der Energiekosten für Heizen und Kühlen eingespart werden kann (s. Abbildung 2.3). Mit Hilfe eines zeitlich variablen Stromtarifs, kann eine Verschiebung der Heiz- und Kühlzeiten erreicht werden, so dass bevorzugt zu Zeiten besonders günstigen Stroms Wärme oder Kälte erzeugt wird. Daraus ergeben sich gegenüber der Referenzregelung Einsparungen zwischen 25% und 63%, je nach Strompreisszenario.

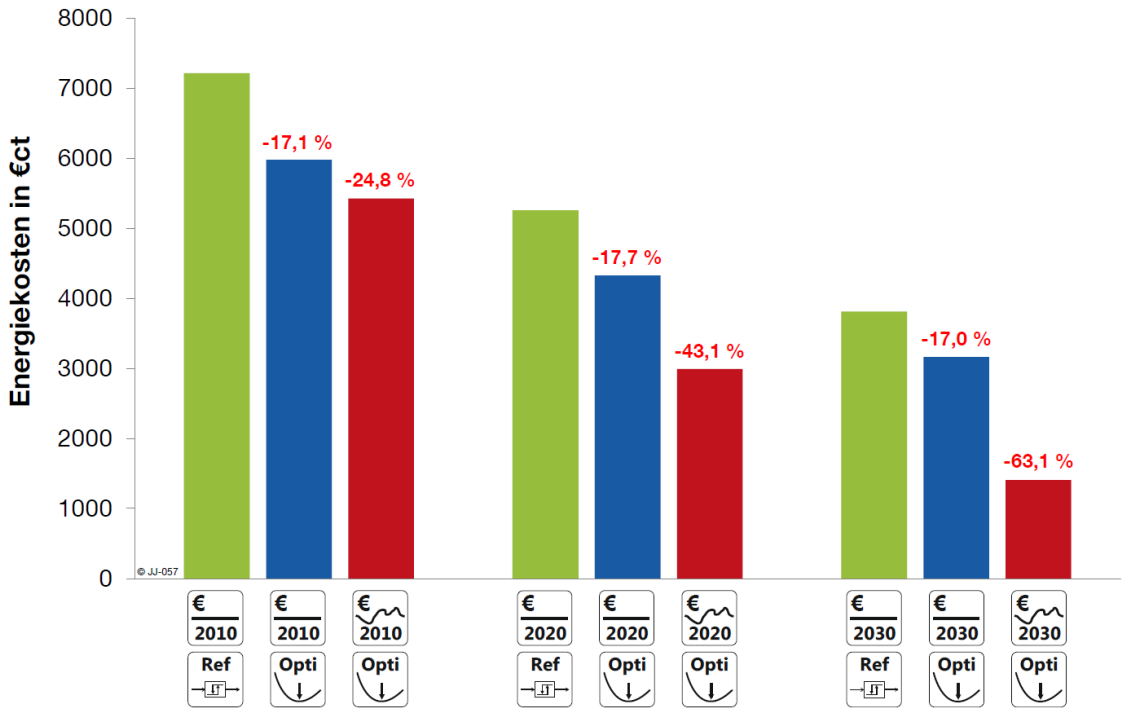


Abbildung 2.3 Jährliche Energiekosten für den Referenzfall (grün) und die Optimierung mit konstanten (blau) und variablen (rot) Strompreisen mit Strompreisen für 2010, 2020 und 2030 [4]

Darüber hinaus zeigt die Arbeit, dass die diskrete Modellierung des Gebäudes für eine Modellprädiktive Regelung unpraktisch und zu aufwendig ist, weshalb Untersuchungen mit adaptiven Gebäudemodellen vorgenommen werden. Neuronale Netzte eignen sich hier gut, um das thermische Verhalten eines Gebäudes für kurze Vorhersagehorizonte, von wenigen Tagen, zu berechnen. Vorteilhaft ist, dass Neuronale Netze das thermische Verhalten des Gebäudes aus Messdaten erlernen und sich bei geeigneten Trainings-Strategien auch an verändernde Rahmenbedingungen anpassen können. Diese sind zum Beispiel das Nutzerverhalten, aber auch saisonal unterschiedliche klimatische Einflüsse.

In einer abschließenden Potenzialabschätzung wird berechnet, dass das Lastmanagementpotenzial von Raumwärme in Deutschland ca. 374 GW_{th} bei einer thermischen Speicherkapazität von ca. 262 GWh_{th} beträgt. Das Lastmanagementpotenzial für das Stromsystem hängt dabei natürlich von den eingesetzten Wärmeerzeugungstechnologien ab.

2.2.3 Einfluss auf das Stromsystem

In der Dissertation „Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem“ [5] wurde der Einfluss einer geeigneten Kopplung von Strom- und Wärmesektor auf den Einsatz und Ausbau von Kraftwerken und Speichern in einem Stromsystem mit einem mehrheitlichen Anteil erneuerbarer Energien untersucht. Dazu wurde ein bestehendes Energiesystemmodell [6] um eine Abbildung des Wärmesystems erweitert. Das Wärmesystem wurde dabei durch einen repräsentativen Anteil von verschiedenen Wärmesystemgruppen abgebildet, welche typische Erzeugerstrukturen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung in der Objektversorgung und in der Wärmenetzversorgung abbilden. Das Modell ist somit in der Lage, den Einsatz und Ausbau von sowohl elektrischen als auch thermischen Erzeugern und Speichern bis zum Jahr 2050 unter verschiedenen Rahmenbedingungen kostenoptimal zu berechnen. Die Kopplung der Sektoren erfolgt über den Einsatz von KWK Anlagen und Wärmepumpen sowie elektrischen Direktheizungen.

Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen, dass durch eine stärkere Kopplung des Strom- und Wärmesystems über den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen und elektrischen Direktheizungen in Kombination mit Wärmespeichern Überschüsse aus der regenerativen Stromerzeugung technisch einfach, kostengünstig und fast vollständig integrieren lassen und somit die volkswirtschaftlichen Kosten senken. In Kombination mit KWK-Anlagen sorgen thermische Speicher außerdem für höhere Ausnutzungsdauern der Anlagen und erhöhen die Flexibilität im Energiesystem. Abbildung 2.4 zeigt den deutlichen Einfluss der Berücksichtigung elektrischer Wärmeerzeuger auf die Abschaltenergie, also nicht integrierbare Erzeugung, aus erneuerbaren Energien.

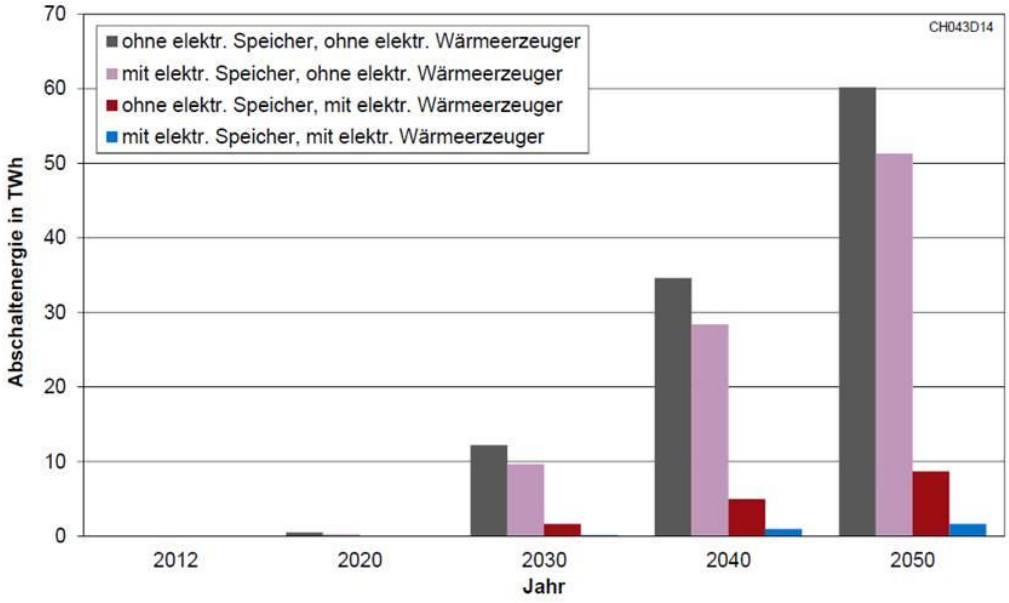


Abbildung 2.4 Entwicklung der Abschaltenergie aus erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeerzeugerkonfigurationen [5]

2.3 Methodik

In den bereits erwähnten Arbeiten konnten wichtige Teilaspekte von Lastmanagement in Gebäuden untersucht werden. Im Vorgängerprojekt [3] wurde das Speicherpotenzial von Gebäuden durch das statische Abschalten der Heizungsanlage untersucht. J. Jungwirth zeigt in [4], dass es möglich ist, die Heizleistung von Gebäuden mit Wärmepumpen durch zeitlich flexible Strompreise zu beeinflussen, wodurch sich eine Verschiebung der Heizlast von teuren in günstige Zeiträume ergibt. In [5] wird mithilfe eines deutschen Stromsystemmodells und vereinfachten Heizlasten gezeigt, dass diese vorteilhaft im Stromnetz integriert werden können und somit volkswirtschaftliche Vorteile bieten können. Da allerdings in allen bisher durchgeführten Untersuchungen jeweils nur ein Teilaspekt der Integration von Gebäuden in einem zukünftigen Stromsystem betrachtet wurde, sollen diese Ansätze im aktuellen Projekt verknüpft werden. Dies ist durch eine Koppelung verschiedener Simulationsmodelle angedacht.

Wie in [4] gezeigt, werden in dieser Untersuchung Gebäudemodelle (s. Abbildung 2.5, links) mit Simulationsmodellen der Anlagentechnik und ihrer Regelung (Mitte) gekoppelt. Diese Gebäudemodelle inklusive Regelung können ihre elektrischen Lastgänge an einen variablen Stromtarif anpassen. Über den Austausch dieser Lastgänge und der resultierenden Preiskurve werden sie mit der Stromsystemmodellierung gekoppelt.

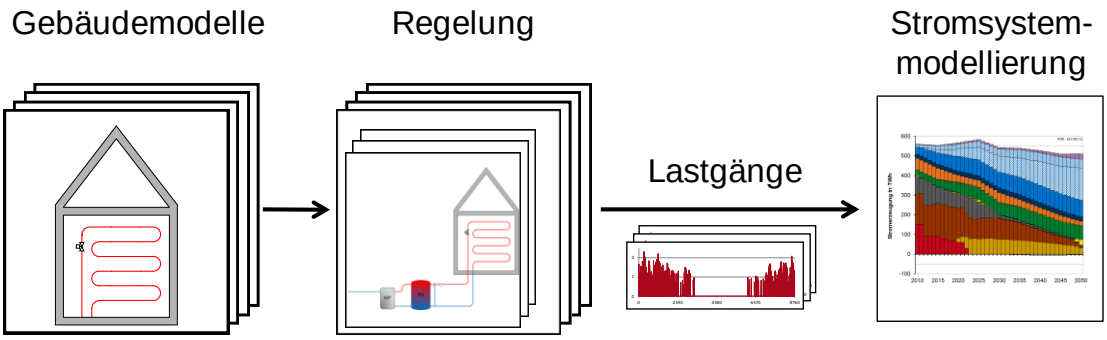


Abbildung 2.5 Methodik der Modellkopplung zwischen Gebäudemodellen, Anlagentechnik und Regelung sowie Stromsystemmodellierung

Durch die Verknüpfung dieser einzelnen Modelle ist es möglich, Gebäude und Anlagentechnik realitätsnah zu simulieren. Dabei wird der Gebäudebestand in Deutschland durch die unterschiedlichen Modelle möglichst gut repräsentiert. Die verschiedenen Anlagentechniken bilden gängige Heizsysteme ab und ermöglichen durch den Einsatz von Wärmepumpen, Blockheizkraftwerken und elektrischen Heizstäben, die thermische Masse der Gebäude als Speicher zu aktivieren.

Durch eine Koppelung der Gebäude mit der Stromsystemmodellierung und einer Verschiebung der Heizzeiten in möglichst „günstige“ Stunden können Wechselwirkungen zwischen dem flexibleren Strombezug der Gebäude und dem Verhalten des Stromsystems untersucht werden. Dafür wird von der Regelung je Gebäudetyp ein Lastgang für jede sinnvoll einsetzbare Anlagentechnik erzeugt. Anschließend werden diese Lastgänge Auf einen gesamtdeutschen Heizlastgang hochskaliert, der anschließen zeitlich verschoben werden kann. Mit Hilfe dieser Lastgänge und weiterer Rahmendaten berechnet die Stromsystemmodellierung dann die Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks und großtechnischer Stromspeicher sowie den optimalen Einsatz der Erzeuger und Speicher (s. Abbildung 2.5, rechts).

Durch die Simulation mehrerer Szenarien können die Einflüsse verschiedener Parameter untersucht werden. Zunächst wird ein Basisszenario gerechnet. Vergleichsszenarien untersuchen beispielsweise den Einfluss folgender Faktoren:

- verschiedene Sanierungsszenarien
- Pufferspeicher
- Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung

3 Gekoppeltes Simulationsmodell

3.1 Gebäude

Wie bereits im Abschnitt "Forschungsstand" beschrieben, fokussierte sich die Studie [3] insbesondere auf die Auswertung des Speicher- und Lastmanagementpotenzials von Gebäuden durch die Ermittlung der ab- und zuschaltbaren Leistung. Ebenfalls wurde die Dauer der abschaltbaren Leistung analysiert. D.h. wie lange nach Abschalten der Heiz- bzw. Kühlung das Innenraumklima innerhalb der gewählten Komfortgrenzen blieb. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei Neubauten eine längere Abschaltdauer aber eine geringere Abschaltleistung möglich ist. Bei Altbauten ist es genau gegensätzlich. Dementsprechend hat jeder Gebäudetyp bzw. Energiestandard unterschiedliche Potenziale die je nach Art des Lastmanagement-Bedarfs Vor- oder Nachteile aufweisen. Dies wird beim laufenden Projekt berücksichtigt.

Das aktuelle Vorhaben konzentriert sich in erster Linie auf die mögliche Auswirkung dieser Potenziale auf die Energieversorgungsstruktur in Deutschland. Bei der Analyse einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur, welche die aktuellen Klimaziele wiederspiegelt, muss auch die dafür (erforderliche) Entwicklung des Gebäudebestands untersucht werden.

Dafür werden Gebäudemodelle definiert, die Gruppen von realen Gebäuden repräsentieren. Für die Erstellung und Simulierung der Gebäudemodelle wurde das dynamische Simulationsprogramm TRNSYS verwendet.

3.1.1 Gebäudetypen und Energieeffizienzkategorien

Die in der Studie verwendeten Gebäudemodelle werden nach Gebäudetyp und Energieeffizienz kategorisiert. Für die Kategorisierung wurden der Energieverbrauch für Raumwärme und die Flächen des jeweiligen Gebäudetyps berücksichtigt. Die in [3] umgesetzte Typisierung dient dabei dem aktuellen Projekt als Ausgangsbasis.

Die Anzahl der Gebäudemodelle soll eine bestmögliche Erfassung der Speicher- und Lastmanagementpotenziale des aktuellen und zukünftigen Gebäudebestands in Deutschland ermöglichen. Um die technische Machbarkeit (Simulationsaufwand) der Studie zu gewährleisten, ist es jedoch wichtig, die Anzahl der Gebäudemodelle zu begrenzen. Deshalb musste ein Kompromiss zwischen Untersuchungsumfang und Detail-

lierungsgrad gefunden werden. Dies wurde bei der Bestimmung der zu modellierenden Gebäudetypen und der Energieeffizienzstandards beachtet.

Der Endenergieverbrauch für die Erzeugung von Raumheizwärme in den Sektoren Haushalte und GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistung) und Industrie betrug im Jahr 2012 2564 PJ (IfE//TUM, 2014). Abbildung 3.1 zeigt die Verteilung nach Sektoren. Während der Verbrauch des Sektors Haushalte 65% des Gesamtbetrags entspricht, liegt der Anteil von GHD bei 26%. Die restlichen 9 % entfallen auf die Industrie. Deshalb werden für die Analysen im Projekt lediglich die Sektoren Haushalte und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) berücksichtigt.

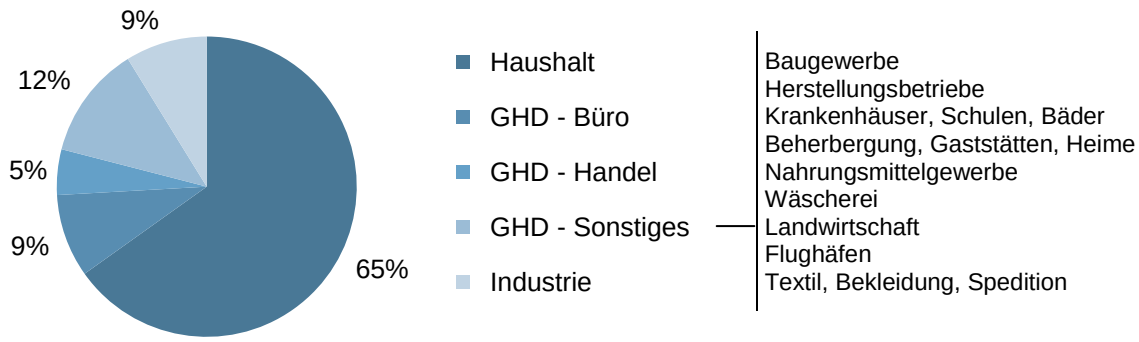


Abbildung 3.1 Verteilung des Endenergieverbrauchs für Raumheizung nach Sektoren in Deutschland (2012). Quelle: Daten aus [7] und IfE (TUM). Eigene Darstellung.

Der oben genannte Anteil des Sektors GHD verteilt sich zu 9 % auf Büro, zu 5 % auf Handel und zu 12% auf alle übrigen GHD-Gebäudeklassen. Beim Handel ist zwischen Einzel- und Großhandel zu unterscheiden. Die Gebäudetypen des Sektors Großhandel sind meist Hallengebäude bzw. leichte Bauten mit geringem thermischen Speicherpotenzial. Der Einzelhandel weist im Vergleich zu den anderen Sektoren ein geringes Lastmanagementpotenzial auf [3].

Deshalb wird im Sektor GHD lediglich der Gebäudetyp „Büro“ für die Studie ausgewählt. Gebäudetypen im Sektor Handel werden aufgrund des geringen Potenziales und des geringen Anteils am Gebäudebestand (siehe Tabelle 3.1) nicht berücksichtigt.

Im Sektor Haushalte werden nach einer Studie des IWU die Wohngebäude in vier Gruppen geordnet [8]:

EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser

RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte, Reihenhaus

MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen

GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen

Die Gebäudetypen Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) stellen über 80 % des gesamten Wohnflächenanteils dar (siehe Tabelle 3.1). Des Weiteren lassen sich die übrigen Gebäudetypen Reihenhaus (RH) und Groß-Mehrfamilienhaus (GMH) ebenfalls durch die Modelle eines EFH und MFH darstellen [3].

Infolgedessen werden die Gebäudetypen Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) sowie Bürogebäude (Büro) für die Studie herangezogen. Somit werden insgesamt 75 % des Endenergieverbrauchs für Raumwärme berücksichtigt.

Zwei Energieeffizienzkategorien – Bestand (Baujahr bis 2002) und Neubau (Standard EnEV 2009 [9]) – wurden in [3] definiert. Um den derzeitigen und zukünftigen Gebäudebestand besser abzubilden und somit eine höhere Qualität der Ergebnisse zu erzielen, ist jedoch eine höhere Anzahl von Gebäudestandards zu betrachten. Dementsprechend werden im Gegensatz zu der genannten Studie die Energieeffizienzkategorien von zwei auf vier erweitert. Die Energieklasse Bestand wird in Altbau und Altbau+ unterteilt. Ebenso werden die Neubauten in zwei Gruppen eingeordnet. Es wird dafür neben der Kategorie Neubau auch Neubau+ betrachtet.

Die Kategorie Altbau repräsentiert Gebäude, welche vor der ersten Wärmeschutzverordnung (1978) gebaut wurden. Die Kategorie Altbau+ stellt die restlichen Bauten dar, die nach Einführung der Wärmeschutzverordnungen errichtet wurden. Die Gruppe Neubau repräsentiert Gebäude, welche nach Einführung der Energieeinsparverordnungen gebaut wurden. Diese Energieeffizienzkategorie wird zudem für die Gebäude verwendet, die bis 2020 gebaut werden sollen. Letztlich werden alle Gebäude als Neubau+ berücksichtigt, welche ab 2020 errichten werden.

Tabelle 3.1 zeigt die Nutzfläche des Gebäudebestands der Sektoren Haushalte und GHD in Deutschland. Die Tabelle wurde von [3] entnommen und mit aktuellen Angaben erweitert. Dazu wurden die neuen Energieeffizienzkategorien ergänzt.

Ausgehend von der bestehenden Nutzfläche jeder Baualtersklasse sowie weiteren Angaben aus der Literatur wurden typische baukonstruktive Standards bzw. Richtlinien für die ausgewählten Gebäudetypen ermittelt. Diese Standards dienen zur weiteren Definition der baukonstruktiven und technischen Kennwerte. Deshalb orientieren sich die Kennwerte Altbau+ an der zweiten Wärmeschutzverordnung [10]. Diese wird ausgewählt, da die Nutzfläche von Bauten der Baualtersklasse, die in dieser Studie zur Kategorie Altbau+ gehören, diesem Standard größtenteils entspricht. Für die Kategorie Neubau werden wie in [3] die Kennwerte nach EnEV 2009 [9] verwendet. Für die Kategorie Neubau+ werden Kennwerte nach Passivhaus-Standard bzw. nach KfW40 [8] herangezogen. Die Tabelle 3.2 fasst alle Kategorien und ihren jeweiligen energetischen Standard zusammen.

Gebäudetyp	Energieeffizienzkategorie										
	Altbau					Altbau+			Neubau		Neubau+
Baualtersklasse:	**bis 1918**	**1919-1948**	**1949-1957**	**1958-1968**	**1969-1978**	**1979-1983**	**1984-1994**	**1995-2001**	**2002-2014**	**2015-2020**	**2021-2050**
EFH	262	232	168	294	312	155	263	238	256	-	-
MFH	216	137	142	272	256	86	168	130	41	-	-
Wohnen gesamt:	478	369	310	566	568	241	431	368	297	-	-
Baualtersklasse:	**bis 1918**	**1919-1948**	**1949-1965**		**1966-1978**	**1979-1988**	**1989-1998**	**1999-2001**	**2002-2014**	**2015-2020**	**2021-2050**
Büro / Verwaltung	90	39	55		45	92	150	14	37	-	-
Hotels Gaststätten	84	36	51		39	65	28	2	6	-	-
Bildungsgebäude	83	35	50		24	17	12				
Einzelhandel	68	29	41		32	41	66	86	309	-	-
Sonstiges	247	106	150		95	173	108				
NWG gesamt:	571	245	348		234	387	364	103	353	-	-
Gesamt WG + NWG:	1048	613	1224		802	628	794	470	650	-	

Tabelle 3.1 Nutzfläche des Gebäudebestands in Deutschland. Sektoren: Haushalt und GHD. Stand 2014 (Mio. m2). Quellen: [8] , [11] , [12] , [13]

Gebäudetyp	Energieeffizienzkategorie			
	Altbau	**Altbau+**	**Neubau**	**Neubau+**
EFH	BAK 1958-68	BAK 1984-94 bzw. 2. WschVO	EnEV 2009	Niedrigstenergiehaus bzw. KfW 40 / Passivhaus
MFH	Quelle: [8] S. 32, Abs. 5.1	Quelle: [8] S. 18, Tab. 4		
Büro	BAK 1: bis1976 Quelle: [14] S. 34	BAK 3: 1984-94 bzw. 2. WschVO Quelle: [14] S. 34	Quelle: [3] S. 29	Quelle: [8] S. 45, Abs. 6.1

Tabelle 3.2 Angenommene energetische Gebäudestandards für die Energieeffizienzkategorien.

3.1.2 Gebäudemodelle

Neben den drei ausgewählten Gebäudetypen und den vier festgelegten Energieeffizienzklassen wurden auch in der laufenden Studie verschiedene technische Systeme bestimmt. Es wurden somit insgesamt 21 Gebäudevarianten definiert (s. Tabelle 3.3).

Als Übergabesystem für die Heizung und Kühlung wurden für den „Stand der Technik“ Radiatoren sowie eine mechanische Lüftung definiert für Flächenheizsysteme Fußbodenheizung und Kapillarrohrmatten. Diese Systeme können auch nachträglich bei einer Gebäudesanierung eingebaut werden, was z.B. bei einer Betonteilaktivierung nur sehr

schwierig zu realisieren ist. Aus diesem Grund wird die Betonteilaktivierung nicht betrachtet.

Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass Ein- und Mehrfamilienhäuser in Deutschland in der Regel nicht mit einer aktiven Kühlung ausgestattet sind. Beim Bürogebäude wird eine Kühlanlage berücksichtigt.

Gebäudetyp	Energieeffizienz	Lüftung	Heizung	Kühlung	Modell-Nr.
EFH	Altbau	Freie Lüftung (Querlüftung)	RAD	-	1
	Altbau +	Freie Lüftung (Schachtlüftung)	RAD	-	2
			FBH	-	3
	Neubau	Ventilatorgestützte Lüftung (Abluftsystem)	RAD	-	4
			FBH	-	5
	Neubau +	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem mit WRG)	LH	-	6
			FBH	-	7
MFH	Altbau	Freie Lüftung (Querlüftung)	RAD	-	8
	Altbau +	Freie Lüftung (Schachtlüftung)	RAD	-	9
			FBH	-	10
	Neubau	Ventilatorgestützte Lüftung (Abluftsystem)	RAD	-	11
			FBH	-	12
	Neubau +	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem mit WRG)	LH	-	13
			FBH	-	14
BUE	Altbau	Freie Lüftung (Querlüftung)	RAD	-	15
	Altbau +	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem mit WRG)	RAD	LK	16
			FBH	KRM	17
	Neubau	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem mit WRG)	RAD	LK	18
			FBH	KRM	19
	Neubau +	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem mit WRG)	LH	LK	20
			FBH	KRM	21

RAD: Radiator LH: Luftheizung FBH: Fußbodenheizung LK: Luftkühlung KRM: Kapillarrohrmatte

Tabelle 3.3 Gebäudemodelle-Überblick

Für die Erstellung der Gebäudemodelle ist die Festlegung der Bilanzgrenzen von hoher Relevanz. Deshalb werden, wie in [3] dargestellt, die Bilanzgrenzen der Simulation für die verschiedenen Gebäudetypen über die jeweilige Nutzungseinheit bestimmt. Die Modellierung von vollständigen Gebäuden würde zur deutlichen Erhöhung der Modell-Komplexität sowie des Simulationsaufwands führen. Des Weiteren wäre die Annahme von zusätzlichen Rahmenbedingungen notwendig, um die verschiedenen Simulationsmodelle zu definieren. Dies hätte zudem keinen höheren Grad an Genauigkeit zur Folge. Durch die Begrenzung auf die Nutzungseinheit ist auch die Übertragbarkeit besser zu realisieren [3].

So wird beim Einfamilienhaus das gesamte Gebäude als Nutzungseinheit definiert. Größere Gebäude werden dagegen als Bauten berücksichtigt, die aus einer Folge von typischen Nutzungseinheiten bestehen. Demnach wird beim Bürogebäude ein zwei Personen Büro als Nutzungseinheit angesehen. Beim Gebäudetyp Mehrfamilienhaus ist die Nutzungseinheit eine Wohnung (s. Abbildung 3.2). Größe, Geometrie und Nutzeranzahl der festgelegten Nutzungseinheiten werden aus Gründen der Vergleichbarkeit und Plausibilisierung der Modelle ebenfalls aus [3] übernommen.

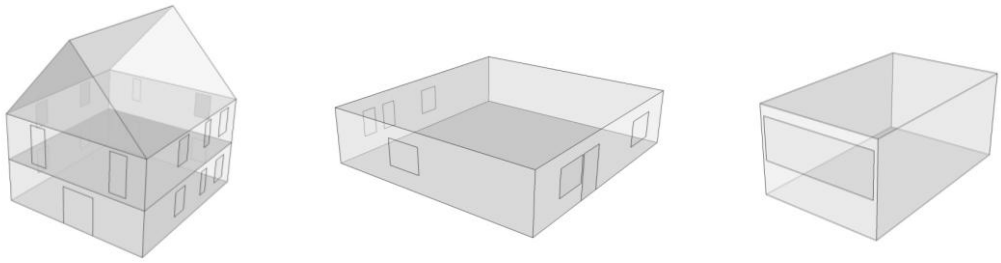


Abbildung 3.2 Nutzungseinheiten der ausgewählten Gebäudetypen:Einfamilienhaus (links), Mehrfamilienhaus (mitte) und Bürogebäude (rechts).

Gebäudemodell Einfamilienhaus (EFH)Es handelt sich um einen 4-Personen-Haushalt mit zwei ausgebauten Vollgeschossen. Die Grundfläche beträgt 90 m^2, woraus sich eine Wohnfläche von 180 m^2 ergibt. Das Gebäude ist Nord-Süd orientiert und hat einen Fensterflächenanteil von 12 % der Außenwand. In den Modellvarianten Neubau und Neubau+ wird, im Gegensatz zu [3], kein Ausbau des Daches berücksichtigt. Dies ist notwendig um in allen Modellen dieselben Rahmenbedingungen sicher zu stellen. Für alle Wohngebäude wird von einer ganztägigen Nutzungszeit ausgegangen. Für die Belegung wird ein Profil aus der DIN V 18599, Teil 11 „Gebäudeautomation“ [15] herangezogen. Der Referenzfall berücksichtigt für die Betriebszeiten und die Parameter der Anlagentechnik die Vorgaben aus der DIN V 18599, Teil 10 „Nutzungsbedingungen, Klimadaten“ [16]. Dabei wird angenommen, dass die Lüftungsanlage 24 Stunden in Betrieb ist und das Heizsystem eine Nachtabsenkung zwischen 23 und 6 Uhr aufweist.

Gebäudemodell Mehrfamilienhaus (MFH)

Für das Modell des Mehrfamilienhauses wird eine Wohnung mit einer Fläche von 110 m^2 und einem Raumvolumen von 286 m^3 modelliert. Die internen Lasten werden auf Basis eines 3-Personen-Haushalts ermittelt. Die Nutzungsprofile werden ebenfalls aus [15] abgeleitet. Der Fensterflächenanteil beträgt 14 %.

Gebäudemodell Bürogebäude (BUE)

Die Grundfläche des Büros beträgt 20 m² bei einem Raumvolumen von 50 m². Die Außenwand hat einen Fensteranteil von 45 %. Als Nutzungszeitraum wird von einem Arbeitstag von 7 bis 18 Uhr ausgegangen. Am Wochenende wird nicht gearbeitet, was sich wiederum auf die Raumkonditionierung auswirkt. An einem typischen Arbeitstag werden Lüftung, Heizung und Kühlung bereits 2 Stunden vor Arbeitsbeginn aktiviert und schalten um 18 Uhr mit Ende der Anwesenheitszeit ab.

Alle weiteren baukonstruktiven und technischen Kennwerte, die für die Definition der Gebäudemodelle festgelegt wurden, sind im Anhang A.1 zusammengefasst.

3.2 Erzeugungsanlage und intelligente Regelung

Die Anlagentechnik zur Bereitstellung der im Gebäude benötigten Wärme und ihre Regelung stellen die Schnittstelle zwischen der Gebäudesimulation und der Energiesystemmodellierung dar. Für jeden Gebäudetyp werden verschiedene gebräuchliche Technologien zur Bereitstellung der Wärme definiert (z.B. Wärmepumpe mit Pufferspeicher oder konventioneller Ölkessel). Für jede Kombination von Gebäudetyp und Anlagentechnik werden mit Hilfe einer Regelung die Einsatzzeiten des Heizsystems bestimmt.

3.2.1 Gebäudetechnische Erzeugungsanlage

Zur Versorgung der Gebäude mit Wärme werden hier grundsätzlich die vier verschiedenen Erzeugungstechnologien Ölkessel, Gaskessel, Wärmepumpe und Blockheizkraftwerk (BHKW) betrachtet. Sowohl die Wärmepumpe als auch das BHKW werden dabei mit einem Pufferspeicher betrieben. Das BHKW besitzt zudem einen zusätzlichen Spitzenlastkessel (SLK) zur Deckung der Lastspitzen. Die betrachteten Konzepte zur Wärmeerzeugung sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst und grafisch dargestellt.

3.2.2 Regelung der Gebäude

Stand der Technik in der Gebäudeautomatisierung ist die sogenannte regelbasierte Regelung. Dabei werden die Stellgrößen durch eine Serie von Regeln der Form „wenn Bedingung X, dann Aktion Y“ festgelegt [17]. Der Regler ist somit lediglich in der Lage auf aktuelle Ereignisse zu reagieren und die Zustände im Gebäude innerhalb vorher definierter Grenzen zu halten.

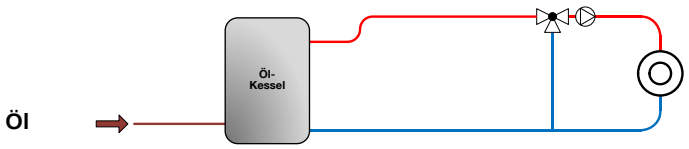
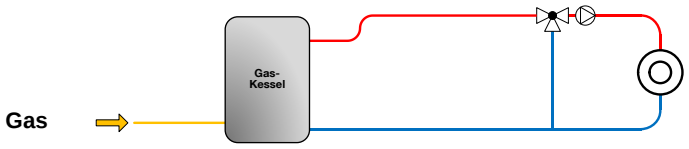
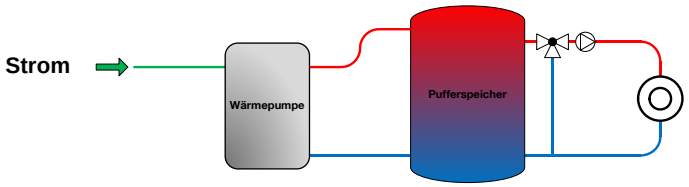
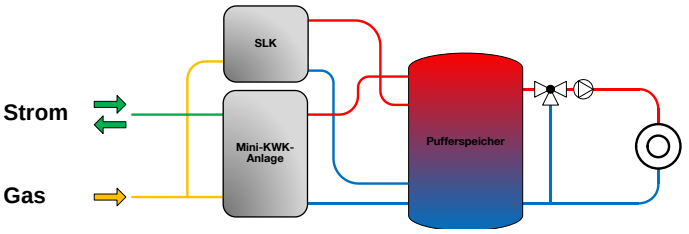
Anlagentechnik	Variante	Grafische Darstellung
Ölkessel	konventionell	
Gaskessel	konventionell	
Wärmepumpe	konventionell	
BHKW	konventionell	

Tabelle 3.4 Betrachtete Anlagentechniken zur Bereitstellung der Wärme

Der Regler ist in Form eines Hystereseregler umgesetzt und wodurch die Heizung ein- beziehungsweise ausgeschaltet wird, so dass die Raumtemperatur immer innerhalb des Komfortbandes gehalten wird. Der Volumenstrom ist je nach Gebäudetyp und Wärmeübertragungstechnologie so angepasst, dass eine ausreichende Heizleistung übertragen werden kann. Die Vorlauftemperatur wird gemäß einer Heizkurve in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt. Die einzelnen Wärmeerzeugungstechnologien wurden in Form von Gleichungen abgebildet, welche die aufgenommene Heizleistung in eine entsprechende Brennstoffmenge umrechnen. Für das Wärmepumpensystem wurde zudem ein Pufferspeicher berücksichtigt, der von der Wärmepumpe immer dann beladen wird, wenn er leer ist. Die grundlegende Funktionsweise des Reglers ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Die so erzeugten Einzellastgänge der Gebäude werden dann, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, je nach Gebäudeausbauszenario zu einem elektrischen Gesamtlastgang zusammengefasst. Dieser Lastgang wird anschließend abhängig vom Strompreis zeitlich verschoben (s. Kapitel 4.5).

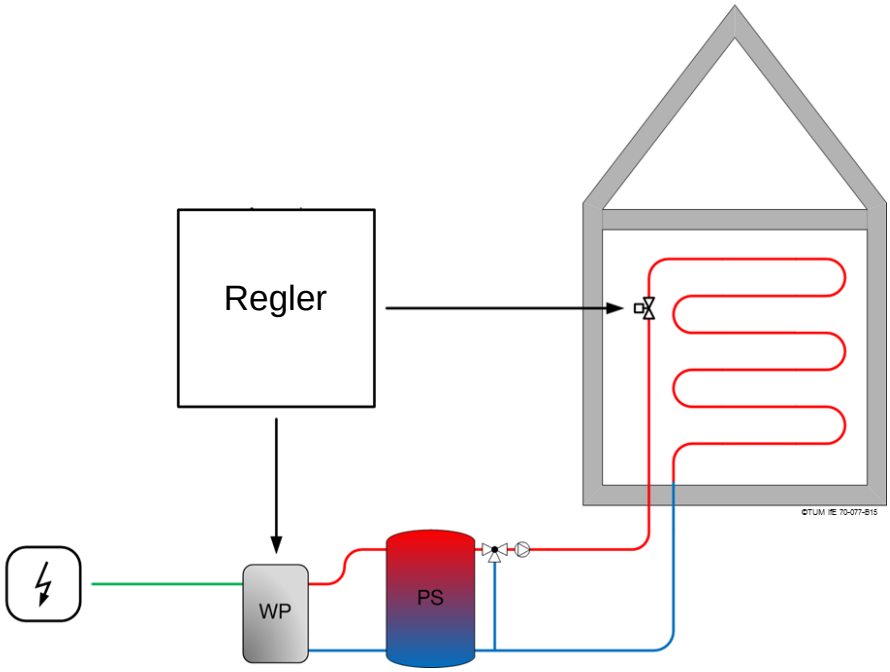


Abbildung 3.3 Prinzipielle Funktionsweise des Reglers

3.3 Entwicklung der Gebäude- und Anlagenstruktur und Berechnung des Gesamtlastgangs

Um den Einfluss des Gebäudeverhaltens auf das Energiesystem bis ins Jahr 2050 zu untersuchen, muss auch die Entwicklung der Gebäude- und Analgenstruktur und deren Veränderung durch Abriss, Neubau und Sanierung berücksichtigt werden. Dazu wurde ein Softwaretool zur Auswahl von Sanierungsentscheidungen und Anlagentechniken mit Berücksichtigung verschiedener Szenarien implementiert. Die Grundstruktur des Auswahltools ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Ausgehend vom aktuellen Gebäude- und Anlagenbestand wird zunächst der Abriss- und Neubau von Gebäuden berücksichtigt. Anschließend wird ein festgelegter Anteil der Gebäude saniert, was sowohl bauliche Maßnahmen als auch einen Austausch bzw. Neubau der Heizungssysteme miteinschließt. Mit Hilfe der so ermittelten neuen Gebäudeverteilung und der aus der Simulation gegebenen Stromlastgänge wird so ein Gesamtlastgang ermittelt. Diese Schritte werden für alle in der Energiesystemoptimierung genutzten Stützjahre (2020, 2030, 2040, 2050) durchgeführt, wobei jeweils das Ergebnis des vorherigen Stützjahres als Eingang verwendet wird. Zudem werden die verschiedenen Gebäudetypen Büro, Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus getrennt betrachtet und erst bei Erstellung des Gesamtlastgangs zusammengeführt. Im Folgenden werden die einzelnen Module genauer erläutert.

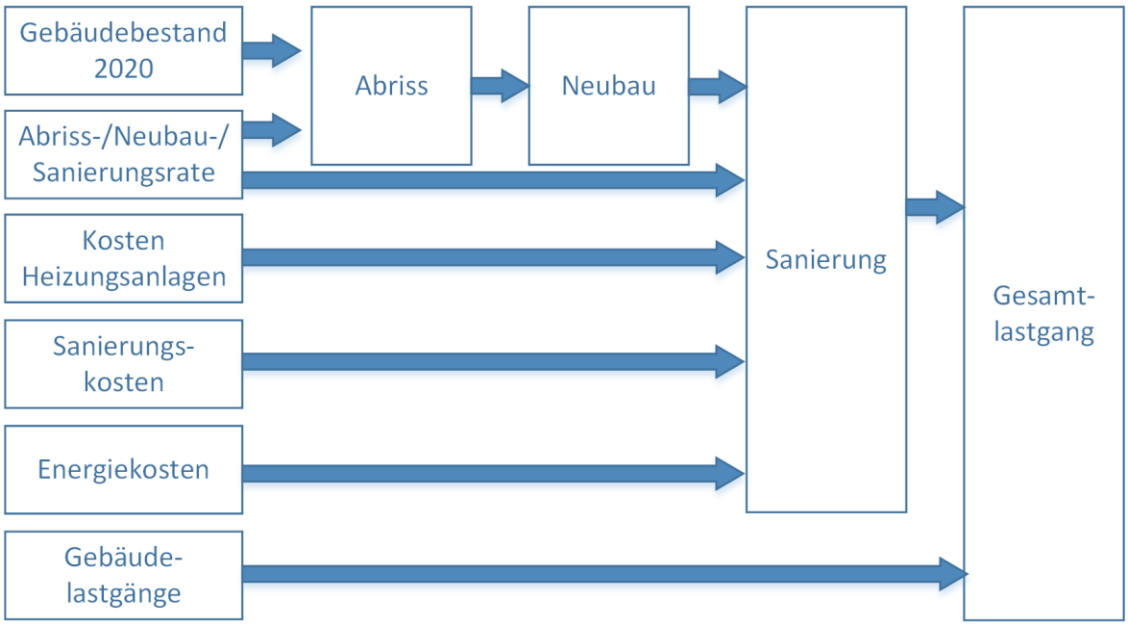


Abbildung 3.4 Schema des Tools zur Berechnung der Gebäudeentwicklung und des Gesamtlastgangs

3.3.1 Eingangsdaten

Für jeden Gebäudetyp wird zunächst die aktuelle Aufteilung des Gebäudebestands nach den für dieses Projekt definierten Energieeffizienzkategorien und Anlagensystemen benötigt. Zudem werden die aus der Gebäudesimulation berechneten jährlichen flächenbezogenen Energiekosten (in €/m^2) für jede der berücksichtigten Möglichkeiten verwendet.

EFH [Gebäudebestand in %]		**Energieerzeugung**			
Energieeffizienz	**System**	**OEL-Kessel**	**GAS-Kessel**	**WP**	**BHKW**
Altbau	**RAD**	22,94%	32,15%	--	0,00%
Altbau +	**RAD**	11,87%	16,63%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	1,05%	0,00%
Neubau	**RAD**	4,64%	6,50%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	4,22%	0,00%
Neubau +	**FBH**	--	--	0,00%	--

RAD: Radiator FBH: Fußbodenheizung WP: Wärmepumpe BHKW: Blockheizkraftwerk

Tabelle 3.5 Aktueller Bestand für Gebäudetyp Einfamilienhaus nach [18]

Tabelle 3.5 zeigt die hier angenommenen Werte vom Gebäudebestand für den Gebäudetyp Einfamilienhaus. Diese werden nach Art der Energieerzeuger unterschieden. In diesem Projekt nicht berücksichtigte Konfigurationen sind mit „--“ gekennzeichnet. Die Untersuchung des Verschiebepotenzials der Wärmeerzeugung durch die thermische Aktivierung der Gebäudemasse steht im Vordergrund. Deshalb werden für diese

Berechnungen bei den Gebäuden der Energieeffizienzkategorie Neubau+ lediglich Fußbodenheizungen als Wärmeübergabesystem betrachtet. Luftheizungen, die ebenfalls ein mögliches System für den betrachteten Energiestandard sind, werden bei Sanierungen von Altbauten im Wohnbereich meistens nicht eingesetzt und daher hier nicht berücksichtigt. Die Daten vom aktuellen Gebäudebestand für die beiden anderen Gebäudetypen sind in Anhang A.2 zu finden.

Neben den oben genannten Eingangsdaten werden zusätzlich die spezifischen flächenbezogenen Sanierungskosten für alle betrachteten Möglichkeiten der Gebäudesanierung inklusive Wärmeübertragungssystem betrachtet. Ausgehend von den IWU Studien [19], [20] werden nur die energiebedingte Mehrkosten einer Modernisierung als Sanierungskosten berücksichtigt. Tabelle 3.6 zeigt diese für den Gebäudetyp Einfamilienhaus. Die verwendeten Werte für die anderen beiden Gebäudetypen sind in Anhang A.2 zu finden.

EFH [Sanierungskosten in €/m²]		**Altbau**	**Altbau +**		**Neubau**		**Neubau +**
Energieeffizienz	**System**	**RAD**	**RAD**	**FBH**	**RAD**	**FBH**	**FBH**
Altbau	**RAD**	--	--	--	144	180	319
Altbau +	**RAD**	--	--	--	116	152	291
	FBH	--	--	--	--	116	255
Neubau	**RAD**	--	--	--	--	36	235
	FBH	--	--	--	--	--	199
Neubau +	**FBH**	--	--	--	--	--	--

RAD: Radiator FBH: Fußbodenheizung

Tabelle 3.6 Sanierungskosten für Gebäudetyp Einfamilienhaus nach [19], [20]

Zudem werden die spezifischen flächenbezogenen Investitionskosten für die Heizungsanlagen benötigt. Die hier verwendeten Werte sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Heizungsanlage	**Kosten [€/m²]**
OEL-Kessel	61.0
GAS-Kessel	73.0
Wärmepumpe (WP)	142.0
Blockheizkraftwerk (BHKW)	177.5

Tabelle 3.7 Spezifische Kosten der Heizungsanlagen nach [19] und [5]

Des Weiteren werden Informationen zur Abriss- und Neubaurate, Sanierungsquote sowie der aktuellen Bestandsflächen benötigt. Die für diese Studie verwendeten Werte sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Parameter	EFH	MFH	BUE
Sanierungsquote [%/a]	2,0	2,0	2,0
Neubaurate [%/a]	1,0	1,0	1,0
Abrissrate [%/a]	0,1	0,1	0,1
Bestandsfläche 2020 [Mio. m^2]	2180,2	1446,3	526,2

Tabelle 3.8 Verwendete Entwicklungsparameter und aktuellen Bestandsflächen

3.3.2 Abriss

Für jedes Stützjahr werden zunächst nur die Gebäude aus dem ältesten vorhandenen Energiestandard für den Abriss betrachtet. Sind keine Gebäude mehr vorhanden, wird auch der nächstältere Energiestandard berücksichtigt. Dabei wird jeweils die Gebäudekonfiguration mit den höchsten jährlichen Energiekosten gewählt und der Bestand um die Abrissrate (umgerechnet auf die Dauer von 10 Jahren zwischen den Stützjahren) reduziert.

3.3.3 Neubau

Für den Neubau werden ausschließlich Gebäude des Energiestandards Neubau+ berücksichtigt. Für jedes Stützjahr wird auf Basis der angenommenen Energiepreise und der aus der Simulation berechneten Lastprofile die Gebäudekonfiguration mit den günstigsten Energiekosten gewählt und entsprechend der Neubaurate ausgebaut.

3.3.4 Sanierung

Für die Sanierung wird zunächst für jede zulässige Sanierungsoption die jährlichen Gesamtkosten, bestehend aus Sanierung-, Energie- und Anlagenkosten berechnet. Die zulässigen Sanierungsoptionen ergeben sich aus den Möglichkeiten der Gebäudesanierung inklusive Wärmeübertragungssystem (Tabelle 3.6) kombiniert mit den möglichen Heizungssystemen (hier Tabelle 3.7). Anschließend werden zunächst nur die Gebäude mit dem ältesten vorhandenen Energiestandard für die Sanierung betrachtet. Dabei wird jeweils die Sanierungsoption, die zu den geringsten Gesamtkosten führt, ausgewählt und umgesetzt. Sind nicht mehr genügend Gebäude dieser Gebäudekonfiguration vorhanden, um die geforderte Sanierungsquote zu erfüllen, wird auf die nächst günstigste Sanierungsoption bzw. den nächst älteren Energiestandard übergegangen.

Somit ergibt sich für jede Gebäudekategorie und jedes Stützjahr, eine neue Aufteilung der Gebäudekonfigurationen. Die zulässigen Pfade zur Gebäudesanierung sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Tabelle 3.9 zeigt beispielhaft ein Ergebnis für die Aufteilung der Gebäudekategorie EFH im Jahr 2050.

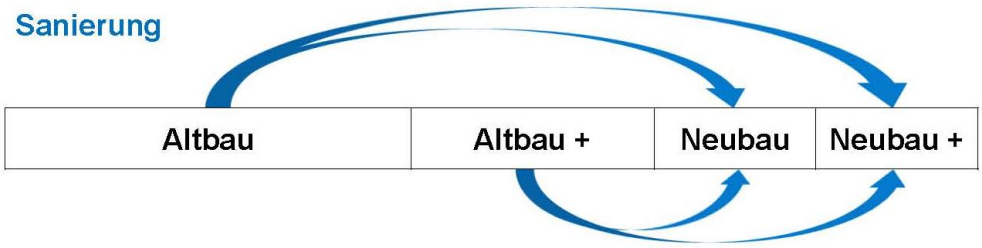


Abbildung 3.5 Zulässige Pfade der Gebäudesanierung

EFH [Gebäudebestand in %]		**Energieerzeugung**			
Energieeffizienz	**System**	**OEL-Kessel**	**GAS-Kessel**	**WP**	**BHKW**
Altbau	**RAD**	0,00%	0,00%	--	0,00%
Altbau +	**RAD**	0,00%	10,11%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	0,59%	0,00%
Neubau	**RAD**	58,85%	3,81%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	2,37%	0,00%
Neubau +	**FBH**	--	--	26,27%	--

RAD: Radiator FBH: Fußbodenheizung WP: Wärmepumpe BHKW: Blockheizkraftwerk

Tabelle 3.9 Exemplarische Aufteilung der Gebäudekonfiguration im Jahr 2050 für Gebäudetyp Einfamilienhaus

3.3.5 Berechnung des Gesamtlastgangs

Auf Basis der berechneten Aufteilung der Gebäudekonfigurationen für jeden Gebäudetyp kann für jedes Stützjahr der elektrische Gesamtlastgang berechnet werden. Dabei wird jeweils über die Bestandsfläche des Gebäudetyps und den Anteil der jeweiligen Gebäudekonfiguration dessen Gesamtfläche berechnet. Der jährliche elektrische Lastgang dieser Konfiguration, welcher aus der Regelung bekannt ist, wird bezüglich dieser Gesamtfläche skaliert. Die Summe aller so berechneten Lastgänge für jede Gebäudekonfiguration ergibt den Gesamtlastgang aller Gebäude für das jeweilige Stützjahr.

3.4 Stromsystemmodell

Über die Gesamtlastgänge je Stützjahr findet die Kopplung zum Stromsystemmodell statt. Die Beschreibung des Stromsystemmodells sowie der Datengrundlage und einiger Ergebnisse sind bereits veröffentlicht worden [21]. Sie werden für das bessere Verständnis im Rahmen dieses Berichts nochmals dargestellt.

Um den Einfluss der Raumwärme auf das Stromsystem zu untersuchen, bedarf es der Anwendung eines Modells. Hierfür wird das Stromsystemmodell IMAKUS [6] herangezogen, dessen Ziel es ist, die gegebene Stromnachfrage zu allen betrachteten Zeitpunkten kostenminimal zu decken. Ergebnis des Modells sind optimaler Kraftwerks- und Speicherausbau und –einsatz für den betrachteten Zeithorizont. Berücksichtigung findet dabei die Systemzuverlässigkeit durch die Berechnung der gesicherten Kraftwerksleistung. Abbildung 3.6 Schematische Darstellung des Stromsystemmodells . Abbildung 3.6 stellt das Prinzip der Modells dar.

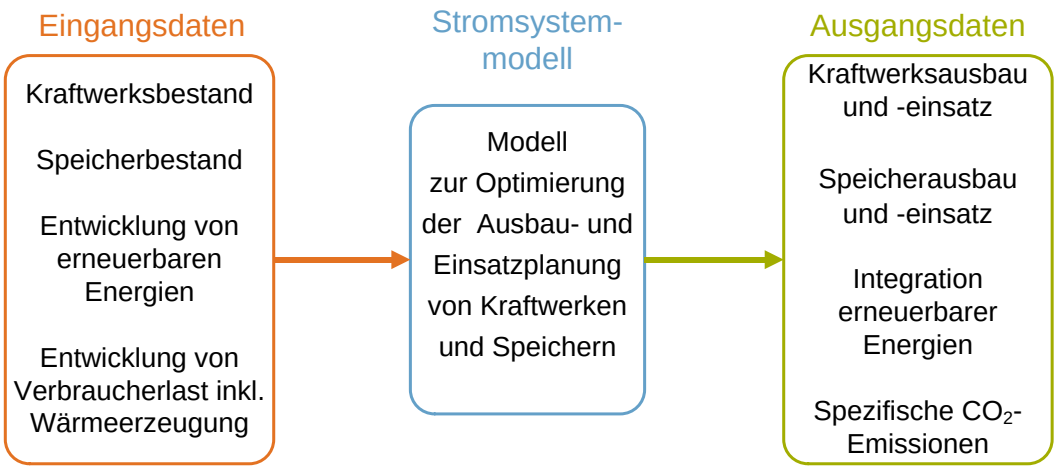


Abbildung 3.6 Schematische Darstellung des Stromsystemmodells [21]

Als Ausgangspunkt dient der bestehende Kraftwerkspark in Deutschland mit aktuell bestehenden Pumpspeicherwerken zusammen mit der Stromnachfrage Deutschlands. Für die erneuerbaren Energien (EE) und die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird sowohl der Ausbau der Erzeugungskapazität als auch die Stromerzeugung als gesetzt angenommen; es wird nicht durch das Modell optimiert. Durch Subtraktion der gesetzten Erzeugung von der Stromnachfrage entsteht die Residuallast, welche letztlich durch den flexiblen Einsatz konventioneller Kraftwerke und großtechnischer Speicher gedeckt wird. Zusätzlich zur Nachfrage, dem Kraftwerk- und Speicherbestand und der gesetzten Erzeugung werden technische und ökonomische Daten zu Kraftwerken und Speichern ebenso wie Zertifikatspreise für CO_2-Emissionen als Eingangsdaten für das

Stromsystemmodell benötigt. Die Daten basieren auf dem aktuellen Zeitpunkt und werden bis zum Ende des Betrachtungszeitraums extrapoliert. Ergebnisse des Modells können bspw. Aussagen über die Entwicklung des Kraftwerksparks und Speicherneubaus, die CO2-Emissionen oder die Integration der erneuerbaren Energien sein.

Das Stromsystemmodell arbeitet mit einigen vereinfachenden Annahmen. Zum einen wird die Netzinfrastruktur als ideal ausgebaut angenommen, daher werden die räumliche Verteilung der Kraftwerke und Speicher und damit einhergehende mögliche Netzrestriktionen im Modell nicht betrachtet. Für die Betrachtung bedeutet das eine tendenziell bessere Ausnutzung von konventionellen Kraftwerken und eine bessere Nutzung der erneuerbaren Energien.

Die Teilnahme von Kraftwerken oder Speichern an bestehenden Regelenergiemärkten und die Regelenergiemärkte selbst werden ebenso wenig abgebildet. Im Modell stehen damit mehr Kraftwerke zur Deckung der Residuallast zur Verfügung, was zu schlechteren Ausnutzungsdauern führen kann. Ebenso werden sich die Grenzkosten tendenziell günstiger abzeichnen, als mit Regelleistungsabbildung, da unterschiedlichere Kraftwerke mit unterschiedlicheren Kostenstrukturen zur Nachfragedeckung zur Verfügung stehen.

4 Rahmenbedingungen und Szenariodefinition

4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

4.1.1 Wetterdaten

Als Referenzklima für Deutschland gilt nach DIN V 18599-10:2011-12 der Standort Potsdam [16]. Demzufolge werden Wetterdaten von diesem Referenzstandort für die Simulationen mit den Gebäude- und Anlagetechnikmodelle verwendet.

Generell werden Testreferenzjahre (TRY) für die Berechnungen der Heizungs- und Konditionierungsanforderungen von Gebäuden eingesetzt. TRY repräsentieren den typischen Witterungsverlauf eines Gebietes. Sie enthalten diverse meteorologische Daten für jede Stunde eines Jahres und werden aus Messwerten über einen langen Zeitraum bestimmt. Die Datensätze eines TRY entsprechen somit in der Regel durchschnittlichen Werten der ausgewählten Parameter. Speziell für die Auslegung von heiz- und raumlufttechnische Anlagen werden zudem Witterungsprofile aus extremen Messwerten der Basisperiode definiert [22].

Im Rahmen dieser Studie werden die Wetteraufzeichnungen des Jahres 2012 statt ein TRY für den Standort Potsdam zu Gunsten der Kombination mit dem Stromsystemmodell verwendet [23]. Die Datensätze des Witterungsverlaufs eines konkreten Jahres stellen keine mittleren oder extremen Werte einer Periode, sondern reale Messwerte dar, die für die Untersuchungen unter Berücksichtigung der thermischen Trägheit der Gebäudemasse geeignet sind. Die Wahl des Jahres 2012 begründet sich auf einer Untersuchung von Erzeugungs- und Nachfragezeitreihen [24]. Es wurden die Zeitreihen der Jahre 2003-2012 verglichen mit dem Ergebnis, dass das Jahr 2012 das typischste Jahr im Sinne der residualen Nachfrage und Überschusserzeugung aus erneuerbaren Energien ist.

4.1.2 Thermische Behaglichkeit

Als wichtige Voraussetzung für die Durchführung von Lastmanagement gilt die Einhaltung des thermischen Komforts. Dieser wird über einen Behaglichkeitsbereich dargestellt. Als Grenzen für den Behaglichkeitsbereich wird unter anderem die operative Raumtemperatur herangezogen. Diese setzt sich aus einem Mittelwert der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur aller Oberflächen des Raumes zusammen.

Als Randbedingung für die Untersuchungen wird gewährleistet, dass der thermische Komfort sich innerhalb des Behaglichkeitsbereiches bewegt. Durch das Lastmanagement sollen keine negativen Auswirkungen für den Nutzer entstehen.

Als Bewertung für den thermischen Komfort werden folgende Kennwerte in Anlehnung an die Norm DIN EN 15251 [25] definiert:

Gebäudetyp	Kategorie	Temperaturbereich[1] im Heizfall [°C]	Temperaturbereich[1] im Kühlfall [°C]
EFH / MFH	II[2]	20-25	23-26
Büro	II[2]	20-24	23-26

1: Operative Temperatur 2: Normales Maß an Erwartungen

Tabelle 4.1 Thermische Behaglichkeitsbände bei der Gebäudesimulation

4.2 Spezifische Rahmenbedingungen für das Stromsystemmodell

Die Beschreibung der Rahmenbedingungen in diesem Kapitel 4.2 und seinen Unterkapiteln wurde bereits im Februar 2017 veröffentlicht und sind daher direkt [21] entnommen.

4.2.1 Stromnachfrage

Die Entwicklung der jährlichen Stromnachfrage im Basis-Szenario über den Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050 entspricht der in [26] angenommenen Entwicklung und eigenen Annahmen. In [26] wird der Zeitraum bis zum Jahr 2035 betrachtet und es wird von einer gleichbleibenden jährlichen Nachfrage von 552 TWh ausgegangen.

Die Charakteristik des Sockelbedarfs entspricht der auf den Maximalwert normierten Nachfragekurve für das Jahr 2012 für ganz Deutschland von [27]. Diese Charakteristik gilt für alle Jahre des Betrachtungszeitraums. Für eine stündliche Zeitreihe mit absoluten Werten werden die 8760 normierten Einzelwerte der Charakteristik mit den jeweiligen Jahressummen multipliziert und ergeben so einen stündlich aufgelösten Nachfrageverlauf über den gesamten Betrachtungszeitraum.

4.2.2 Erneuerbare und KWK-Stromerzeugung

Die erneuerbare Stromerzeugung wird als vorrangig und damit gesetzt angesehen. Es wird ein Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energien (EE) an der Stromnachfrage bis 2050 auf 80 % der Nettostromnachfrage angenommen. Der Wert von 80 % orien-

tiert sich am Ziel der Bundesregierung [28], bis zum Jahr 2050 diesen Anteil an erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung zu erreichen. In der Modellierung wird der Wert auf die Nettostromnachfrage des jeweiligen Szenarios bezogen, was der Art der Abbildung der erneuerbaren Energien im Stromsystemmodell geschuldet ist. Der aktuelle Anteil der EE an der Stromerzeugung wird [29] entnommen. Die Verteilung der Erzeugung innerhalb dieser Gruppe verändert sich über den Zeitraum von 2015 bis 2050. Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung der Einzelanteile und des Gesamtanteils der EE für die in [29] gegebenen Stützjahre. Zwischen diesen Stützjahren wird von einer linearen Entwicklung ausgegangen.

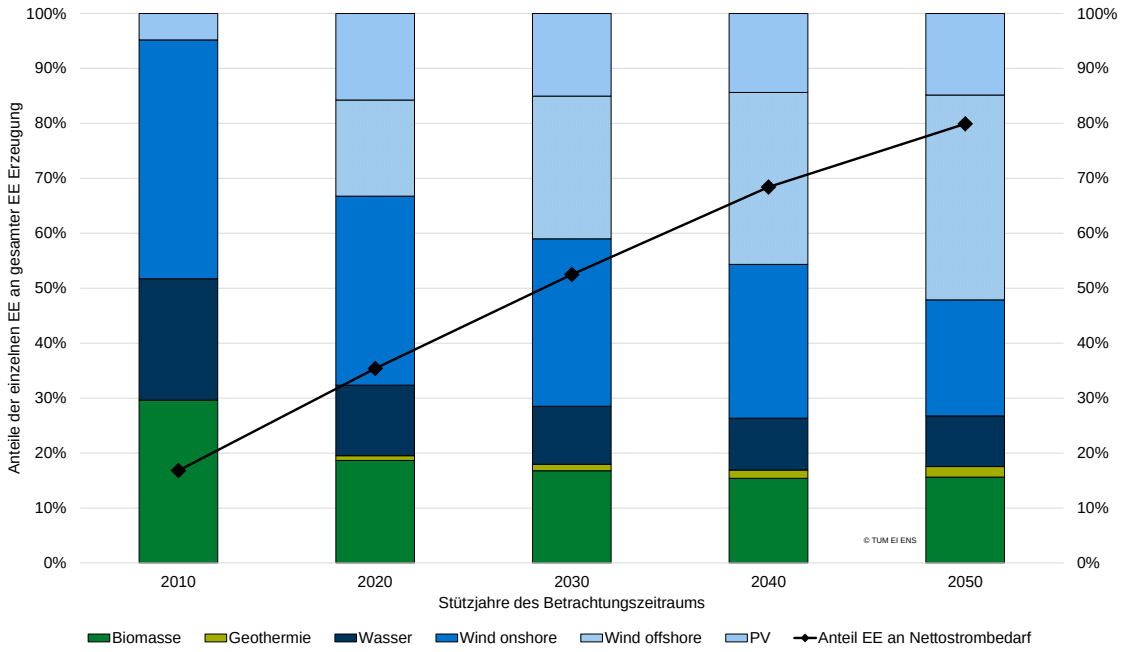


Abbildung 4.1 Entwicklung der gesetzten Erzeugung aus erneuerbaren Energien (EE)

Die Stromerzeugung aus wärmegeführten Kraft-Wärme-Kopplungskraftwerken (KWK) wird in die gesetzte Stromerzeugung eingeschlossen, ist aber aufgrund des fossilen Ursprungs nicht Teil der 80 % EE in der Stromerzeugung. Der Anteil des aus KWK-Anlagen erzeugten Stroms bleibt über den Betrachtungszeitraum weitgehend gleich bei 8,5 % der Gesamtstromnachfrage je Szenario [30].

Die Methodik zur Generierung der stündlichen Werte der Stromerzeugung für die unterschiedlichen erneuerbaren Energieträger ist analog zur Vorgangsweise bei der Stromnachfrage. Für die EE werden genauso Charakteristiken zugrunde gelegt, anhand derer die Erzeugungskurven generiert werden. Unterschiede in der Generierung der Charakteristiken bestehen wie folgt:

<u>Photovoltaik, Wind onshore und offshore:</u> Die Charakteristiken für Photovoltaik (PV), Wind offshore und Wind onshore werden nach [31] aus NASA MERRA-Daten [32] für

das Jahr 2012 berechnet. Dabei werden die Charakteristiken für PV und Wind onshore einzeln für alle 16 Bundesländer und für Wind offshore getrennt für Nord- und Ostsee errechnet. Die Charakteristiken werden anschließend mit den installierten Leistungen [33] in den jeweiligen Regionen gewichtet und zu einer PV-, einer Onshore-Wind- und einer Offshore-Wind-Charakteristik für Deutschland aggregiert.

KWK: Für die KWK-Erzeugung werden die Charakteristiken mit Hilfe von Modellen synthetisch ermittelt. Die Stromerzeugung wird als linear abhängig von der Wärmeerzeugung angenommen. Sie hängt folglich vom Wärmebedarf und somit von der jeweiligen Außentemperatur ab. Zusätzlich wird der Bedarf an Heizenergie auch von der Nutzung und folglich dem Wochentag beeinflusst. Mit Hilfe unterschiedlicher Sigmoid-Funktionen wird dieses Verhalten entsprechend näherungsweise parametrisiert [6].

Geothermie, Biomasse, Laufwasser: Für die Erzeugung aus Geothermie, Biomasse und Laufwasser wird ein zeitunabhängiges Profil angenommen. In den ersten beiden Fällen ist die Stromproduktion das ganze Jahr über konstant. Laufwasserkraftwerke zeigen jeweils innerhalb eines Monats konstantes Verhalten basierend auf dem Verhalten der Jahre zwischen 2000 und 2015 [27], [30].

4.2.3 Konventionelle Bestandskraftwerke

Zur konventionellen Stromerzeugung werden Kraftwerke gezählt, die aus nicht erneuerbaren Energieträgern befeuert werden. Es handelt sich um Kernenergie, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und Erdöl. Sie werden nach bereits bestehenden oder geplanten und noch nicht in Planung befindlichen Kraftwerken unterschieden. Die Bestandskraftwerke und der geplante Bau von Kraftwerken orientieren sich an der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur [34] und wurden um Daten aus [6], [24] sowie um eigene Annahmen ergänzt und erweitert.

Für die Kraftwerke, die in der Liste mit Kraft-Wärme-Kopplung angegeben werden, wird nach Brennstoff zwischen wärme- und stromgeführter Energieerzeugung unterschieden. Stein- und Braunkohlekraftwerke gelten als stromgeführt und sind somit Teil der Bestandskraftwerke, die durch das Stromsystemmodell variabel eingesetzt werden können. Gasbefeuerte Kraftwerke werden als wärmegeführt angenommen und sind somit nicht Teil der Bestandskraftwerksliste. Die Stromerzeugung aus diesen Kraftwerken wird mit der gesetzten Einspeisung aus den KWK-Anlagen in das Modell eingebracht. Für die Bestandskraftwerke wird angenommen, dass keine Investitionskosten anfallen im Betrachtungszeitraum.

4.2.4 Großtechnische Speicheranlagen

Der Bestand an großtechnischen Speichern beläuft sich auf die in Deutschland in Betrieb befindlichen Pumpspeicherkraftwerke. Die Grundlage bietet die Daten aus [35] und wurde um Annahmen aus [6], [24] erweitert. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Lebensdauer der Speicher den Betrachtungszeitraum überdauert.

4.2.5 Neubauoptionen für Kraftwerke und Speicher

In Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 werden die Annahmen zu den Rahmendaten der Neubauoptionen für Kraftwerke und Speicher dargestellt. Die technischen Daten zu Kraftwerken stammen aus [24], die ökonomischen Daten und die Lebensdauer der Kraftwerke sowie alle Daten zu Speicheranlagen stammen aus [6]. Im vorliegenden Modell wurde die Auswahl an Kraftwerken im Gegensatz zu o.g. Quellen reduziert. Es können über den gesamten Betrachtungszeitraum folgende Kraftwerke installiert werden: Gasturbinen-, Gas-und-Dampf (GuD-), sowie Braun- und Steinkohlekraftwerke. Für den Neubau von großtechnischen Speicheranlagen stehen die Technologien Pumpspeicherkraftwerke, Adiabate Druckluftspeicher (ab 2025) und Wasserstoffspeicher mit Rückverstromung über GuD-Kraftwerk (ab 2030) zur Auswahl.

Der Nennwirkungsgrad beschreibt die Effizienz des Kraftwerks, also welcher Teil der im Brennstoff enthaltenen Energiemengen in Strom umgesetzt werden kann. Die Blockgrößen beschreibt die übliche Spannbreite der jeweiligen Anlagengröße. Arbeitsverfügbarkeit beinhaltet sowohl die technische Zuverlässigkeit der Anlagentechnologie als auch den Zeitaufwand für Reparatur und Wartung, welcher wiederum von der geplanten Nicht-Verfügbarkeit beschrieben wird. Die Lebensdauer schätzt die mittlere wirtschaftliche Lebensdauer der Anlagen ab. Die jährlichen Fixkosten bilden die Fixkosten exklusive der Investitions- und Abrisskosten ab. Die variablen Betriebskosten beschreiben alle arbeitsabhängigen Kosten, die nicht Brennstoffkosten oder Kosten für Zertifikate sind.

Bei den Speichertechnologien sind die Größen zu Wirkungsgrad und Verfügbarkeit analog zu den Kraftwerken. Ebenso sind die Kosten und die Lebensdauer zu verstehen. Da eine Speicheranlage im Gegensatz zu den Kraftwerken in drei ggf. unabhängig wählbare Anlagenkomponenten (Lade-, Entlade- u. Speichereinheit) aufgeteilt werden kann, sind auch Investitions- und Betriebskosten entsprechend angegeben. Die Obergrenze des Potenzials für Speicherkapazität schätzt die in Deutschland maximal technisch ausbaubare Menge ab.

Parameter		Gasturbine	GuD	Steinkohle	Braunkohle
Nennwirkungsgrad	%	39	61	46	45
Mindestblockgröße	MW	10	500	400	525
Maximale Blockgröße	MW	250	1000	800	1050
Arbeitsverfügbarkeit	%	86,6	86,8	84,4	86,2
Geplante Nicht-Verfügbarkeit	%	8,7	8,2	8,4	6,5
Lebensdauer	a	30	30	40	40
Investitionskosten	EUR/kW	400	650	1400	1600
Jährliche Fixkosten	EUR/kW/a	7	20	25	30
Abrisskosten	EUR/kW	1,75	8,00	10,00	11,50
Variable Betriebskosten (ohne Brennstoff)	EUR/MWh_{el}	2,00	2,00	4,00	4,00

Tabelle 4.2 Technische und ökonomische Parameter der unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien nach [6] [24]

Parameter		PSW	AA-CAES	H_2-GuD
Speicherwirkungsgrad	%	80	70	40
Technische Verfügbarkeit	%	95	90	90
Geplante Nicht-Verfügbarkeit	%	3,8	3,8	3,8
Obergrenze des Potenzials				
- **Ladeleistung**	GW	10	200	200
- **Entladeleistung**	GW	10	200	200
- **Speicherkapazität**	GWh	40	6.600	500.000
Lebensdauer	a	70	30	30
Investitionskosten				
- **Ladeleistung**	EUR/kW	450	420	700
- **Entladeleistung**	EUR/kW	450	420	1000
- **Speicherkapazität**	EUR/kWh	6,50	31,00	0,09
Jährliche Fixkosten	EUR/kW/a	11	9	20
Abrisskosten	EUR/kW	8	2	8
Variable Betriebskosten				
- **Laden**	EUR/MWh_{el}	0,30	1,40	1,50
- **Entladen**	EUR/MWh_{el}	0,30	1,40	1,50

Tabelle 4.3 Technische und ökonomische Parameter der unterschiedlichen Speichertechnologien nach [6]

4.2.6 Preise und Restriktionen von Brennstoffen und CO_2-Emissionen

Abbildung 4.2 zeigt die Entwicklung der angenommenen Brennstoffpreise und die Preise für CO_2-Emissionszertifikate. Die Basis für die Preise ist [26], welche Werte für die Jahre 2012, 2025 und 2035 liefert. Diese Werte werden mit den jährlichen Inflationsraten aus 2013-2015 [36] auf das Basisjahr 2015 umgerechnet. Für die Jahre 2035 bis 2050 wird vereinfachend von keiner weiteren Preissteigerung ausgegangen. Der wesentliche Grund dafür ist, dass die Variationen der Eingangsdaten für das Stromsystemmodell möglichst gering gehalten werden soll, um Veränderungen in den Ergebnissen möglichst direkt mit Sensitivitäten im Gebäudebestand in Verbindung bringen zu können. Die Werte für die Jahre zwischen den Stützjahren aus [26] werden linear interpoliert. Nur der CO_2-Zertifikatspreis wird als weiter linear steigend bis 2050 angenommen.

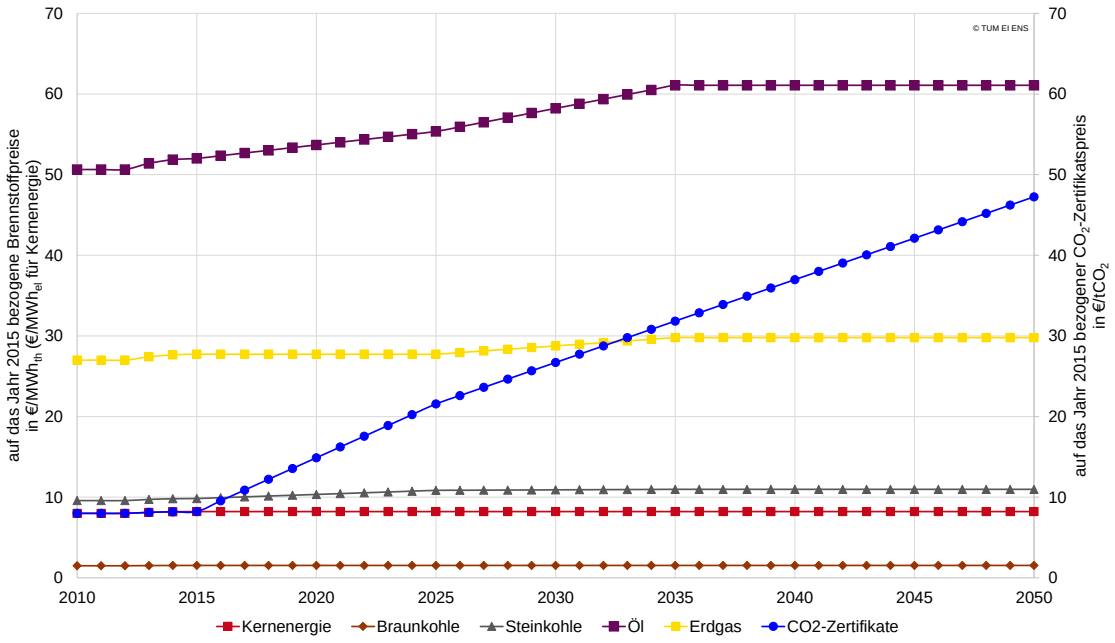


Abbildung 4.2 Entwicklung der Brennstoffkosten und des CO_2-Zertifikatspreises

Die CO_2-Emissionen werden im Modell nicht durch eine Mengenrestriktion beschränkt, da sie über den Zertifikatspreis berücksichtigt sind. Die Verfügbarkeit von Braunkohle und Steinkohle wird begrenzt und über den Betrachtungszeitraum reduziert. Im Jahr 2015 wurden in Deutschland 273 TWh Steinkohle bzw. 344 TWh Braunkohle zur Stromerzeugung verbraucht (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016). Für das Startjahr der Betrachtung 2015 werden diese Werte als Obergrenze im Modell angenommen. Bis zum Jahr 2050 wird die Verfügbarkeit auf 0 TWh reduziert. Mit Hilfe dieser Abbildung soll ein Kohleausstieg in der Stromerzeugung bis 2050 dargestellt werden.

4.2.7 Grenzen der Modellierung

Die Wärmenachfrage wird in dieser Art der Modell-Kopplung nicht direkt in das Stromsystemmodell eingebracht. Die Abbildung erfolgt über den intelligenten Regler und die Iteration der Ergebnisse der Regelung und des Stromsystemmodells. Der Regler erhält die Wärmenachfrage als Eingangsgröße und sorgt dafür, dass diese durch den kombinierten Einsatz von unterschiedlichen Wärmeerzeugungsanlagen gedeckt ist. Die Stromnachfrage der Wärmeerzeugungsanlagen wird im Stromsystem abgebildet und zu jedem Zeitpunkt gedeckt. Die Kopplung der beiden Modelle setzt so erst nach der Generierung der Wärmenachfrage in den Gebäudemodellen an. Eine mögliche Beeinflussung der eigentlichen Wärmenachfrage durch das Verhalten des Stromsystems kann somit nicht mehr betrachtet werden. Der Einfluss des Stromsektors auf den Wärmesektor setzt also erst bei der Erzeugung der Wärme an, nicht schon bei der Nachfrage.

4.3 Szenariendefinition der Gebäudeentwicklung

4.3.1 Gebäudeentwicklung im Szenario „Basis“

Für die Berechnung der Gebäudeentwicklung für das Basisszenario wird das in Kapitel 3.3 beschriebene Softwaretool mit den dort beschriebenen Eingangsparametern verwendet und keine weiteren Einschränkungen vorgenommen.

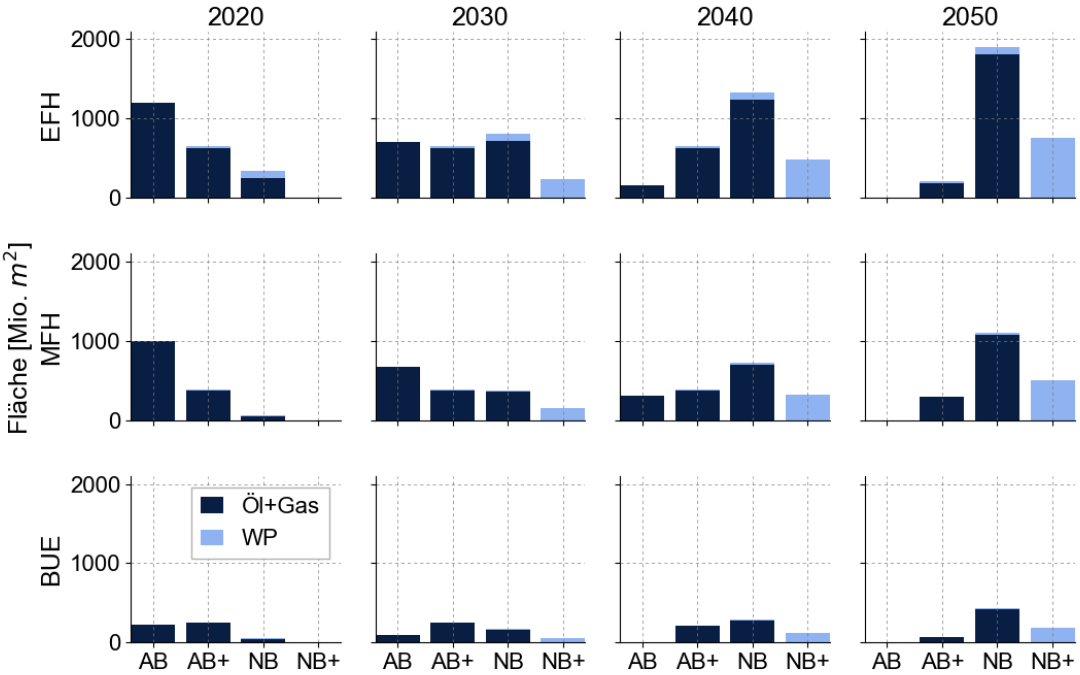


Abbildung 4.3 Gebäudeentwicklung für das Basisszenario

Die Entwicklung der Gebäude- und Anlagenkonfigurationen für die Stützjahre 2020, 2030, 2040 und 2050 für die Gebäudetypen ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Ausgehend vom Gebäudebestand 2020 gehören durch Abriss, Neubau und Sanierung der Großteil der Gebäude im Jahr 2050 zu den Energieeffizienzkategorien Neubau und Neubau+. Aufgrund der höheren Investitions- und Energiekosten für Wärmepumpen wird bei der Sanierung weiterhin auf Öl und Gasheizungen gesetzt. Beim Neubau werden wie vorgegeben Gebäude der Energiestandard Neubau+ mit Wärmepumpen installiert.

4.3.2 Gebäudeentwicklung im Szenario „Wärmepumpe“

Im Szenario „Wärmepumpe“ wird vorgegeben, dass bei allen Sanierungen und Neubauten eine Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden muss. Dem entsprechend ist in diesem Szenario im Jahr 2050 der überwiegende Anteil der Heizungsanlagen mit Wärmepumpen ausgerüstet. Die Struktur der Gebäudealtersklassen entwickelt sich dabei analog zum Basisszenario.

Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung der Gebäude- und Anlagenkonfigurationen für die Stützjahre 2020, 2030, 2040 und 2050 in diesem Szenario.

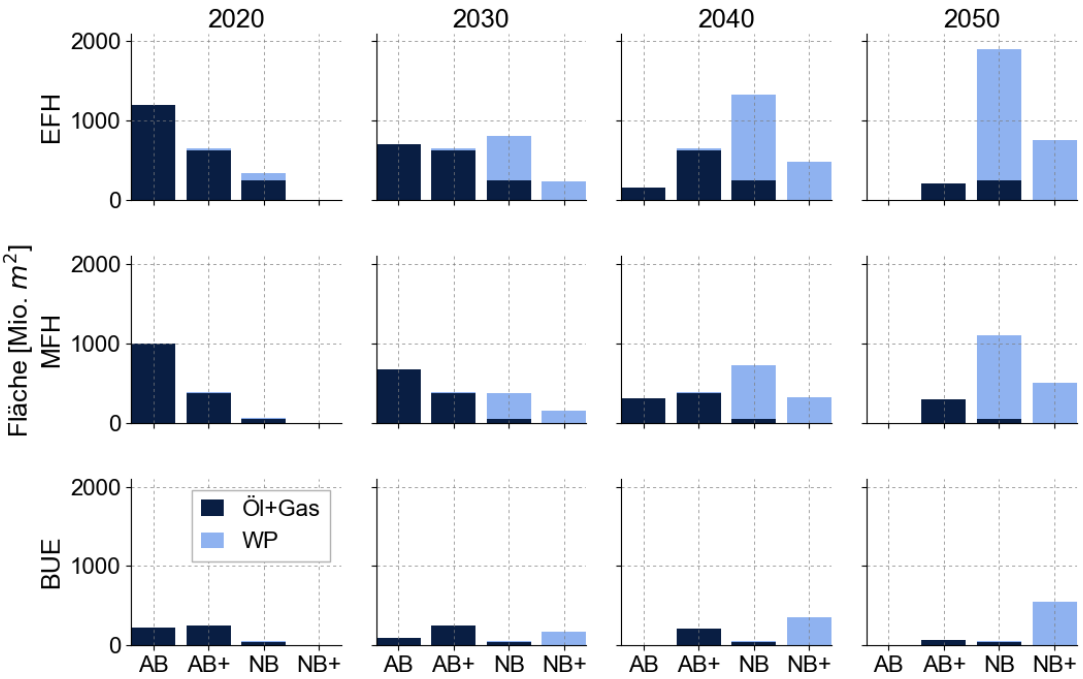


Abbildung 4.4 Gebäudeentwicklung für das Szenario „Wärmepumpe“

4.3.3 Gebäudeentwicklung im Szenario „Wärmepumpe Altbau“

Um den Einfluss der Gebäudesanierung auf die Ergebnisse zu untersuchen, wird das Szenario „Wärmepumpe Altbau“ betrachtet. Hier werden wird im Szenario „Wärmepumpe“ bei allen Sanierungen und Neubauten eine Wärmepumpe als Wärmeerzeuger eingesetzt. Zusätzlich werden hier die Möglichkeiten der Gebäudesanierung eingeschränkt. Die einzige zulässige bauliche Sanierung ist hier der Übergang von Energiestandard Altbau zu Altbau+ (s. Abbildung 4.5). Für alle anderen Gebäudetypen besteht eine Sanierung lediglich aus dem Einsatz einer Wärmepumpe als neuen Wärmeerzeuger. Damit ergibt sich die in Abbildung 4.6 dargestellte Gebäudeentwicklung, in der Gebäude des Energiestandards Altbau+ den größten Anteil ausmachen.

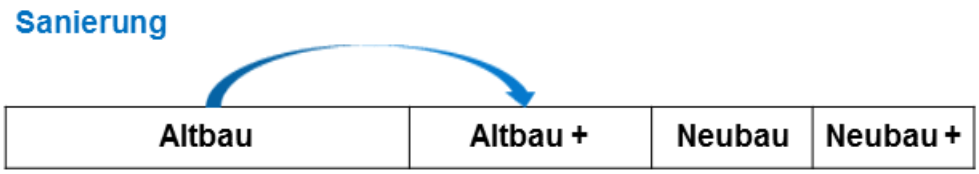


Abbildung 4.5 Zulässige Pfade der Gebäudesanierung für Szenario „Wärmepuimpe Altbau“

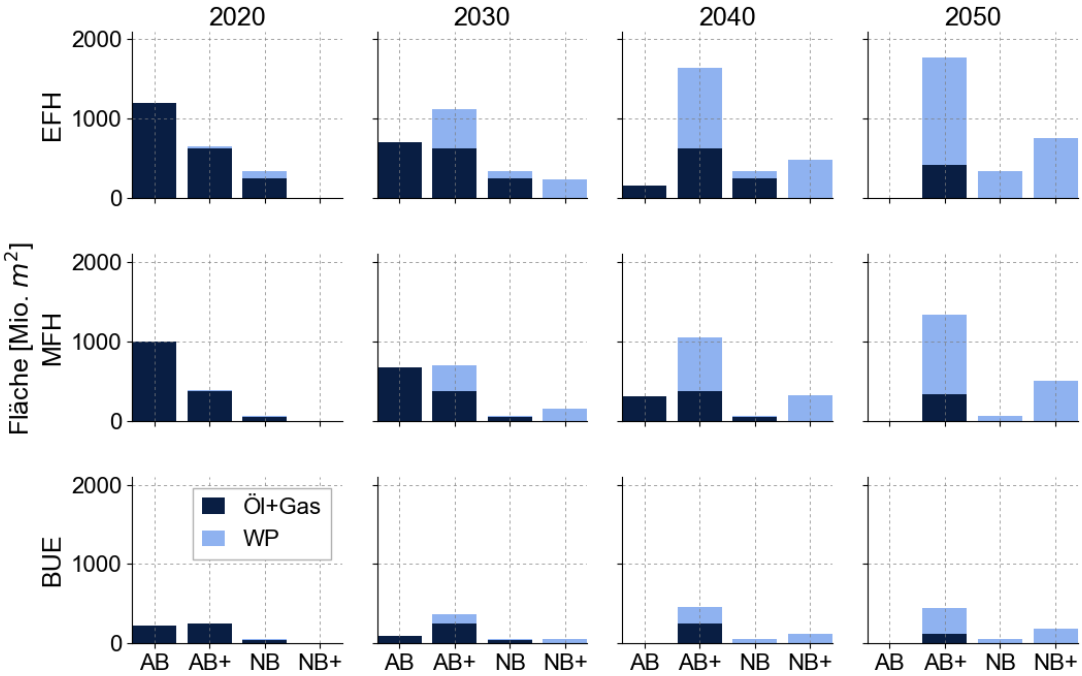


Abbildung 4.6 Gebäudeentwicklung für das Szenario „Wärmepumpe Altbau“

4.3.4 Elektrische Gebäudelastgänge der betrachteten Szenarien

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, kann aus der Entwicklung des Gebäudebestands und der jeweiligen Einzellastgänge der Gebäude der gesamte elektrische Gebäudelastgang für die Stützjahre 2020, 2030, 2040 und 2050 berechnet werden. Die Gebäudelastgänge der Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“ sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Ausgehend von dem gleichen Bestand und Lastgang, erhöht sich dabei der Bedarf elektrische Energie im Szenario „Wärmepumpe“ durch den vorgegebenen Ausbau von Wärmepumpen deutlich im Vergleich zum Basisszenario. Der Bedarf im Szenario „Wärmepumpe Altbau“ ist aufgrund des höheren Wärmebedarfs der älteren Gebäude am größten. Die Auswirkung dieser unterschiedlichen Bedarfsprofile auf das Stromsystem wird im Folgenden untersucht.

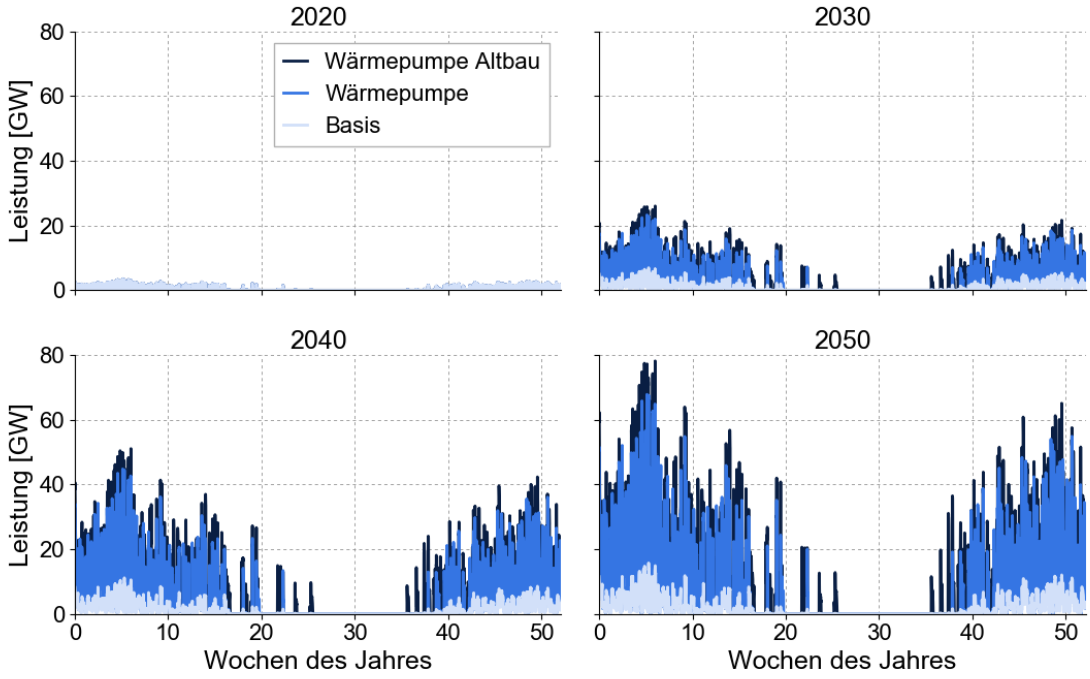


Abbildung 4.7 Gesamter Gebäudelastgang der Stützjahre für die Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“

4.4 Szenarien „ohne Heiz“ und „mit Heiz“

In einer ersten Untersuchung werden zwei Szenarien verglichen, denen keines der o.g. Sanierungsszenarien zu Grunde liegt. Im Szenario „ohne Heiz“ wird von einer Entwicklung des Stromsystems mit geringer Kopplung zwischen Stromsektor und Wärmesektor ausgegangen. Mit diesem Szenario werden die Ergebnisse des Szenarios „mit Heiz“, in welchem eine starke Kopplung der beiden Sektoren angenommen wird, ver-

glichen. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in erster Linie in der Zunahme der Stromnachfrage bis 2050. Im Szenario „ohne Heiz“ wird von einer geringen jährlichen Nachfrage von 14,1 TWh elektrischer Energie für Raumwärme ausgegangen. Für den gesamten Betrachtungszeitraum wird eine konstante jährliche Nachfrage angenommen.

Im Szenario „mit Heiz“ wird die jährliche Nachfrage aus der Nachfrage des Basis-Szenarios plus der Entwicklung der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung zusammengesetzt. Auch in diesem Szenario wird für den Betrachtungszeitraum von einem Sockelbedarf von 552 TWh je Jahr ausgegangen. Durch die hier angenommene Sektorkopplung entwickelt sich die Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung von 14,1 TWh im Jahr 2015 zu 160 TWh im Jahr 2050, was in etwa 30 % der aktuellen Stromnachfrage entspricht. Durch die Zunahme der Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 steigen auch die absoluten Zahlen der gesetzten Erzeugung aus EE- und KWK-Anlagen entsprechend an.

Die beiden Szenarien sind noch unabhängig von den Sanierungspfaden, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben wurden.

4.5 Szenarien „Wärmepumpe – nicht optimiert“ und „- optimiert“

In einem weiteren Vergleich werden die Sanierungspfade aus Kapitel 4.3 aufgegriffen. Die hier verglichenen Szenarien basieren auf der Sanierung der Gebäude, wie sie im Szenario Wärmepumpe beschrieben ist. Mit dieser Annahme steigt die Nachfrage an Strom für die Wärmeerzeugung von ca. 4 TWh im Jahr 2015 auf ca. 65 TWh im Jahr 2050. Im Folgenden wird nun zwischen „nicht optimiert“ und „optimiert“ unterschieden.

Im Szenario „Wärmepumpe – nicht optimiert“ wird die Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung unverändert auf eine Sockelnachfrage von 552 TWh für die allgemeine Stromnachfrage addiert. Verglichen wird nun mit dem Szenario „Wärmepumpe – optimiert“, in dem der Stromnachfrage für die Wärme eine gewisse Flexibilität unterstellt wird. Diese Flexibilität wird durch die Möglichkeit der Verschiebung von 25 % des täglichen Mittelwertes der Nachfrage innerhalb dieses Tages und einer Optimierung auf einen Strompreis abgebildet.

Abbildung 4.8 zeigt die Stromnachfragen und den Strompreisverlauf für eine beispielhafte Woche im Jahr 2050. Grau ist dabei die allgemeine Stromnachfrage dargestellt, grau gestrichelt die Residuallast, schwarz gestrichelt der Verlauf des Strompreises.

Die Residuallast ist die Differenz aus Stromnachfrage und Erzeugung aus erneuerbaren Energien. Sie muss durch den Einsatz konventioneller Kraftwerke gedeckt werden. Neben der Höhe der Nachfrage ist auch das Angebot an erneuerbaren Energien ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Höhe des Strompreises. Daher kann nicht direkt davon ausgegangen werden, dass eine geringere Nachfrage auch zu einem geringeren Strompreis führt. Dieser Zusammenhang besteht eher zwischen Residuallast und Strompreis. Der Strompreisverlauf ist eher stufig als kontinuierlich, was dem betrachteten Jahr 2050 und dem dann existierenden Kraftwerkspark geschuldet ist. Bis dahin wird die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ohne anfallende Brennstoffkosten oder eher kostenintensiven Gas- bzw. GuD-Kraftwerken übernommen. Kann die Stromnachfrage aufgrund des fehlenden Dargebots nicht durch EE gedeckt werden, muss ein teureres gasbefeuertes Kraftwerk die Erzeugung übernehmen. Das bewirkt Sprünge in der Strompreiskurve.

Die rote Linie zeigt den Verlauf der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung im Szenario „nicht optimiert“, die grüne Linie den Verlauf im Szenario „optimiert“. Basis für die optimierte Nachfrage ist die nicht optimierte Nachfrage. Für jeweils einen Tag muss die Gesamtnachfrage gleich bleiben, es können aber stündlich bis zu 25 % des Tagesmittelwertes innerhalb eines Tages verschoben werden. Die Verschiebung der Nachfrage wird auf den gegebenen Strompreis wirtschaftlich optimiert.

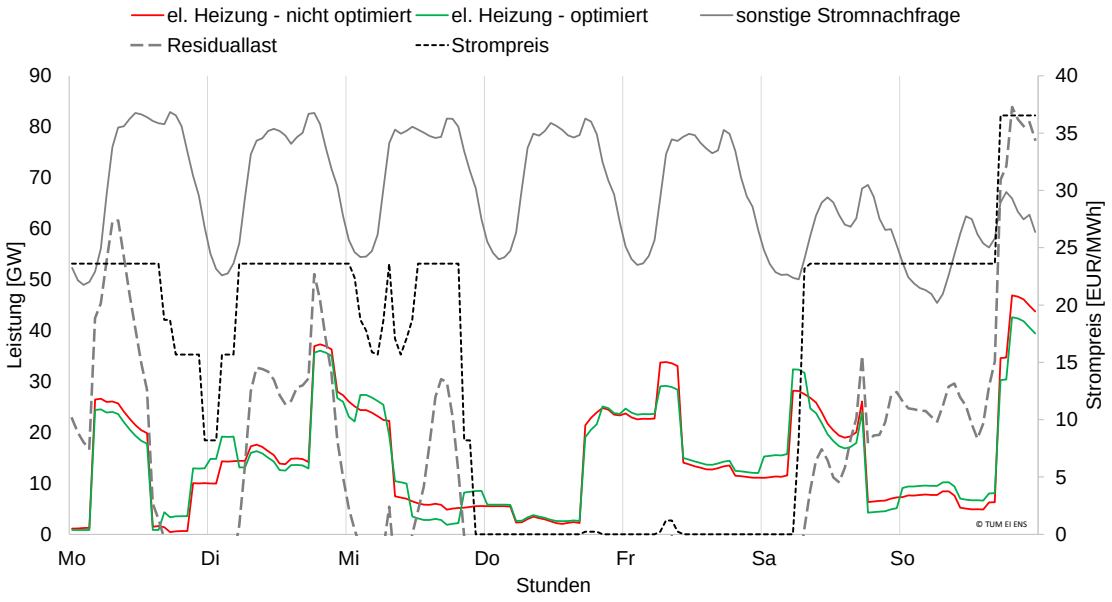


Abbildung 4.8 Prinzipdarstellung der Nachfrageanpassung im Szenario "Wärmepumpe - optimiert"

4.6 Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“

In dieser Betrachtung werden die in Kapitel 4.3 beschriebenen Szenarien miteinander verglichen. Das Szenario „Wärmepumpe“ entspricht dem bereits in Kapitel 4.5 beschriebenen Szenario „Wärmepumpe – optimiert“. Analog dazu werden die beiden zusätzlichen Szenarien im folgenden Vergleich auch „optimiert“ betrachtet, d. h. auch sie besitzen die Möglichkeit, 25 % des jeweiligen Tagesmittelwertes jede Stunde verschieben zu können.

Die Szenarien unterscheiden sich neben dem Lastprofil (s. Kapitel 4.3.4) besonders in der Entwicklung der jährlichen Gesamtstromnachfrage zur Wärmeerzeugung über den Betrachtungszeitraum von Jahr 2020 bis 2050. Es wird vereinfachend von einem linearen Anstieg in den Jahren zwischen den Stützjahren ausgegangen. Da die Betrachtung im Energiesystemmodell ab dem Jahr 2015 erfolgt, wird für die Jahre 2015 bis 2020 eine gleich bleibende Nachfrage mit dem Niveau von 2020 angenommen. Abbildung 4.9 zeigt diese Entwicklung grafisch für die drei betrachteten Szenarien.

Die Sockelnachfrage beträgt in allen dreien Szenarien ebenfalls 552 TWh. Daraus resultiert in Szenario „Basis“ eine Gesamtnachfrage im Jahr 2050 von 568,2 TWh; in Szenario „Wärmepumpe“ von 617,4 TWh und in Szenario „Wärmepumpe Altbau“ von 670,1 TWh im Jahr 2050.

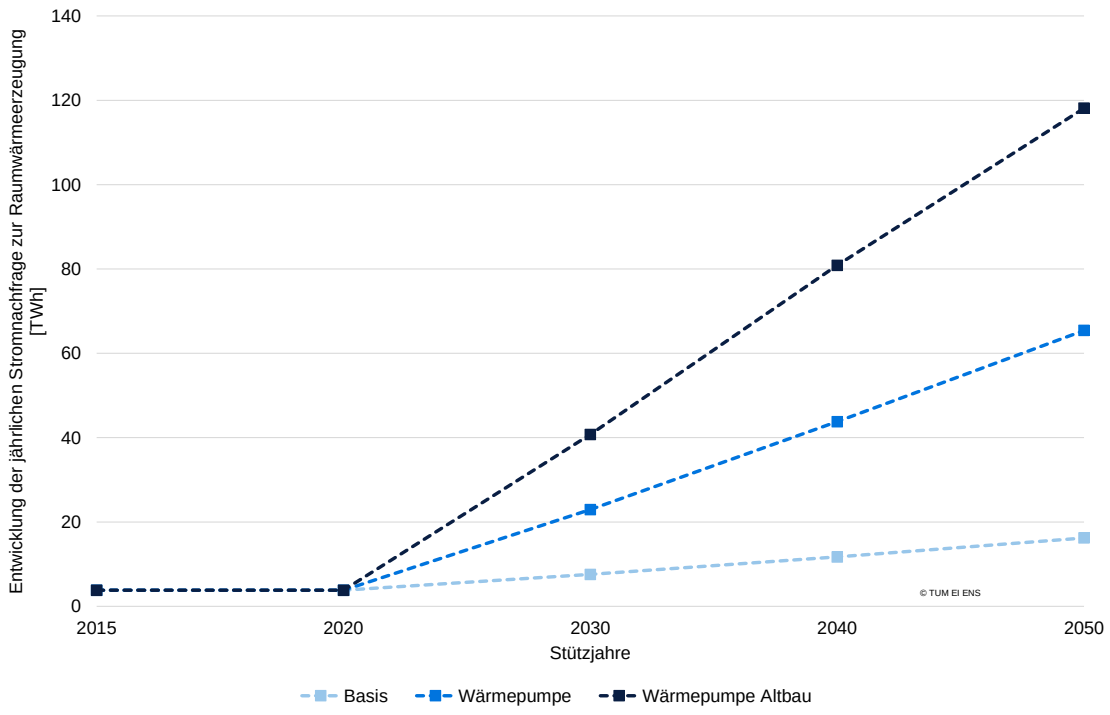


Abbildung 4.9 Entwicklung der Stromnachfrage zur Raumwärmeerzeugung über den Betrachtungszeitraum

5 Ergebnisdarstellung

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die Ergebnisse des Stromsystemmodells nach Berechnung der in den Kapiteln 4.4 und 4.5 beschriebenen Szenarien dargestellt und diskutiert.

5.1 Szenarien „ohne Heiz“ und „mit Heiz“

In diesem Kapitel werden die Szenarien aus Kapitel 4.4 analysiert. Die Ergebnisse sind in [21] veröffentlicht. Die Ergebnisse in diesem Kapitel 5.1 und seinen Unterkapiteln wurde bereits im Februar 2017 veröffentlicht und sind daher direkt [21] entnommen. Abbildung 5.7 wurde zu einem besseren Verständnis in der Darstellung und Beschreibung erweitert.

5.1.1 Ergebnisse im Szenario „mit Heiz“

Die grundlegende Entwicklung im Szenario „Heiz“ wird anhand des Zubaus von Kraftwerken, der Entwicklung der Zusammensetzung der Stromerzeugung und der Speichernutzung dargestellt.

5.1.1.1 Zubau von Kraftwerken

Der Zubau von konventionellen Kraftwerken ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums werden kostengünstige Grundlastkraftwerke gebaut, welche den Wegfall der Kernkraftwerke kompensieren. Obwohl die Investition in Braunkohlekraftwerke die wirtschaftlichere Option wäre, werden auch Steinkohlekraftwerke gebaut, was auf die Begrenzung der zur Verfügung stehenden Braunkohle zurückzuführen ist. Neben Kohlekraftwerken werden sowohl in Kraftwerkskapazität von GuD- als auch GT-Kraftwerken investiert. Die GuD-Kraftwerke werden aufgrund ihrer Effizienz und bedingt durch den steigenden CO_2-Zertifikatspreis bevorzugt zur Stromerzeugung herangezogen. Die Gasturbinen-Kraftwerke sind günstiger in der Investition und werden hauptsächlich aus Gründen der Systemzuverlässigkeit zum Erreichen der gesicherten Leistung benötigt. In den Jahren vor 2045 werden weniger Kraftwerke gebaut. Dies ist auf die steigende, gesetzte Erzeugung aus erneuerbaren Energien und KWK zurückzuführen und bedeutet außerdem, dass genügend Kraftwerkskapazität installiert wurde, um den Kernenergieausstieg zu kompensieren. Ab dem Jahr 2045 müssen die zu Beginn des Betrachtungszeitraums errichteten GuD- und GT-Kraftwerke nach dem Erreichen ihrer Lebensdauer ersetzt werden.

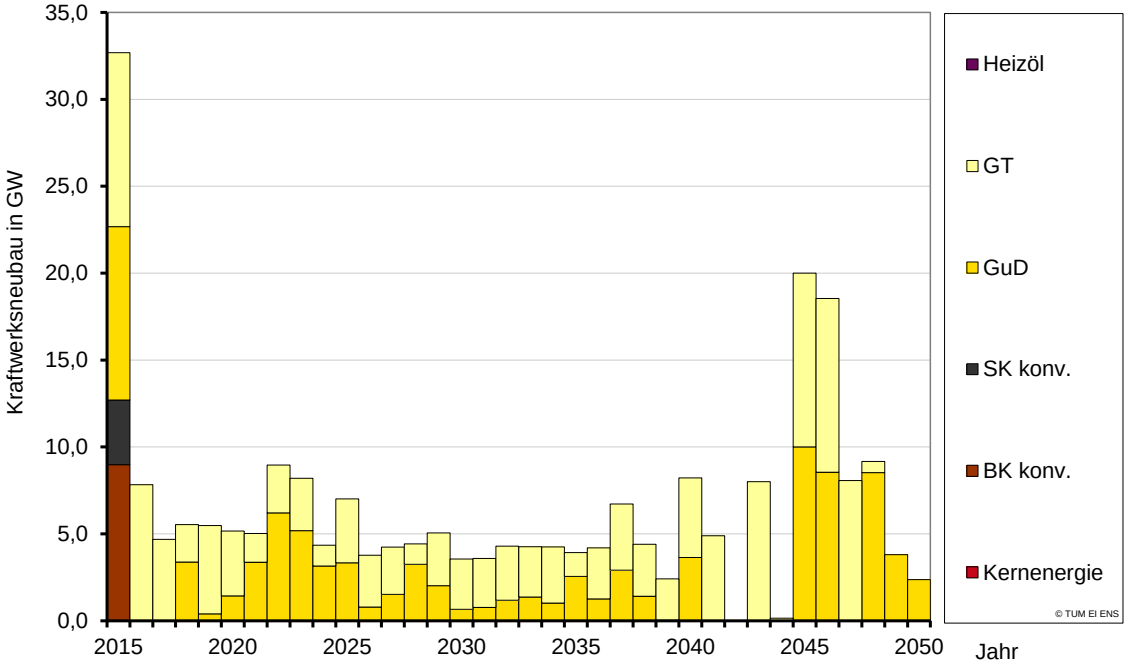


Abbildung 5.1 Entwicklung der neu installierten Kraftwerkskapazität im Szenario „Heiz"

5.1.1.2 Entwicklung der Stromerzeugung

In Abbildung 5.2 ist die Zusammensetzung der Stromerzeugung zur Deckung der Nachfrage für den Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2050 dargestellt. Gemäß Vorgabe übernehmen die erneuerbaren Energien und KWK bis 2050 den wesentlichen Teil der Stromerzeugung. Die konventionelle Stromerzeugung leisten bis dahin nur noch mit Gas befeuerte Kraftwerke, da die Einsetzbarkeit von Stein- und Braunkohle durch die Beschränkung im Modell im Jahr 2050 endet. Erkennbar ist auch der beschlossene Kernenergieausstieg mit der Stilllegung des letzten Kraftwerksblocks im Jahr 2022. Die Erzeugung der Kernenergie wird im Wesentlichen von Gas-und-Dampf (GuD) Kraftwerken übernommen.

5.1.1.3 Ausbau der Speicheranlagen

Abbildung 5.3 zeigt die Entwicklung der installierten Ladeleistung der drei zur Verfügung stehenden Technologien über den Betrachtungszeitraum. Der Zubau von Speichern erweist sich erst ab dem Jahr 2027 in Form von Pumpspeicherwerken (PSW) als wirtschaftlich sinnvoll. Aufgrund des begrenzten Ausbaupotenzials an Speicherkapazität von PSW geht die Ladeleistung im gesamten Betrachtungszeitraum nicht über 6,23 GW hinaus. Ab dem Jahr 2035 bzw. 2040 werden die Technologien AA-CAES und H_2-GuD gebaut. Im Jahr 2050 erreichen die installierten Ladeleistungen etwa 21 GW bzw. 17 GW. Im Jahr 2050 ist damit eine Gesamtladeleistung von knapp 45 GW installiert.

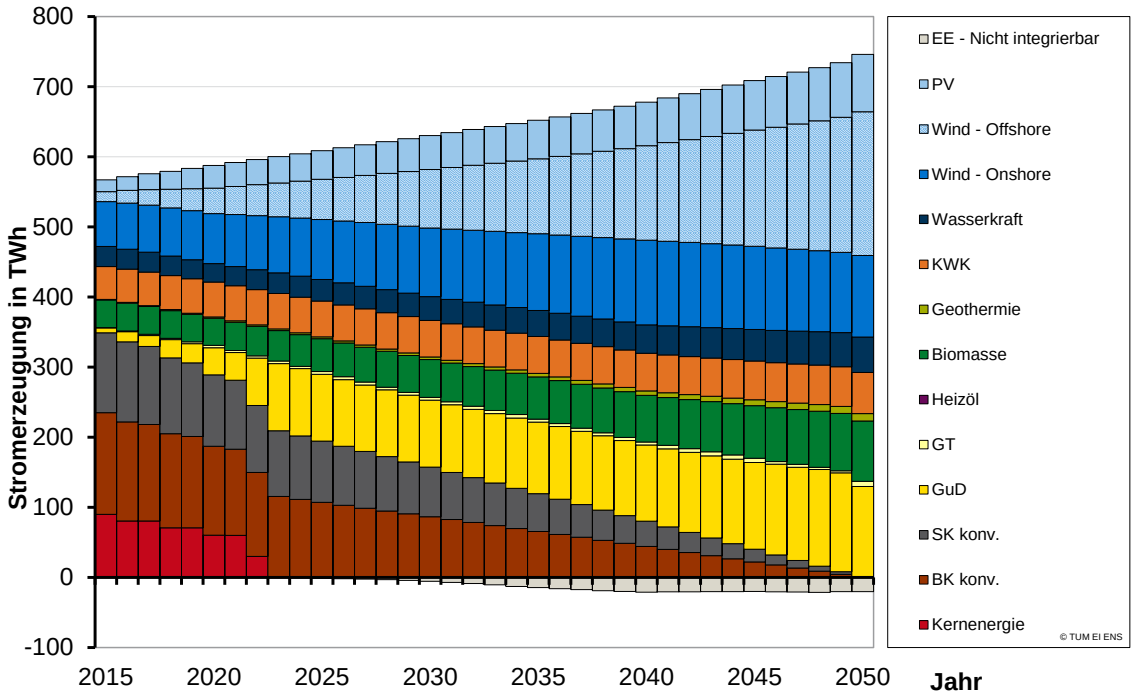


Abbildung 5.2 Stromerzeugung im Szenario "Heiz"

In Abbildung 5.4 ist der Ausbau der Entladeleistung der Speichertechnologien dargestellt. Für alle drei Technologien wird jeweils weniger Entladeleistung installiert als Ladeleistung. Um die variable Erzeugung aus EE mit z.T. recht hohen Rampen integrieren zu können, muss verhältnismäßig mehr Ladeleistung zur Verfügung stehen als Entladeleistung, da diese über längere Zeit geplant wieder ausgespeichert werden kann. Folglich wird im Jahr 2050 mit insgesamt 20 GW etwas weniger als die Hälfte der Ladeleistung als Entladeleistung installiert.

Die installierte Kapazität der Speichertechnologien ist in Abbildung 5.5 gezeigt. Für die PSW wird bereits im Jahr 2028 die vorgegebene Grenze von 40 GWh erreicht, was im Diagrammmaßstab nicht mehr aufgelöst wird. Für die Technologie AA-CAES werden knapp 0,5 TWh Speicherkapazität zugebaut, für H_2-GuD knapp 8,5 TWh. Bedingt durch die geringen Investitionskosten für Speicherkapazität der H_2-GuD-Technologie wird diese hohe Kapazität installiert, obwohl die geringe Effizienz der Elektrolyse in Verbindung mit einer Rückverstromung mittels GuD-Kraftwerken eine so starke Nutzung im ersten Moment nicht vermuten lassen würde.

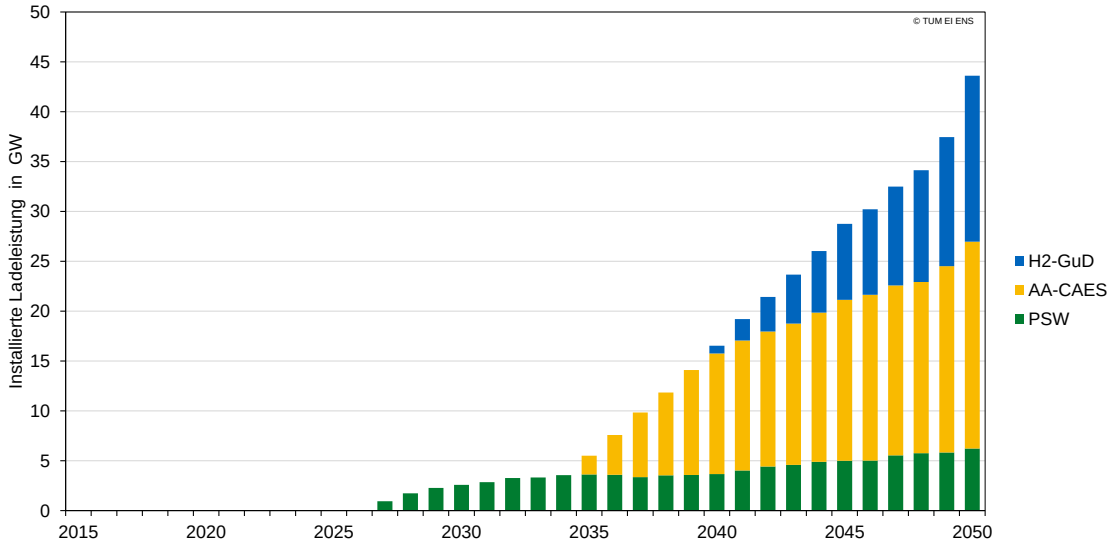


Abbildung 5.3 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherladeleistung im Szenario „Heiz"

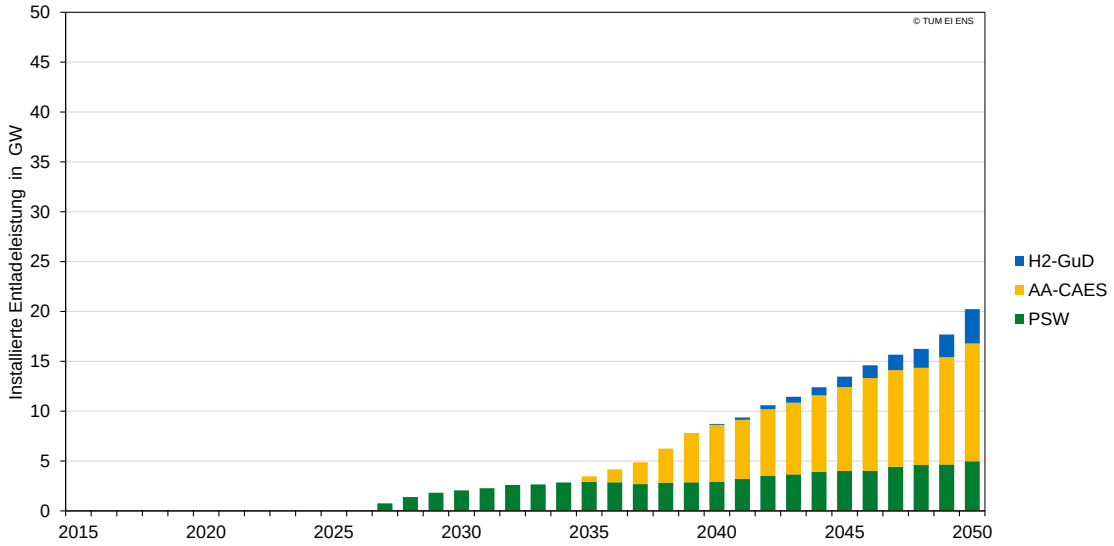


Abbildung 5.4 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherentladeleistung im Szenario „Heiz"

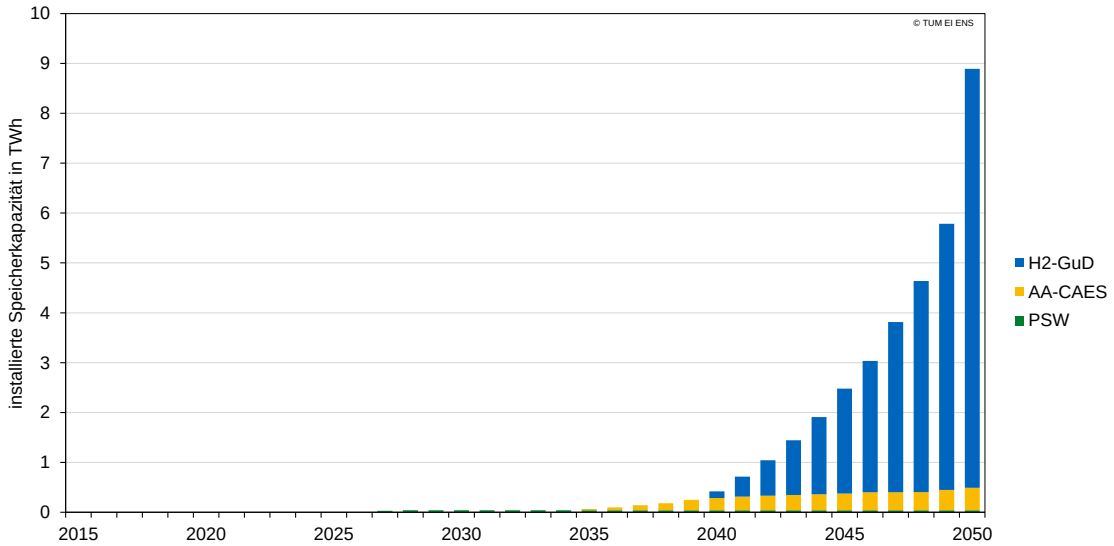


Abbildung 5.5 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherkapazität im Szenario „Heiz"

5.1.2 Vergleich der Szenarien

Die Szenarien „Basis“ und „Heiz“ starten im Jahr 2015 mit den gleichen Bedingungen und verändern sich erst im Laufe des Betrachtungszeitraums. Um den Einfluss adäquat untersuchen zu können, werden bei den folgenden Vergleichen primär die Unterschiede der beiden Szenarien dargestellt. Da sich die absoluten Werte bspw. der Erzeugung aus erneuerbaren Energien und KWK zwischen den Szenarien unterscheiden, können diese nicht direkt verglichen werden und es müssen entsprechende Bezugsgrößen für die Vergleiche herangezogen werden.

5.1.2.1 Stromerzeugung

Um die Zusammensetzung der Stromerzeugung für die zusätzliche Nachfrage im Szenario „Heiz“ zu veranschaulichen, ist diese in Abbildung 5.6 dargestellt.

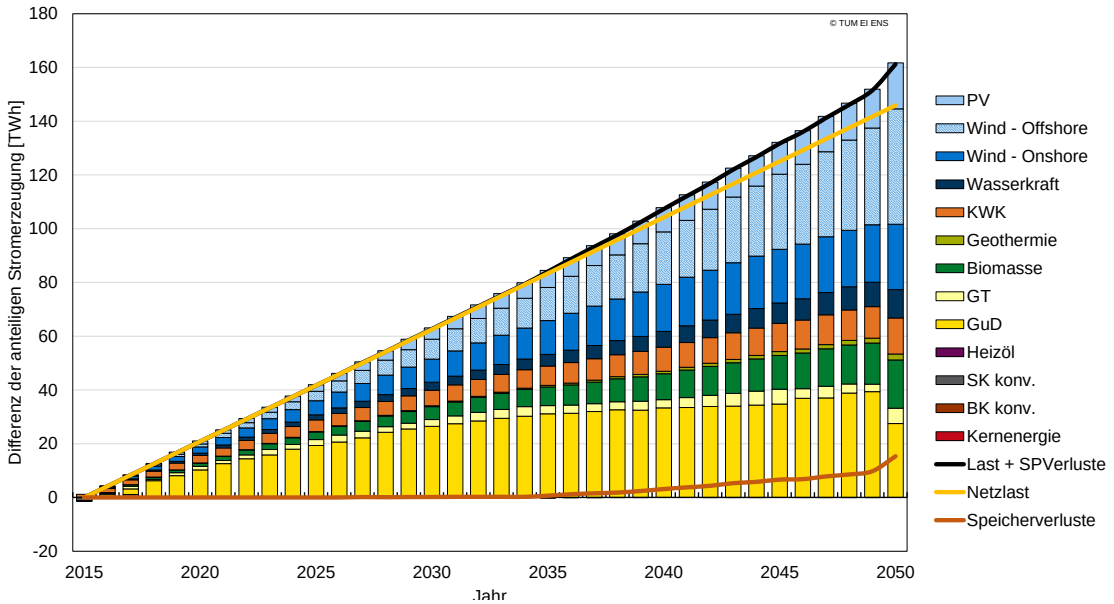


Abbildung 5.6 Zusammensetzung der Differenz der Stromerzeugung der Szenarien „ohne Heiz" und „mit Heiz"

Die zusätzliche Nachfrage (schwarze Linie) setzt sich aus der für die Raumwärme benötigte Energie (gelbe Linie) und der Zunahme an Speicherverlusten (orange Linie) zusammen. Diese Differenz in der Nachfrage wird zu etwa zwei Drittel aus gesetzter Einspeisung aus erneuerbaren Energien (EE) und zu etwa einem Drittel aus GuD- und GT-Kraftwerken und gesetzter Einspeisung aus KWK gedeckt. Von Jahr 2049 zu 2050 ist ein deutlicher Anstieg der Speicherverluste erkennbar. Dieser Anstieg ist auch in den Speicherinstallationen beim Wasserstoffspeicher in Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 zu sehen. Grund dafür ist zum einen der weitere Anstieg der gesetzten Einspeisung und vor allem der im Jahr 2050 vollzogene Kohleausstieg. 2050 muss demzufolge die günstigere Kohleerzeugung überwiegend durch teurere Erzeugung aus Gas-

kraftwerken ersetzt werden. Die Substitution der Erzeugung aus Erdgas durch eingespeicherte Energie aus EE ist aufgrund der höheren Betriebskosten attraktiver. Eine erhöhte Nutzung der Speicher ist daher wirtschaftlich, obwohl sich damit auch die Speicherverluste erhöhen.

5.1.2.2 Entwicklung der CO_2-Emissionen

Abbildung 5.7 zeigt die jährlichen CO_2-Emissionen der beiden Szenarien. Trotz dem Anstieg der Nachfrage um knapp 30 % erhöhen sich die Emissionen im Szenario „Heiz“ nicht im selben Maße. In beiden Szenarien ist nach 2022 ein kurzer Anstieg der Emissionen aufgrund des Kernenergieausstiegs erkennbar, da diese Erzeugung kurzfristig im Wesentlichen durch fossile Kraftwerke ersetzt wird. Zusätzlich zu den Emissionen für die Stromerzeugung sind die geschätzten die zu erwartenden Emissionen mit einer konventionellen Gasheizung aufgetragen, welche wesentlich höher sind als bei elektrischer Beheizung.

Die Emissionen der konventionellen Heizanlagen werden aus der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung über eine angenommene Arbeitszahl von 3,5, einen Wirkungsgrad der Gasheizung von 100 % und einem Emissionsfaktor für Erdgas von $201{,}2\,\frac{g}{kWh}$ [37] errechnet. Durch die Annahmen werden die Emissionen der konventionellen Gasheizung tendenziell unterschätzt.

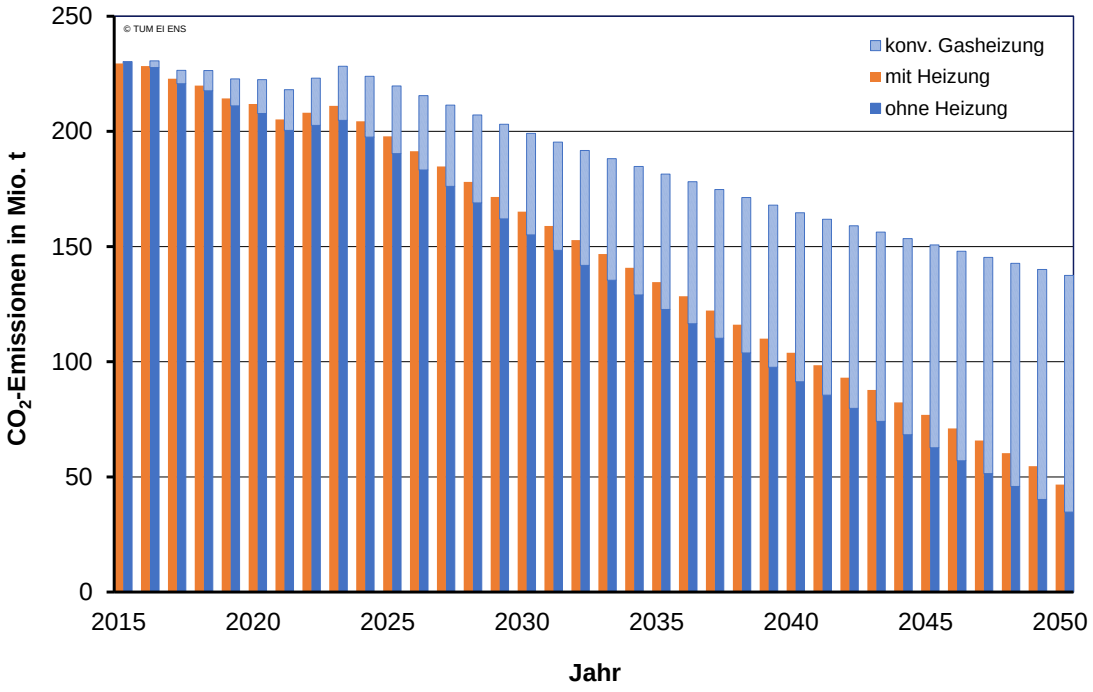


Abbildung 5.7 CO_2-Emissionen des Basis-Szenarios „ohne Heizung" und des Heiz-Szenarios „mit Heizung"

Abbildung 5.8 stellt die jährlichen spezifischen Emissionen des Basis-Szenarios und der zusätzlichen Nachfrage aus dem Heiz-Szenario bezogen auf die jeweilige Nachfrage dar. Die Berechnung der spezifischen Emissionen der zusätzlich für die Wärmeerzeugung und Speicherverluste zu deckende Nachfrage wird in nachfolgender Formel dargestellt.

$$emi_{Nachfrage+} = \frac{\sum_{zs=1}^{8760} EMI_{mit\ Heiz} - \sum_{zs=1}^{8760} EMI_{ohne\ Heiz}}{\sum_{zs=1}^{8760} d_{mit\ Heiz} - \sum_{zs=1}^{8760} d_{ohne\ Heiz}}$$

Für die Jahre des Betrachtungszeitraums wird die Differenz der Emissionen der beiden Szenarien auf die Differenz der Nachfrage der Szenarien bezogen. Verglichen wird dies in Abbildung 5.8 mit den jährlichen spezifischen Emissionen des Basis-Szenarios ohne Heizung. Im Jahr 2015 besteht noch keine zusätzliche Nachfrage für die Raumwärmeerzeugung, daher kann das Jahr nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Für die Jahre bis 2045 bleiben die spezifischen Emissionen der zusätzlichen Nachfrage unter denen der sonstigen Nachfrage. Erst in den letzten 5 Jahren ist die Nachfrage für Raumwärme stärker mit Emissionen belastet als die Referenznachfrage. Dies ist auf den verstärkten Einsatz von GT-Kraftwerken mit höheren spezifischen CO_2-Emissionen im Vergleich zu GuD-Kraftwerken zurückzuführen. Bereits im Jahr 2017 wird die Erzeugung zu einem überdurchschnittlich hohen Teil aus GT-Kraftwerken gedeckt, wodurch die spezifischen Emissionen deutlich höher als in den sonstigen Jahren sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wärmeerzeugung aus Strom überdurchschnittlich stark aus erneuerbaren Energien gedeckt wird.

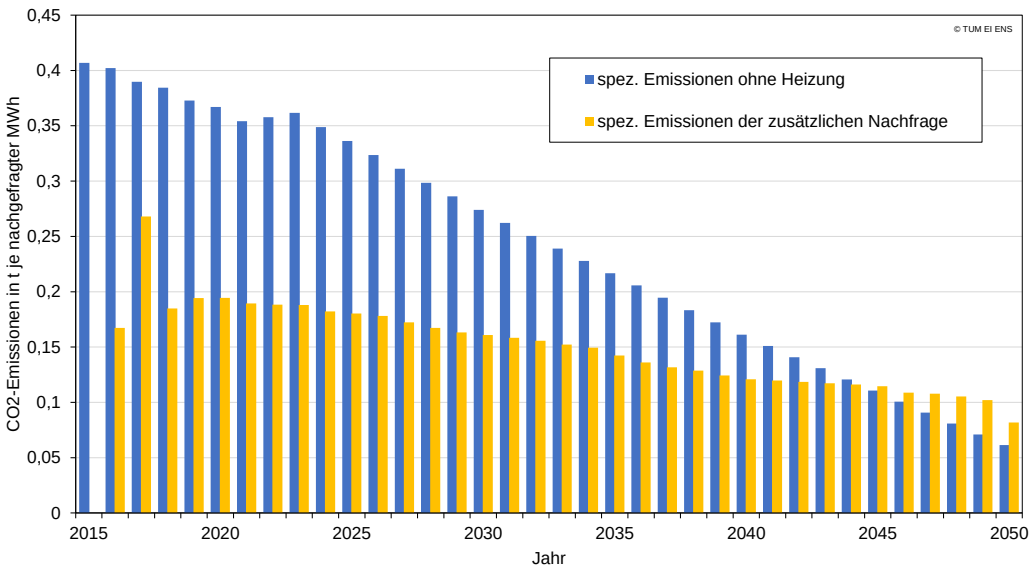


Abbildung 5.8 spezifische CO_2-Emissionen des Basis-Szenarios und der zusätzlichen Nachfrage des Szenarios Heiz" gegenüber dem Basis-Szenario

5.1.2.3 Ausbau und Einsatz von Speichertechnologien

Der Vergleich der installierten Lade- und Entladeleistung und der Speicherkapazität zwischen den beiden Szenarien kann nur durch Bezug auf die installierte Leistung der erneuerbaren Energien bzw. der von ihnen erzeugten und integrierten Energie sinnvoll hergestellt werden. Abbildung 5.9 stellt diesen Vergleich exemplarisch für das Jahr 2050 grafisch dar. Sowohl die bezogenen Leistungen als auch die Kapazität nehmen deutlich zu gegenüber dem Szenario ohne Heizung. Die Speicherkapazität mit Heizung ist mehr als doppelt so groß.

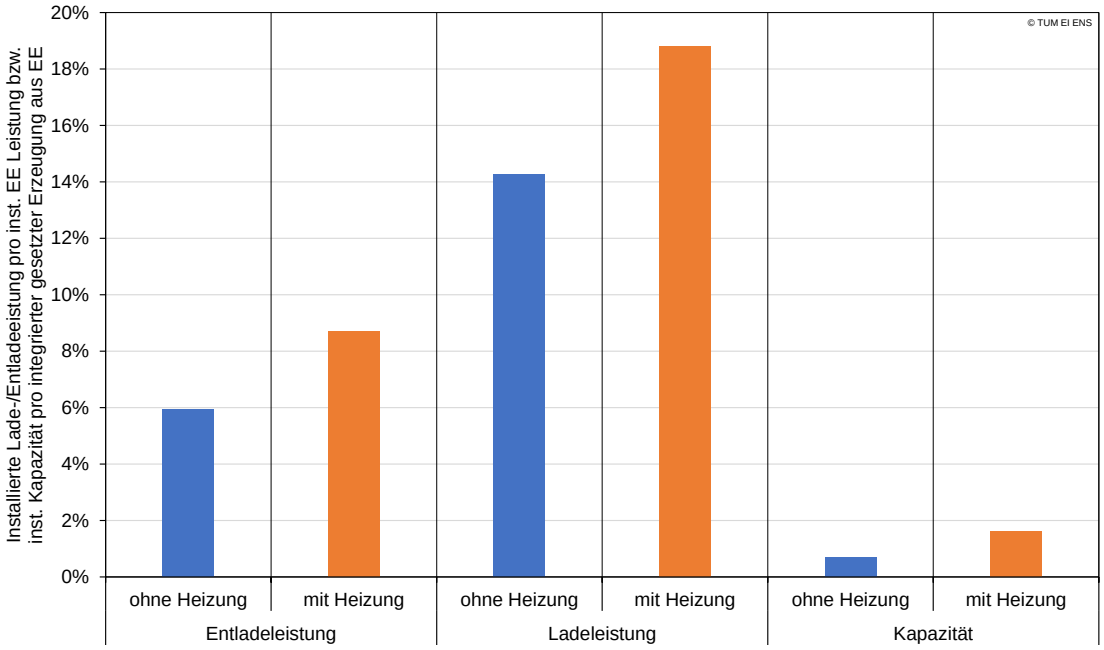


Abbildung 5.9 Spezifische Leistungen und Kapazität der Speicher im Basis-Szenario „ohne Heizung" gegenüber dem Heiz-Szenario „mit Heizung" für das Jahr 2050

Um diese Entwicklung besser zu verstehen, wird das Verhalten der H_2-GuD-Speicher in Abbildung 5.10 verglichen. Im Szenario ohne Heizung werden die Speicher in der ersten Hälfte des Jahres für mittelfristige Speichervorgänge verwendet, bei denen die Nutzung zwischen dem Maximum der Kapazität von 2,6 TWh und knapp unter 2,0 TWh schwankt. Im Sommer wird die Speichertechnologie stärker entladen bis etwas unter 1 TWh Kapazität. Es ist also insgesamt ein eher saisonales Verhalten erkennbar mit Verschiebung der Energie vom Winter in den Sommer.

Gegensätzlich dazu verhalten sich die Wasserstoffspeicher im Szenario mit Heizung. Die wesentliche Ausspeicherung wird etwa zwischen Oktober und Ende Dezember und zwischen Mitte Januar und Ende April vorgenommen. Anschließend werden die Speicher über den Sommer wieder geladen. Die zur Verfügung stehende und genutzte Kapazität entspricht mehr als dem Dreifachen verglichen mit dem Szenario ohne Heizung.

Das komplementäre Verhalten liegt im Dargebot der variierenden EE und in den Unterschieden der Lastgänge der beiden Szenarien im Jahr 2050 begründet. Im Winter besteht ein erhöhtes Angebot an Stromerzeugung aus Wind, im Sommer aus Solarstrahlung. Im Szenario ohne Heizung ist es wirtschaftlich einen Teil der aus Wind erzeugten Energie zur Nachfragedeckung im Sommer heranzuziehen. Durch den Strombedarf für die Wärmeerzeugung steigt die Nachfrage im Winter sehr stark an. Im Sommer bleibt sie dagegen annähernd gleich wie im Szenario ohne Heizung. Es ist daher im Szenario „Heiz“ wirtschaftlicher, die im Sommer zur Verfügung stehende Energie aus Photovoltaikanlagen in den Winter zu verschieben, um die Stromerzeugung aus im Einsatz teuren GT- und GuD-Kraftwerken zu reduzieren.

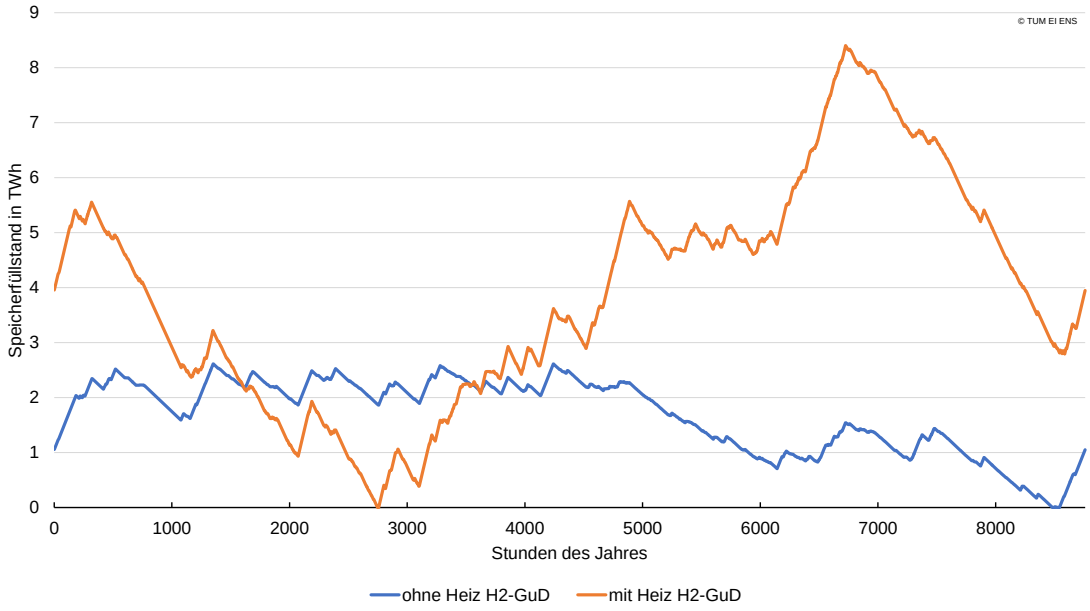


Abbildung 5.10 Verlauf des Speicherfüllstandes des H_2-GuD-Speichers für die Szenarien „Basis" und „Heiz" im Jahr 2050

5.2 Szenarien „Wärmepumpe – optimiert / nicht optimiert

Die Ergebnisse der Szenarien „Wärmepumpe – optimiert / nicht optimiert“ können aufgrund sich unterscheidender Annahmen bezüglich der Entwicklung bis zum Ende des Betrachtungszeitraums nicht mit den Szenarien „ohne / mit Heiz“ verglichen werden. Es werden folglich nur die Ergebnisse des Stromsystemmodells vor und nach der Optimierung der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung auf den Strompreis verglichen.

Abbildung 5.11 zeigt die Unterschiede in der Zusammensetzung der Stromerzeugung zur Deckung der Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung der beiden verglichenen Szenarien. Die Stromerzeugung im Szenario „nicht optimiert“ wird auf der negativen

Hochwertachse dargestellt, das Szenario „optimiert“ auf der positiven Seite der Achse. In den ersten 5 Jahren des Betrachtungszeitraums ist kein eindeutiger Trend für Substitutionen zwischen den Szenarien erkennbar. Ab dem Jahr 2020 ist ein leichter Trend dahin erkennbar, dass GT-Kraftwerke durch effizientere und emissionsärmere GuD-Kraftwerke ersetzt werden. Ab etwa dem Jahr 2028 und wieder 2045 bis 2048 ist eine zunehmende Substitution der GT-Kraftwerke durch erneuerbare Energien (EE) erkennbar. In den Jahren 2035 bis 2044 und wieder 2049/2050 werden im „optimiert“-Szenario mehr GuD-Kraftwerke im Gegensatz zu GT-Kraftwerken und EE im „nicht optimiert“-Szenario zur Stromerzeugung eingesetzt. Um die EE integrieren zu können, müssen mehr Speicher eingesetzt werden, was zu einem Anstieg der Speicherverluste (hellbraun gestrichelte Linie) führt. In diesen Jahren scheint es für das Gesamtsystem für eine gewisse Nachfragedeckung nicht wirtschaftlich zu sein, Speicheranlagen mit Verlusten zu nutzen um EE zu integrieren.

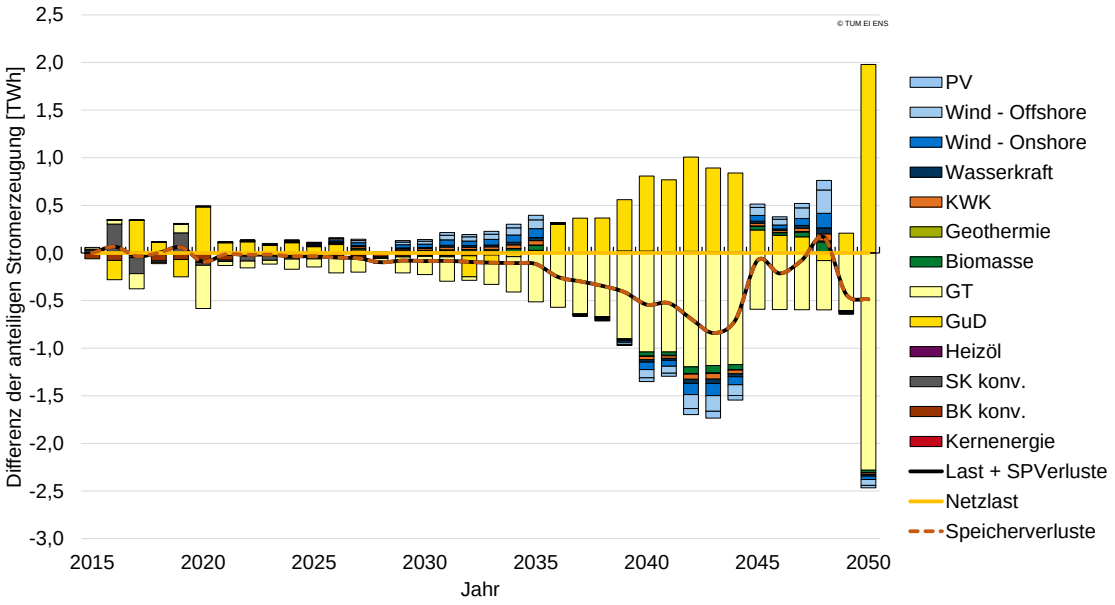


Abbildung 5.11 Unterschiede in der Stromerzeugung zwischen den Szenarien "nicht optimiert" und "optimiert"

Abbildung 5.12 stellt die Unterschiede in der Stromerzeugung summarisch über den Betrachtungszeitraum dar. „Gesamt“ zeigt dabei die Netto-Bilanz aus den beiden einzelnen Szenarien, die daneben dargestellt sind. Über den gesamten Betrachtungszeitraum wird durch eine Optimierung der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung ein Teil der Erzeugung durch Einsatz von effizienteren GuD-Kraftwerken übernommen. Speicherverluste können durch einen geringeren Einsatz der Anlagen reduziert werden und die Integration von mehr elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen wird ermöglicht.

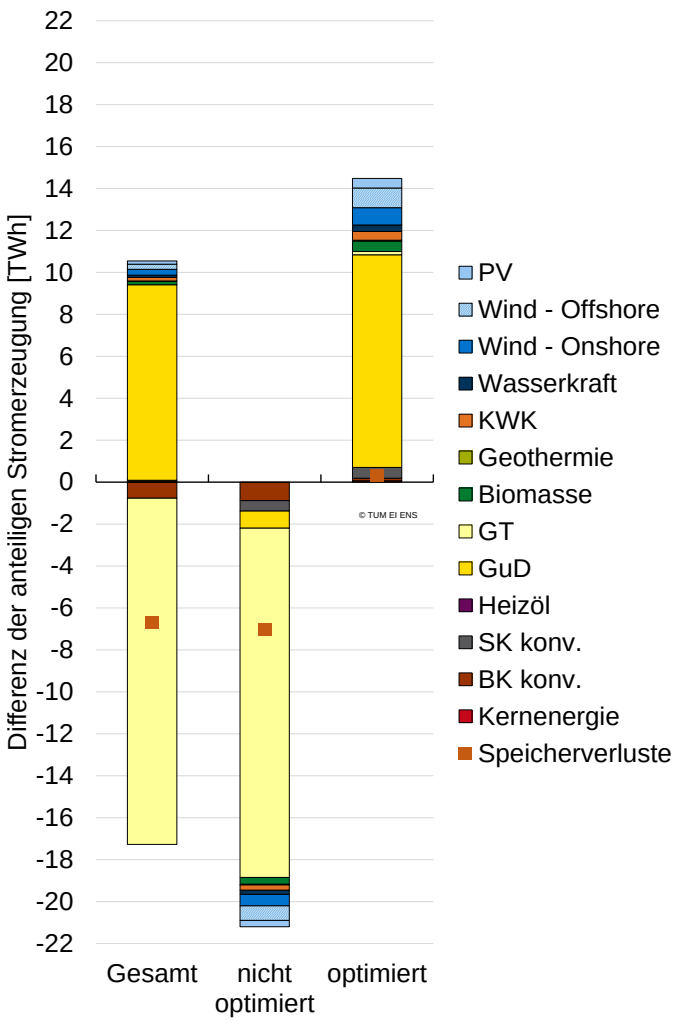


Abbildung 5.12 Summarische Darstellung der Unterschiede in der Stromerzeugung zur Deckung der Wärmenachfrage

In der Gegenüberstellung der auf die installierte Leistung der EE bezogenen Lade- und Entladeleistungen der Speicheranlagen bzw. der auf die integrierte Energie aus EE bezogenen installierten Speicherkapazität zwischen den beiden Szenarien „nicht optimiert“ und „optimiert“ wird die Reduktion der Speicherinvestitionen ersichtlich (Abbildung 5.13). Die Investition in Kraftwerksleistung unterscheidet sich nur insofern, als dass ein Teil der Investition in GT-Anlagen durch Investition in GuD-Anlagen ersetzt wird. Das lässt den Rückschluss auf eine effizientere Nutzung der GuD-Anlagen im Szenario „optimiert“ zu.

In Abbildung 5.14 ist das Verhalten der Saisonalspeicher im Jahr 2050 dargestellt. Die beiden Szenarien unterscheiden sich im grundsätzlichen Verlauf über das Jahr nicht. In beiden Fällen wird tendenziell von den Sommermonaten in die Wintermonate verschoben, da hier die Nachfrage durch die elektrische Wärmeerzeugung erhöht ist. Der Unterschied besteht in der Amplitude der Füllstände, was auf den unterschiedlichen Speicherausbau in den beiden Szenarien zurückzuführen ist.

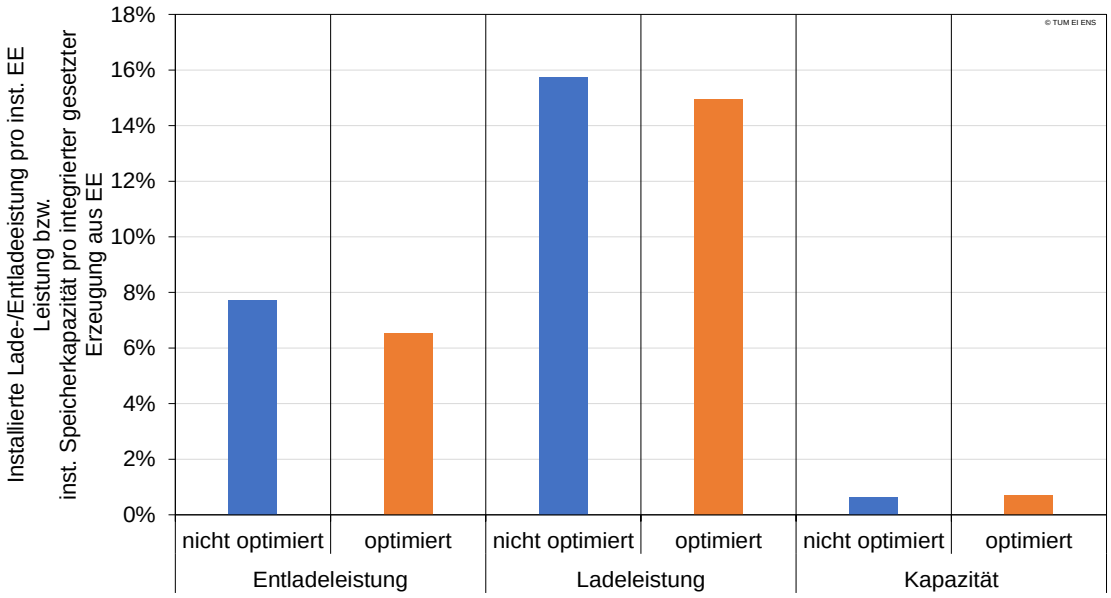


Abbildung 5.13 Vergleich der Speicherinvestitionen nach Entladeleistung, Ladeleistung und Kapazität

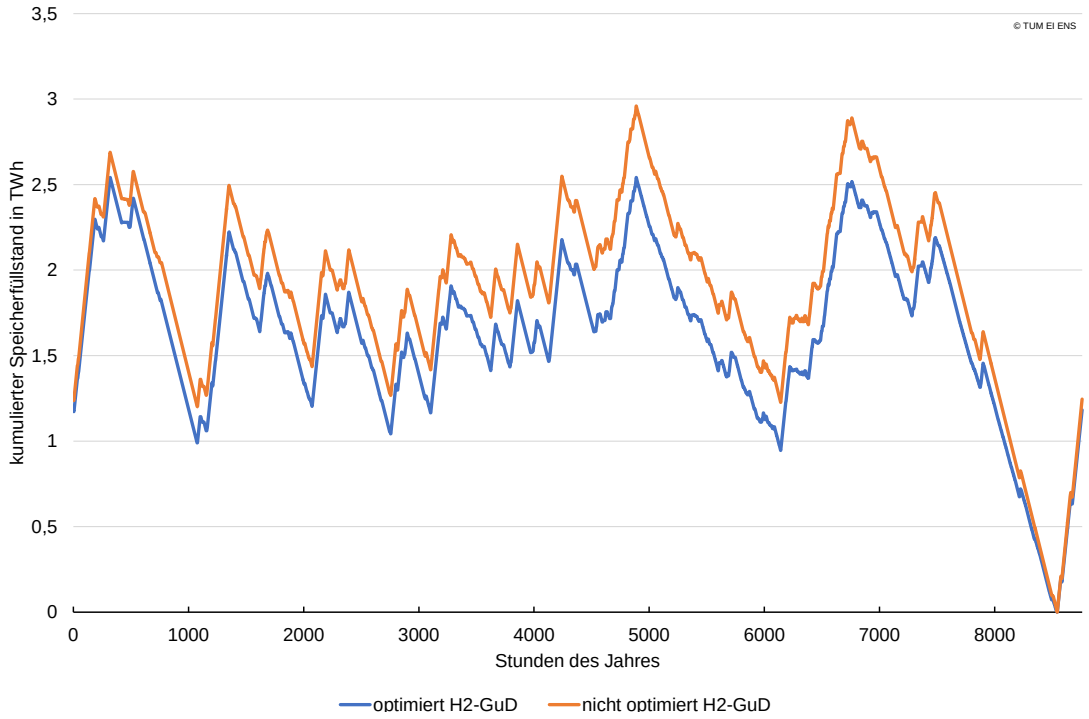


Abbildung 5.14 Vergleich des Speicherstands der Saisonalspeichertechnologie im Jahr 2050

5.3 Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“

Bei Betrachtung der Ergebnisse werden im Folgenden die Szenarien mit Wärmepumpe jeweils mit dem Basis-Szenario verglichen. Sowohl für das Szenario „Wärmepumpe“ als auch „Wärmepumpe Altbau“ gilt, dass die zusätzliche Stromnachfrage für die Wärmepumpen zu einem Großteil aus erneuerbaren Energien gedeckt werden kann. In allen drei Szenarien entspricht der Anteil an zur Integration zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien 80 % im Jahr 2050.

Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, ist in Abbildung 5.15 der nicht integrierbare Anteil EE an den zur Verfügung stehenden EE prozentual für das Jahr 2050 aufgetragen. Bei zunehmender Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung sinkt der Anteil an nicht integrierbaren EE, was einer steigenden Nutzung der verfügbaren EE entspricht. Im Basis-Szenario werden knapp 4 % des verfügbaren erneuerbaren Stroms nicht genutzt, im Szenario „Wärmepumpe Altbau“ sinkt der Wert auf knapp 3,5 %.

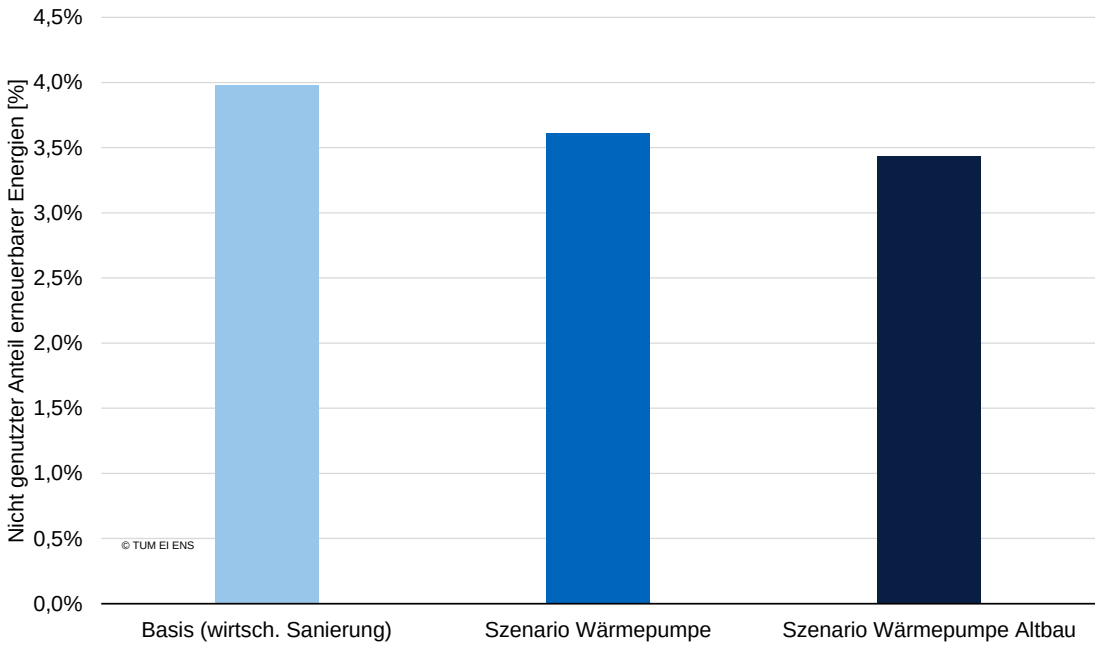


Abbildung 5.15 Vergleich des nicht genutzten Anteils erneuerbarer Energien

Abbildung 5.16 stellt die Summen der installierte Lade- und Entladeleistung sowie Kapazität aller Technologien im Jahr 2050 dar. Die installierte Entladeleistung steigt im Wesentlichen im Vergleich der beiden Szenarien „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“ gegenüber dem Szenario „Basis“. Für die Ladeleistung und Kapazität steigen die Werte dagegen beim Vergleich des Szenarios „Wärmepumpe“ mit „Wärmepumpe Altbau“ nochmal an. Der Grund dafür ist die zunehmende Saisonalität des Nachfragelastgangs bei zunehmender Wärmeerzeugung aus Strom.

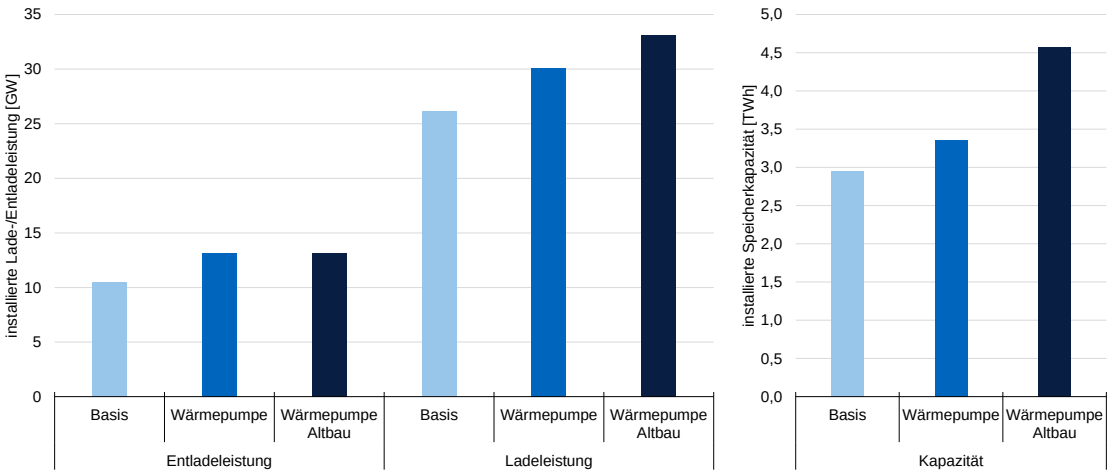


Abbildung 5.16 Vergleich der Speicherinstallationen in Entladeleistung, Ladeleistung und Kapazität im Jahr 2050

Abbildung 5.17 verdeutlicht dieses Verhalten mittels der Darstellung des Speicherfüllstandes des saisonalen Wasserstoffspeichers für die drei Szenarien. Im hellblauen Basis-Szenario ist kein eindeutiges Verhalten bzgl. Saisonalität der Energiespeicherung erkennbar. Bei zunehmender Stromnachfrage durch Wärmepumpen – mittelblau bis dunkelblau – steigt die Saisonalität im Lastgang der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung und damit auch die Tendenz des Wasserstoffspeichers, die Energie aus Photovoltaikanlagen vom Sommer in den Winter zu speichern. Ab etwa der Stunde 2800, was in etwa Anfang Mai entspricht, beginnt eine Nettoladung des Wasserstoffspeichers bis zur etwa zur Stunde 6800, Mitte Oktober. Der Speicher wird bis Ende des Jahres einmal vollständig entladen, was auf den Bedarf der Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung zurückzuführen ist.

Die Zunahme der installierten Ladeleistung ergibt sich aus der Zunahme der erneuerbaren Energien im Stromsystem. Die erneuerbaren Energien sind nicht planbar in ihrer Stromerzeugung und müssen im Moment des Dargebots genutzt werden. Damit dies möglich ist, muss die verfügbare Ladeleistung der Speicher entsprechend hoch sein. Die Nutzung der gespeicherten Energie wiederum kann geplant werden und sich somit über einen längeren Zeitraum erstrecken. Damit sind in gewissem Maße geringere Entladeleistungen nötig und es kommt zu weniger Installation.

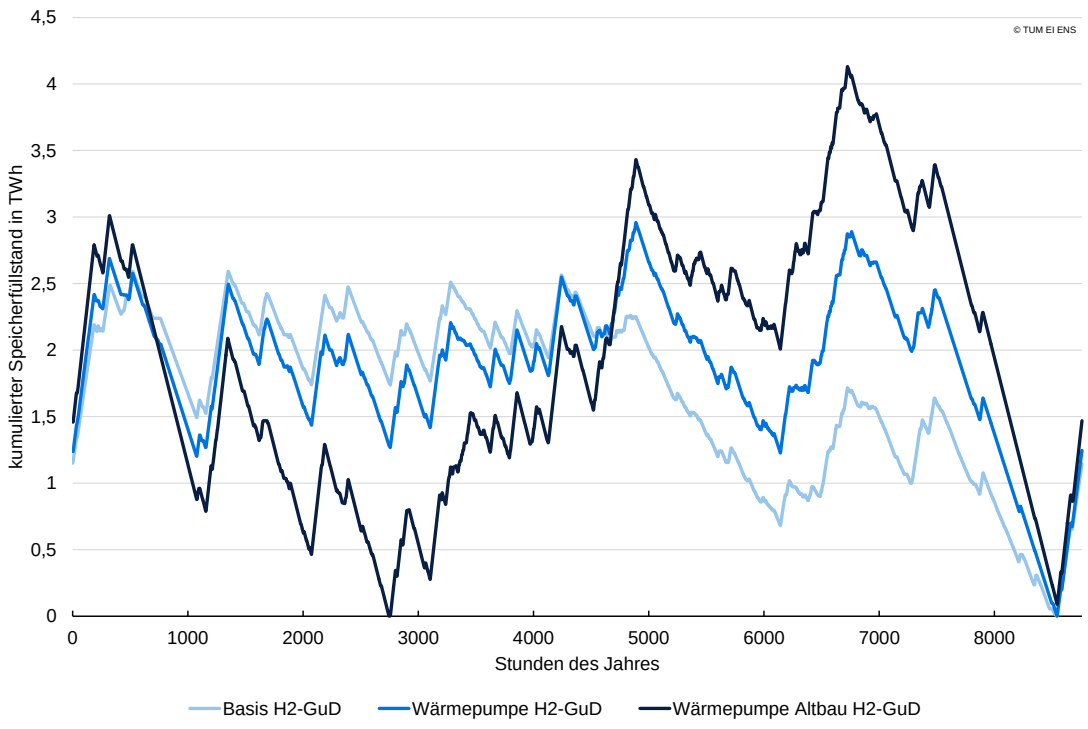


Abbildung 5.17 Vergleich des Speicherstands der Saisonalspeichertechnologie im Jahr 2050

Für die Betrachtung der Unterschiede in den CO_2-Emissionen werden die Szenarien „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“ dem Szenario „Basis“ gegenübergestellt.

Abbildung 5.18 stellt die Bilanz der Emissionseinsparung dar. Die orangen Säulen entsprechen den substituierten Emissionen der im Basis-Szenario in größerem Umfang verwendeten konventionellen Wärmeerzeuger, grün sind die Emissionen der Wärmepumpen aufgrund der emissionsbelasteten Stromerzeugung.

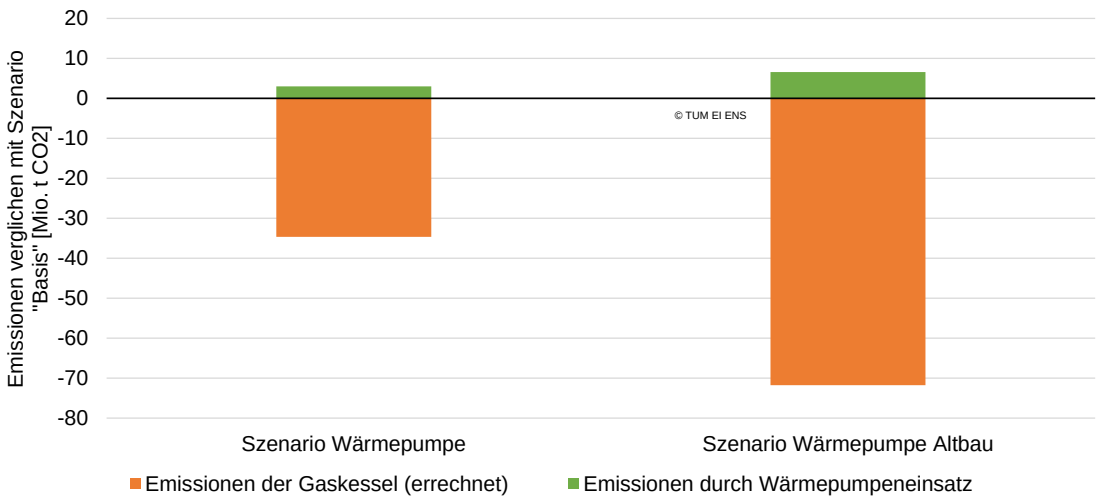


Abbildung 5.18 Vergleich der substituierten CO2-Emissionen

Aufgrund der Methodik stehen die Emissionen der konventionellen Heizanlagen auch in diesen drei Szenarien nicht zur Verfügung und müssen aus der Stromnachfrage der Wärmepumpen mit einigen vereinfachten Annahmen rückgerechnet werden. Im ersten Schritt werden die Differenzen der Stromnachfrage zwischen den Szenarien Wärmepumpe/Basis und Wärmepumpe Altbau/Basis errechnet und mit einer angenommenen Arbeitszahl von 3,5 beaufschlagt. Die sich ergebenden Zahlen entsprechen den jeweiligen Wärmenachfragedifferenzen. Unter der Annahme, dass diese Wärmenachfragen nur mit Gasheizungen mit einem Wirkungsgrad von 100 % und spezifischen Emissionen des Erdgases von $201{,}2\,\frac{g}{kWh}$ [37] gedeckt werden, können die zusätzlichen Emissionen der Gaskessel in den Szenarien „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“ zu 34,65 bzw. 71,76 Mio. t CO_2 errechnet werden. Eine Beheizung nur mit Wärmepumpen bringt zusätzliche Emissionen von 3,00 bzw. 6,61 Mio. t CO_2 mit sich. Durch den Einsatz von elektrischen Heizungen statt Gaskesseln können gegenüber dem Szenario „Basis“ die Emissionen somit auf etwa ein Zehntel reduziert werden.

6 Fazit

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des „Projekts Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem - Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland“ wurde der Einfluss der elektrischen Wärmeerzeugung in Gebäuden auf das Stromsystem in einem ersten Ansatz untersucht.

Der in Deutschland existierende Gebäudebestand wurde dafür in unterschiedliche Gebäudetypen und Energiestandards eingeteilt. Die Kategorien der Gebäude und deren Wärmespeicherverhalten wurden anschließend detailliert in TRNSYS-Modellen abgebildet und simuliert. Somit konnten 75 % des deutschen Endenergieverbrauchs für Raumwärme betrachtet werden. Die resultierenden Wärmelastgänge der Gebäude wurden anschließend mit LabVIEW-Modellen mit unterschiedlichen Wärmeübergabesystemen und dafür nötigen Anlagensystemen gedeckt, wodurch spezifische elektrische Lastgänge generiert werden konnten. Für den Gebäudebestand wurden Extrapolationen mit unterschiedlichen Annahmen bis zum Jahr 2050 vorgenommen. Diese Entwicklung der elektrischen Nachfrage für die Wärmeerzeugung wurde wiederum in ein Stromsystemmodell gegeben, welches die Entwicklung des Stromsystems über die Jahre 2015 bis 2050 volkswirtschaftlich optimiert.

Die resultierenden Ergebnisse wurden in erster Linie hinsichtlich Zusammensetzung der Stromerzeugung, Ausbau und Verhalten von großtechnischen Speicheranlagen und Entwicklung von CO_2-Emissionen untersucht. Die Kopplung der Wärmenachfrage mit dem Stromsystem hat eine Erhöhung der Stromnachfrage bis 2050 zur Folge. Diese zusätzliche Nachfrage kann zu einem großen Teil aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Die Emissionen für die Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie bewegen sich weit unter den Emissionen der Wärmeerzeugung mit einer konventionellen Gasheizung. Wird diese zusätzliche Nachfrage zu einem gewissen Maße flexibel an den Strompreis angepasst, wird dieser Trend unterstützt.

Im direkten Vergleich einer nicht optimierten mit einer optimierten Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung werden effiziente GuD-Anlagen besser ausgenutzt. Außerdem können Speicherinvestitionen reduziert und durch eine direktere Nutzung der erneuerbaren Energien Speicherverluste verringert werden. Ebenso können etwas mehr erneuerbare Energien in das System integriert werden. Das hat eine weitere Verringerung

der CO_2-Emissionen im optimierten Szenario gegenüber dem nicht optimierten Szenario zur Folge. Eine Kopplung der Raumwärmeerzeugung mit dem Stromsystem bringt nach dieser Untersuchung in erster Linie positive Aspekte.

Der Vergleich von drei Szenarien mit unterschiedlicher Entwicklung der Gebäudestandards und elektrischer Wärmeerzeugung gab Rückschlüsse auf den Einfluss dieser beiden Variablen. Gegenüber gestellt wurden optimierte Nachfragen für die Sanierung des Gebäudebestands unter rein wirtschaftlichen Aspekten, die forcierte Nutzung von Wärmepumpen in Neubauten und nach Sanierungen sowie die forcierte Nutzung von Wärmepumpen in Neubauten mit der Einschränkung, dass Sanierungen nur auf verhältnismäßig alte Gebäudestandards möglich ist und auch dort Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Diese Gegenüberstellung zeigt eine etwas bessere Nutzung der angebotenen erneuerbaren Energien proportional zur Anzahl von Wärmepumpen im System. Allerdings führt das aufgrund der Erhöhung der Saisonalität im Stromlastgang auch zu einem verstärkten Bedarf an saisonalen Speicheroptionen. Besonders positiv wirkt sich die Zunahme der elektrischen Wärmeerzeugung in den Szenarien mit forcierter Wärmepumpe im Vergleich zum Basis-Szenario in Bezug auf die CO_2-Emissionen aus. In beiden Sanierungsszenarien mit Wärmepumpe Sanierungsentwicklung können die CO_2-Emissionen durch die Nutzung des emissionsarmen Stroms zur Wärmeerzeugung gegenüber der konventionelle Wärmeerzeugung im Basisszenario um etwa den Faktor 10 gesenkt werden.

6.2 Grenzen der Betrachtung

Die dargestellten Ergebnisse sind unter bestimmten Annahmen und Vereinfachungen generiert worden. Das Verhalten der abgebildeten Gebäudetypen EFH/MEH/BUE wird im Rahmen der Betrachtung einheitlich angenommen. Alle Gebäude eines Typs verhalten sich dementsprechend identisch. Abweichendes Verhalten und damit verbundene mögliche Ausgleichseffekte werden folglich nicht abgebildet.

Im Rahmen dieser Studie wird die Regelung und Optimierung der Heizung ausschließlich anhand externer Kriterien vorgenommen. Der Nutzerwunsch und damit das Selbstbestimmte Handeln der Bewohner wird nicht berücksichtigt. Hinzukommt, dass die Verschiebung der Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung in dieser Betrachtung keine Behaglichkeitsgrenzen berücksichtigt.

Das verwendete Energiesystemmodell berücksichtigt kein Stromnetz. Die Abbildung entspricht demzufolge einem idealen Netz ohne Transportbeschränkungen. Auftretende Netzengpässe verhindern, dass in einer Region auftretende Überschüsse in einer

anderen Region verwendet werden können. Ausgehend vom derzeitigen Marktdesign eines einheitlichen Strommarktes in ganz Deutschlands könnten weniger EE als angenommen genutzt werden. Weiterer Netzausbau – wie beispielsweise die geplanten HGÜ-Trassen – und ein denkbares zukünftiges Marktdesign mit regionalen Aspekten reduzieren die Ungenauigkeit in der Betrachtung. Die Berechnungen wurden mit den Wetterdaten nur eines Jahres ohne die Berücksichtigung einer langfristigen Veränderung des Klimas durchgeführt. Das Ausbaupotenzial der großtechnischen Speicher hängt im Wesentlichen von der Saisonalität der Einspeisung des Windes ab, welche von Jahr zu Jahr deutlich schwankt. Qualitativ sind die Ergebnisse bezüglich der Speicher als robust einzuschätzen, wohingegen bei den konkreten Werten des Ausbaupotenzials eine starke Abhängigkeit vom gewählten Wetterjahr zu erwarten ist.

Die mit dem wachsenden Ausbau an erneuerbaren Energien auftretenden Erzeugungsüberschüsse sind nicht für die Nutzung im Wärmesektor reserviert. Welche Technologie durch die Nutzung des Stroms den höchsten Mehrwert generieren kann ist noch nicht abzusehen. Der Wärmesektor konkurriert dabei mit der Elektromobilität oder diversen Power-to-X-Technologien. Wer hier technologisch oder wirtschaftlich die besten Voraussetzungen mitbringt, ist noch offen. Aufgrund der unklaren Konkurrenzsituation und deren fehlende Abbildung sind im Rahmen dieser Studie die für Heizzwecke zur Verfügung stehenden Mengen an EE eher überschätzt und die Stromkosten tendenziell eher unterschätzt.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Aufgrund der Komplexität des betrachteten Forschungsthemas und der dargestellten Grenzen der hier durchgeführten Betrachtungen ergeben weitere mögliche Forschungsfragen. So könnte eine detailliertere Aufschlüsselung der Gebäude nach Gebäudetypen die Auswirkung der Kopplung von Wärme- und Stromsektor genauer abbilden.

Ein weiter Punkt ist die Optimierung der Wärmebereitstellung. Aktuell orientiert sich der Einsatz der Heiztechnologie nicht an den Behaglichkeitskriterien. In zukünftigen Forschungsarbeiten sollte – möglicherweise durch die Verwendung einer MPC – die Regelung der Heizungsanlage in den Gebäuden sowohl die Kriterien für die Behaglichkeit des Nutzers als auch die externen Informationen aus dem Stromsystem berücksichtigen.

Auch eine Betrachtung verschiedener Szenarien für die Entwicklung des Stromsektors würde zu einer besseren Einschätzung der Auswirkungen einer Systemkopplung füh-

ren. Denkbar wäre hier zu untersuchen, wie ein möglicher früherer oder späterer Kohleausstieg bzw. eine andere Aufteilung des Ausbaus erneuerbarer Energien sich auf ein gekoppeltes Strom-Wärme-System auswirken.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Betrachtung verschiedener Szenarien für die längerfristige Entwicklung des Klimas in Deutschland. Eine zunehmende Temperaturspreizung zwischen Winter und Sommer könnte sowohl Auswirkungen auf den Wärme-und Kältebedarf, als auch auf das Lastmanagement-Potenzial haben und somit auch die Kopplung von Strom- und Wärmesektor beeinflussen.

Ein alternativer Ansatz zu der hier angewendeten Methode wäre die Entwicklung eines ganzheitlichen Strom-Wärme-Modells, in dem sowohl das Stromsystem als auch die einzelnen Strom- und Wärmeverbraucher detailliert dargestellt sind. Damit ließen sich die Konkurrenz aus Ausbau im Stromsystem und der Sanierung und Umrüstung im Wärmesektor unter Berücksichtigung verschiedener Ziele ganzheitlich betrachten.

Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Ein Strommarkt für die Energiewende - Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch),“ Berlin, 2015.

[2] J. Nietsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape, H. Hahn, M. Wickert und B. Wenzel, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global,“ Stuttgart, 2012.

[3] G. Hausladen, T. Auer, J. Schneegangs, K. Klimke, H. Riemer, B. Trojer, L. Qian und M. de Borja Torrejón, „Lastverhalten von Gebäuden unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.

[4] J. Jungwirth, „Lastmanagement in Gebäuden Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden,“ Dissertation, TU München, 2014.

[5] C. Heilek, „Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem,“ Dissertation, TU München, 2015.

[6] P. Kuhn, „Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung,“ Dissertation, TU München, 2012.

[7] B. Schlomann, K. Wohlfarth, H. Kleeberger, L. Hardi, B. Geiger, A. Pich, E. Gruber, A. Gerspacher, E. Holländer und A. Roser, „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Anchlussauftrag des Forschungsvorhabens 53/09,“ Fraunhofer ISI, IfE, GfK, IREES, Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015.

[8] L. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, „Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage,“ IWU, Darmstadt, 2015.

[9] *EnEV 2009 - Energieeinsparverordnung für Gebäude. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden,* 2009.

[10] *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV),* Vom 24. Februar 1982.

[11] o.V., „Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen. Fachserie 5. Reihe 3.,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.

[12] K. Bettggenhäuser, T. Boermans, M. Offermann, A. Krechting, D. Becker, M. Kahles, F. Pause und T. Müller, „Klimaschutzduchr Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung,“ Umweltbundestamt, Dessau-Roßlau, 2011.

[13] o.V., „Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Nichtwohngebäuden (Neubau) Lange Reihen z. T. ab 1980.,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.

[14] o.V., „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 16/2011.," Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2011.

[15] DIN V 18599-11:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 11: Gebäudeautomation.

[16] DIN V 18599-10:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.

[17] Frauke Oldewurtel, „Stochastic Model Predictive Control for Energy Efficient Building Climate Control," ETH, Zürich, 2011.

[18] IWU, „Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden (2011)".

[19] IWU, „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten (2015)".

[20] IWU, „Kosten für Modernisierungsmaßnahmen von zehn Nichtwohngebäuden aus dem Bestand des Hessischen Immobilienmanagement (2015)".

[21] R. Dornmair, D. Atabay, F. Sänger, M. de Borja Torrejón und J. Maderspacher, „Einfluss von Gebäuden als Wärmespeicher auf das Energiesystem," in s *10. Internationale Energiewirtschaftstagung der TU Wien*, Wien, 2017.

[22] Handbuch Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD), 2014.

[23] D. W. DWD, „WebWerdis," Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, [Online]. Available: https://werdis.dwd.de/werdis/start.do. [Zugriff am 10 11 2016].

[24] M. R. Kühne, Drivers of energy storage demand in the German power system: an analysis of the influence of methodology and parameters on modelling results, München: Dotoral Dissertation. Technische Universität München, 2016.

[25] *DIN V 18599-2:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.*

[26] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH, *Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2015,* 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH, Hrsg., 2014.

[27] entsoe - european network of transmission system operators for electricity, „ENTSO-E Transparency Platform," 2013. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mhlv-a-specific-country-for-a-specific-month. [Zugriff am 15 1 2017].

[28] Bundesregierung, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,* Bundesregierung, Hrsg., 2010, p. 40.

[29] M. Schlesinger, D. Lindenberger und C. Lutz, *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung,* Basel/Köln/Osnabrück, 2010.

[30] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Zahlen und Fakten Energiedaten," 2016. [Online]. Available: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html.

[31] K. A. Janker, „Aufbau und Bewertung einer für die Energiemodellierung verwendbaren Datenbasis an Zeitreihen erneuerbarer Erzeugung und sonstiger Daten," Technische Universität München, München, 2015.

[32] National Aeronautics and Space Administration, „The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications," 2015. [Online]. Available: https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/. [Zugriff am 15 1 2017].

[33] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016),* Berlin, 2016.

[34] Bundesnetzagentur, „Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen)," 2016. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/cln_1911/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html.

[35] B. Höflich, P. Kreutzkamp, H. Peinl, J. Völker, M. Kühne, P. Kuhn, P. Tzscheutschler, R. Hermes, S. Krahl und K. Meisa, *Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien (Kurz: PSW - Integration EE),* Berlin.

[36] Statistisches Bundesamt, „Statista - Das Statistik-Portal," 2016. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/. [Zugriff am 15 1 2017].

[37] Umweltbundesamt, „Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2015," 15 01 2017. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen. [Zugriff am 29 06 2017].

[38] G. Hausladen, M. de Saldanha, P. Liedl und C. Sager, ClimaDesign. Lösungen für Gebäuden, die mit weniger Technik mehr können, München: Callwey, 2004.

[39] DIN EN ISO 13786:2015-06 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren (ISO/DIS 13786:2015); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 13786:2015.

[40] S. Klauß und W. Krichhof, „Altbaukonstruktionen - Materialien und U-Werte im Gebäudebestand. Baustoffe und Bauweisen mit reginalem Bezug.," Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2010.

[41] T. Loga, N. Diefenbach und B. R., Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, TABULA, 2011.

[42] M. Balkowski, G. Hausladen, T. Kwapich, C. Sager, T. Loga, K. Jagnow und R. Reichenberger, Leitfaden Energieausweis. Teil 1 - Energiebedarfsausweis: Datenaufnahme Wohngebäuden. Zweite Auflage., Berlin: DENA, 2009.

[43] DIN V 4108-6:2003-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.

[44] DIN 1946-6:2009-05 Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung.

[45] Passivhaus Institut, „Qualitätsanforderungen an Passivhäuser,“ [Online]. Available: http://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm. [Zugriff am 24 05 2016].

[46] Passipedia - Die Wissensdatenbank, „Was bedeutet Wärmebrückenfreies Konstruieren?,“ [Online]. Available: http://www.passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische_grundlagen/waermeuebertragung/waermebrueckenvermeidung. [Zugriff am 24 05 2016].

[47] DIN EN 13053 Lüftung von Gebäuden - Zentrale raumlufttechnische Geräte - Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006+A1:2011.

[48] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation,“ Nr. 16/2011.. [Online].

[49] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand., Berlin: BMVBS, 2009.

[50] DIN V 18599-4:2007-02 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung.

[51] AGEB, „Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 - 2015“.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Entwicklung der Bruttoleistung der Kraftwerke in Deutschland, mit stark steigendem erneuerbarem fluktuierenden Anteil, bei sinkendem Anteil planbarere Konventioneller und steuerbarer Erzeugung aus KWK [2] 1

Abbildung 2.1 Überblick der in der Studie [3] durchgeführten Simulationen. Quelle: [3] 4

Abbildung 2.2 Exemplarische Integration der abschaltbaren Leistung über die Abschaltdauer (links). Vergleich der Zuschalt- bzw. Abschaltpotenziale von verschiedenen Modellvarianten zum Grundmodell (rechts). Quelle: [3]..... 5

Abbildung 2.3 Jährliche Energiekosten für den Referenzfall (grün) und die Optimierung mit konstanten (blau) und variablen (rot) Strompreisen mit Strompreisen für 2010, 2020 und 2030 [4]..... 7

Abbildung 2.4 Entwicklung der Abschaltenergie aus erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeerzeugerkonfigurationen [5] 9

Abbildung 2.5 Methodik der Modellkopplung zwischen Gebäudemodellen, Anlagentechnik und Regelung sowie Stromsystemmodellierung 10

Abbildung 3.1 Verteilung des Endenergieverbrauchs für Raumheizung nach Sektoren in Deutschland (2012). Quelle: Daten aus [7] und IfE (TUM). Eigene Darstellung..... 12

Abbildung 3.2 Nutzungseinheiten der ausgewählten Gebäudetypen:Einfamilienhaus (links), Mehrfamilienhaus (mitte) und Bürogebäude (rechts). 16

Abbildung 3.3 Prinzipielle Funktionsweise des Reglers..... 19

Abbildung 3.4 Schema des Tools zur Berechnung der Gebäudeentwicklung und des Gesamtlastgangs..... 20

Abbildung 3.5 Zulässige Pfade der Gebäudesanierung 23

Abbildung 3.6 Schematische Darstellung des Stromsystemmodells [20] 24

Abbildung 4.1 Entwicklung der gesetzten Erzeugung aus erneuerbaren Energien (EE) 29

Abbildung 4.2 Entwicklung der Brennstoffkosten und des CO_2-Zertifikatspreises 33

Abbildung 4.3 Gebäudeentwicklung für das Basisszenario 34

Abbildung 4.4 Gebäudeentwicklung für das Szenario „Wärmepumpe“..... 35

Abbildung 4.5 Zulässige Pfade der Gebäudesanierung für Szenario „Wärmepuimpe Altbau“ 36

Abbildung 4.6 Gebäudeentwicklung für das Szenario „Wärmepumpe Altbau“ 36

Abbildung 4.7 Gesamter Gebäudelastgang der Stützjahre für die Szenarien „Basis“, „Wärmepumpe“ und „Wärmepumpe Altbau“ 37

Abbildung 4.8 Prinzipdarstellung der Nachfrageanpassung im Szenario "Wärmepumpe - optimiert" 39

Abbildung 4.9 Entwicklung der Stromnachfrage zur Raumwärmeerzeugung über den Betrachtungszeitraum 40

Abbildung 5.1 Entwicklung der neu installierten Kraftwerkskapazität im Szenario „Heiz" 42

Abbildung 5.2 Stromerzeugung im Szenario "Heiz" 43

Abbildung 5.3 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherladeleistung im Szenario „Heiz" 44

Abbildung 5.4 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherentladeleistung im Szenario „Heiz" 44

Abbildung 5.5 Wirtschaftliches Ausbaupotenzial an Speicherkapazität im Szenario „Heiz" 44

Abbildung 5.6 Zusammensetzung der Differenz der Stromerzeugung der Szenarien „ohne Heiz" und „mit Heiz" 45

Abbildung 5.7 CO_2-Emissionen des Basis-Szenarios „ohne Heizung" und des Heiz-Szenarios „mit Heizung" 46

Abbildung 5.8 spezifische CO_2-Emissionen des Basis-Szenarios und der zusätzlichen Nachfrage des Szenarios Heiz" gegenüber dem Basis-Szenario 47

Abbildung 5.9 Spezifische Leistungen und Kapazität der Speicher im Basis-Szenario „ohne Heizung" gegenüber dem Heiz-Szenario „mit Heizung" für das Jahr 2050 48

Abbildung 5.10 Verlauf des Speicherfüllstandes des H_2-GuD-Speichers für die Szenarien „Basis" und „Heiz" im Jahr 2050 49

Abbildung 5.11 Unterschiede in der Stromerzeugung zwischen den Szenarien "nicht optimiert" und "optimiert" 50

Abbildung 5.12 Summarische Darstellung der Unterschiede in der Stromerzeugung zur Deckung der Wärmenachfrage 51

Abbildung 5.13 Vergleich der Speicherinvestitionen nach Entladeleistung, Ladeleistung und Kapazität 52

Abbildung 5.14 Vergleich des Speicherstands der Saisonalspeichertechnologie im Jahr 2050 52

Abbildung 5.15 Vergleich des nicht genutzten Anteils erneuerbarer Energien 53

Abbildung 5.16 Vergleich der Speicherinstallationen in Entladeleistung, Ladeleistung und Kapazität im Jahr 2050 54

Abbildung 5.17 Vergleich des Speicherstands der Saisonalspeichertechnologie im Jahr 2050 55

Abbildung 5.18 Vergleich der substituierten CO2-Emissionen 55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Nutzfläche des Gebäudebestands in Deutschland. Sektoren: Haushalt und GHD. Stand 2014 (Mio. m2). Quellen: [8] , [10] , [11] , [12] 14

Tabelle 3.2 Angenommene energetische Gebäudestandards für die Energieeffizienzkategorien. 14

Tabelle 3.3 Gebäudemodelle-Überblick 15

Tabelle 3.4 Betrachtete Anlagentechniken zur Bereitstellung der Wärme 18

Tabelle 3.5 Aktueller Bestand für Gebäudetyp Einfamilienhaus nach [17] 20

Tabelle 3.6 Sanierungskosten für Gebäudetyp Einfamilienhaus nach [18], [19] 21

Tabelle 3.7 Spezifische Kosten der Heizungsanlagen nach [18] und [5] 21

Tabelle 3.8 Verwendete Entwicklungsparameter und aktuellen Bestandsflächen 22

Tabelle 3.9 Exemplarische Aufteilung der Gebäudekonfiguration im Jahr 2050 für Gebäudetyp Einfamilienhaus 23

Tabelle 4.1 Thermische Behaglichkeitsbände bei der Gebäudesimulation 28

Tabelle 4.2 Technische und ökonomische Parameter der unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien nach [6] [23] 32

Tabelle 4.3 Technische und ökonomische Parameter der unterschiedlichen Speichertechnologien nach [6] 32

Tabelle 6.1 Aktueller Gebäudebestand 2020 für Gebäudetyp Mehrfamilienhaus nach [17] 84

Tabelle 6.2 Aktueller Gebäudebestand für Gebäudetyp Büro nach [50] 84

Tabelle 6.3 Sanierungskosten für Gebäudetyp Mehrfamilienhaus nach [18], [19] 85

Tabelle 6.4 Sanierungskosten für Gebäudetyp Büro nach [18], [19] 85

Anhang

A.1. Konstruktive und technischen Kennwerte der Gebäudemodelle

EFH Altbau
EFH Altbau+
EFH Neubau
EFH Neubau+

MFH Altbau+
MFH Altbau+
MFH Neubau
MFH Neubau+

BUE Altbau+
BUE Altbau+
BUE Neubau
BUE Neubau+

EFH Altbau			Wert / Anmerkung / Quelle		
Dimensionen	Fläche	[m²]	180	-	[3]
	Volumen	[m³]	495	Dach nicht ausgebaut	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	176	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 360 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Kalkzementputz (Außenputz)	[8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	1,2	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 1958-68: 1,4-1.2 W/m²K	[8] [41] [42]
Dach	Aufbau	[mm]	- 140 90 50 15	Ziegel auf Lattung Holz-Sparren Luftschicht Dämmung Gipskartonplatte	[8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	0,8	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 1958-68: 0,8 W/m²K	[8] [41] [42]
Grundplatte	Aufbau	[mm]	20 40 10 150	Parkettbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton	[3] [8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	1,6	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 1958-68: 1-1,6 W/m²K	[8] [41] [42]
Fenster	Flächenanteil	[%]	12	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	2,9	2-Scheiben-Isolierverglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,78		
	τ-Wert	[-]	0,73		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Holzprofilrahmen	[8] [38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	6	Gebäudedichtheitskategorie III	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,42	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,44	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,39		
	Beleuchtung	[W/m²]	0,25	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	2,08	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	12,4 122,2	: tragende Innenwände : nicht tragende Innenwände	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Freie Lüftung (Querlüftung) ohne Außenluftdurchlässen (ALD)	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,39	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,16	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz gering	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

EFH Altbau+			Wert / Anmerkung / Quelle		
Dimensionen	Fläche	[m²]	180	-	[3]
	Volumen	[m³]	495	Dach nicht ausgebaut	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	176	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 300 40 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8] [41] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	0,6	Berechnet nach dem Aufbau Pauschalwert für Baualtersklasse 1984-94 (WSchVO 84): 0,6-0,5 W/m²K	[8] [41] [42]
Dach	Aufbau	[mm]	- 150 30 120 15	Ziegel auf Lattung Holz-Sparren Luftschicht Dämmung Gipskartonplatte	[8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	0,4	Berechnet nach dem Aufbau Pauschalwert für Baualtersklasse 1984-94 (WSchVO 84): 0,4 W/m²K	[8] [41] [42]
Grundplatte	Aufbau	[mm]	20 40 60 140	Parkettbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton	[8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	0,6	Berechnet nach dem Aufbau Pauschalwert für Baualtersklasse 1984-94 (WSchVO 84): 0,6 W/m²K	[8] [41] [42]
Fenster	Flächenanteil	[%]	12	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	2,9	2-Scheiben-Isolierverglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,78		
	τ-Wert	[-]	0,73		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Alu-Rahmen	[8] [41]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	4	Gebäudedichtheitskategorie II	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,39	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,44	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,39		
	Beleuchtung	[W/m²]	0,25	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	2,08	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	12,4 122,2	: tragende Innenwände : nicht tragende Innenwände	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Freie Lüftung (Schachtlüftung) mit Außenluftdurchlässen (ALD)	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,39	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,12	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

EFH Neubau			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	180	-	[3]
	Volumen	[m³]	495	Dach nicht ausgebaut	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	134	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 240 150 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,23	Berechnet nach dem Aufbau Anforderung der EnEV 2009: <0.24 W/m²K	[9]
Dach	Aufbau	[mm]	- 150 30 210 15	Ziegel auf Lattung Holz-Sparren Luftschicht Dämmung Gipskartonplatte	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,2	Berechnet nach dem Aufbau Anforderung der EnEV 2009: <0.24 W/m²K	[8] [9]]
Grundplatte	Aufbau	[mm]	20 40 110 140	Parkettbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,3	Berechnet nach dem Aufbau Anforderung der EnEV 2009: <0.30 W/m²K	[8] [9]]
Fenster	Flächenanteil	[%]	12	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	1,1	2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,6		
	τ-Wert	[-]	0,54		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	1,4	Niedrigenergierahmen	[38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,05	Zuschlag für wärmetechnisch vergleichbare Konstruktionen nach DIN 4108 Beibl.2	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	1,5	EnEV - Gebäude mit RLT-Anlage	[9]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,21	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,44	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,39		
	Beleuchtung	[W/m²]	0,25	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	2,08	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speichermassen	Innenwände	[m²]	134,6	: nicht tragende Innenwände	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Abluftsystem) mit ALD	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,90	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,12	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

EFH Neubau+			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	180	-	[3]
	Volumen	[m³]	495	Dach nicht ausgebaut	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	134	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 240 290 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,12	Berechnet nach dem Aufbau passivhaus-Anforderung: <0.15 W/m²K	[45]
Dach	Aufbau	[mm]	- 150 30 390 15	Ziegel auf Lattung Holz-Sparren Luftschicht Dämmung Gipskartonplatte	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,10	Berechnet nach dem Aufbau passivhaus-Anforderung: <0.15 W/m²K	[45]
Grundplatte	Aufbau	[mm]	20 40 20 140 290	Parkettbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Dämmung	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,12	Berechnet nach dem Aufbau passivhaus-Anforderung: <0.15 W/m²K	[45]
Fenster	Flächenanteil	[%]	12	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	0,7	3-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[46] [8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,5		
	τ-Wert	[-]	0,39		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	0,8	Passivhaus-Rahmen	[8] [41] [38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,01	Berechnet nach dem vereinfachten Kriterium für Wärmebrückenfrei: $\psi \leq 0.01$ W/mK	[46]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	0,6	Passivhaus-Dichtheitskategorie	[45]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,15	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,44	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,39		
	Beleuchtung	[W/m²]	0,25	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	2,08	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	134,6	: nicht tragende Innenwände	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Ab-luftsystem) mit ALD und WRG	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,90	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,12	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	75	Passivhaus-Qualitätsanforderung WRG-Klasse H1	[45] [47]

MFH Altbau+			Wert / Anmerkung / Quelle		
Dimensionen	Fläche	[m²]	110	-	[3]
	Volumen	[m³]	286	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	170	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 360 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Kalkzementputz (Außenputz)	[8] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	1,2	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 1958-68: 1,4-1.2 W/m²K	[8] [41] [42]
Dach	Aufbau	[mm]	25 200 15	Kalkgipsputz Ziegel Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3] [42]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	14	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	2,9	2-Scheiben-Isolierverglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,78		
	τ-Wert	[-]	0,73		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Kunststoff-Rahmen	[8] [41]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	6	Gebäudedichtheitskategorie III	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,42	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,773	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,409		
	Beleuchtung	[W/m²]	1,985	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	4,17	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	10,2 78,5	: tragendes Mauerwerk : nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Freie Lüftung (Querlüftung) ohne Außenluftdurchlässen (ALD)	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,47	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,19	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz gering	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

MFH Altbau+			Wert / Anmerkung / Quelle		
Dimensionen	Fläche	[m²]	110	-	[3]
	Volumen	[m³]	286	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	170	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 300 40 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8] [41] [40]
	U-Wert	[W/m²K]	0,6	Berechnet nach dem Aufbau Pauschalwert für Baualtersklasse 1984-94 (WSchVO 84): 0,6-0,5 W/m²K	[41] [42]
Dach	Aufbau	[mm]	25 200 15	Innenputz Ziegelmauerwerk Putz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3] [42]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	14	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	2,9	2-Scheiben-Verglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,78		
	τ-Wert	[-]	0,73		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Kunststoff-Rahmen	[8] [41]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	4	Gebäudedichtheitskategorie II	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,39	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,773	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,409		
	Beleuchtung	[W/m²]	1,985	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	4,17	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	10,2 78,5	: tragendes Mauerwerk : nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Freie Lüftung (Schachtlüftung) mit Außenluftdurchlässen (ALD)	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,47	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,14	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

MFH Neubau			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	110	-	[3]
	Volumen	[m³]	286	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	168	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 240 140 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,238	Berechnet nach dem Aufbau Anforderung der EnEV 2009: <0.24 W/m²K	[9]
Dach	Aufbau	[mm]	10 200 10	Kalkgipsputz Beton Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3] [42]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	14	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	1,1	2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,6		
	τ-Wert	[-]	0,54		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	1,4	Niedrigenergierahmen	[38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,05	Zuschlag für wärmetechnisch vergleichbare Konstruktionen nach DIN 4108 Beibl.2	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	1,5	EnEV - Gebäude mit RLT-Anlage	[9]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,21	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,773	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,409		
	Beleuchtung	[W/m²]	1,985	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	4,17	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speichermassen	Innenwände	[m²]	88,7	: nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Abluftsystem) mit ALD	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,47	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,14	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

MFH Neubau+				*Wert / Anmerkung / Quelle*	
Dimensionen	Fläche	[m²]	110	-	[3]
	Volumen	[m³]	286	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	168	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 240 280 15	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	0,12	Berechnet nach dem Aufbau passivhaus-Anforderung: <0.15 W/m²K	[45]
Dach	Aufbau	[mm]	10 200 10	Kalkgipsputz Beton Kalkgipsputz	[8]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3] [42]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	14	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	0,7	3-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[46] [8] [41] [25]
	g-Wert	[-]	0,5		
	τ-Wert	[-]	0,39		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	0,8	Passivhaus-Rahmen	[8] [41] [38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,75	Innenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[42]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,02	Berechnet nach dem vereinfachten Kriterium für Wärmebrückenfrei: $\psi \leq 0.01$ W/mK	[46]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	0,6	Passivhaus-Dichtheitskategorie	[45]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,15	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	1,773	gemittelter Tageswert	[43] [16]
	Geräte	[W/m²]	0,409		
	Beleuchtung	[W/m²]	1,985	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	4,17	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	88,7	: nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Ab-luftsystem) mit ALD und WRG	[44]
	Luftwechsel	[1/h]	0,47	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[44]
	Feuchteschutz	[1/h]	0,14	Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch	[44]
	WRG-Effizienz	[%]	75	Passivhaus-Qualitätsanforderung WRG-Klasse H1	[45] [47]

BUE Altbau+			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	20	-	[3]
	Volumen	[m³]	50	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	123	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 380 10	Kalkgipsputz (Innenputz) Ziegel Kalkzementputz (Außenputz)	[48]
	U-Wert	[W/m²K]	1,5	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 1 (Baute bis 1976): 1,5 W/m²K	[48]
Dach	Aufbau	[mm]	26 80 26	Kalkgipsputz Luftspalt Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	45	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	2,9	2-Scheiben-Isolierverglasung Baualtersklasse 1: Bauten bis 1976	[25] [48]
	g-Wert	[-]	0,78		
	τ-Wert	[-]	0,73		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Kunststoff-Rahmen	[41] [48]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,25	Außenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[49]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	6	Gebäudedichtheitskategorie III	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,42	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	7	gemittelter Tageswert	[16] [50]
	Geräte	[W/m²]	15,64		
	Beleuchtung	[W/m²]	15	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	37,6	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	10,2 78,5	: tragendes Mauerwerk : nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Freie Lüftung (Querlüftung) ohne Außenluftdurchlässen (ALD)	-
	Luftwechsel	[1/h]	1,60	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[16]
	Feuchteschutz	[1/h]	1,00	Lüftung zum Feuchteschutz	[16]
	WRG-Effizienz	[%]	-	ohne WRG	-

BUE Altbau+			Wert / Anmerkung / Quelle		
Dimensionen	Fläche	[m²]	20	-	[3]
	Volumen	[m³]	50	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	126	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 200 30 10	Kalkgipsputz (Innenputz) Beton Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	0,85	Berechnet nach dem Aufbau. Pauschalwert für Baualtersklasse 3 (1984-1994): 0,85 W/m²K	[48]
Dach	Aufbau	[mm]	26 80 26	Kalkgipsputz Luftspalt Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	45	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	1,7	2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung Baualtersklasse 3: 1984-1994	[25] [48]
	g-Wert	[-]	0,72		
	τ-Wert	[-]	0,6		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	2	Alu-Rahmen	[41] [48]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,25	Außenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[49]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,1	Zuschlag ohne Nachweis	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	4	Gebäudedichtheitskategorie II	[25]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,39	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	7	gemittelter Tageswert	[16] [50]
	Geräte	[W/m²]	15,64		
	Beleuchtung	[W/m²]	15	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	37,6	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	10,2 78,5	: tragendes Mauerwerk : nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Ab-luftsystem) mit ALD und WRG	-
	Luftwechsel	[1/h]	1,60	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[16]
	Feuchteschutz	[1/h]	1,00	Lüftung zum Feuchteschutz	[16]
	WRG-Effizienz	[%]	0,54	WRG-Klasse H5	[47] [50]

BUE Neubau			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	20	-	[3]
	Volumen	[m³]	50	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	126	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 200 150 10	Kalkgipsputz (Innenputz) Beton Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	0,25	Berechnet nach dem Aufbau. Anforderung der EnEV 2009: <0.28 W/m²K	[9]
Dach	Aufbau	[mm]	26 80 26	Kalkgipsputz Luftspalt Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	45	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	1,1	2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[25] [48]
	g-Wert	[-]	0,6		
	τ-Wert	[-]	0,54		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	1,4	Niedrigenergierahmen	[38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,25	Außenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[49]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,05	Zuschlag für wärmetechnisch vergleichbare Konstruktionen nach DIN 4108 Beibl.2	[43]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	1,5	EnEV - Gebäude mit RLT-Anlage	[9]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,21	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	7	gemittelter Tageswert	[16] [50]
	Geräte	[W/m²]	15,64		
	Beleuchtung	[W/m²]	15	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	37,6	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speichermassen	Innenwände	[m²]	88,7	: nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Abluftsystem) mit ALD und WRG	-
	Luftwechsel	[1/h]	1,60	Berechnet nach dem Mindestaußenluftvolumenstrom	[16]
	Feuchteschutz	[1/h]	1,00	Lüftung zum Feuchteschutz	[16]
	WRG-Effizienz	[%]	0,6	Referenzgebäude EnEV 2009 WRG-Klasse H3	[9] [47]

BUE Neubau+			*Wert / Anmerkung / Quelle*		
Dimensionen	Fläche	[m²]	20	-	[3]
	Volumen	[m³]	50	-	[3]
Speicherfähigkeit	Bauschwere	[-]	-	Schwer	[38]
	C_{wirk}	[Wh/m²K]	126	Berechnet nach der 10-cm-Regel	[39]
Außenwand	Aufbau	[mm]	10 200 260 10	Kalkgipsputz (Innenputz) Beton Dämmung Kalkzementputz (Außenputz)	-
	U-Wert	[W/m²K]	0,15	Berechnet nach dem Aufbau passivhaus-Anforderung: <0.15 W/m²K	[45]
Dach	Aufbau	[mm]	26 80 26	Kalkgipsputz Luftspalt Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Boden / Decke	Aufbau	[mm]	5 50 20 180 10	Bodenbelag Zementestrich Trittschalldämmung Stahlbeton Kalkgipsputz	[3]
	U-Wert	[W/m²K]	-	Es wird adiabat betrachtet	-
Fenster	Flächenanteil	[%]	45	Fensterflächenanteil der Außenwand	-
Verglasung	U_g-Wert	[W/m²K]	0,7	3-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung	[25] [46]
	g-Wert	[-]	0,5		
	τ-Wert	[-]	0,39		
Rahmen	U_f-Wert	[W/m²K]	0,8	Passivhaus-Rahmen	[41] [38]
	Rahmenanteil	[%]	30	Abminderungsfaktor F_F: 0,7	[25] [43]
Sonnenschutz	fc-Wert	[-]	0,25	Außenliegend	[43]
Türen	U-Wert	[W/m²K]	3,5	-	[49]
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	[W/m²K]	0,03	Berechnet nach dem vereinfachten Kriterium für Wärmebrückenfrei: $\psi \leq 0.01$ W/mK	[46]
Dichtheit	n_{50}-Wert	[1/h]	0,6	Passivhaus-Dichtheitskategorie	[45]
	Infiltration-LW	[1/h]	0,15	Berechnet nach dem n_{50}-Wert	[25]
Interne Lasten	Personen	[W/m²]	7	gemittelter Tageswert	[16] [50]
	Geräte	[W/m²]	15,64		
	Beleuchtung	[W/m²]	15	installierte Leistung	
	Gesamt	[W/m²]	37,6	mittlere interne Wärmegewinne	
Interne Speicher-massen	Innenwände	[m²]	88,7	: nicht tragende Mauerwerk	[3]
Lüftung	Konzept	[-]	-	Ventilatorgestützte Lüftung (Zu-/ Ab-luftsystem) mit ALD und WRG	-
	Luftwechsel	[1/h]	1,60	Berechnet nach dem Mindestaußen-luftvolumenstrom	[16]
	Feuchteschutz	[1/h]	1,00	Lüftung zum Feuchteschutz	[16]
	WRG-Effizienz	[%]	75	Passivhaus-Qualitätsanforderung WRG-Klasse H1	[45] [47]

A.2. Eingangsdaten für die Berechnug der Gebäudeentwicklung

Gebäudebestand

Die folgenden Tabellen zeigen die aktuelle Aufteilung des Gebäudebestands nach den für dieses Projekt definierten Energieeffizienzkategorien und Anlagensystemen für die Gebäudetypen Mehrfamilienhaus und Büro.

MFH [Gebäudebestand in %]		**Energieerzeugung**			
Energieeffizienz	**System**	**OEL-Kessel**	**GAS-Kessel**	**WP**	**BHKW**
Altbau	**RAD**	20,12%	49,23%	--	0,00%
Altbau +	**RAD**	7,54%	18,45%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	0,38%	0,00%
Neubau	**RAD**	0,80%	1,97%	--	0,00%
	FBH	0,00%	0,00%	1,51%	0,00%
Neubau +	**FBH**	--	--	0,00%	--

RAD: Radiator FBH: Fußbodenheizung WP: Wärmepumpe BHKW: Blockheizkraftwerk

Tabelle 6.1 Aktueller Gebäudebestand 2020 für Gebäudetyp Mehrfamilienhaus nach [18]

BUE [Gebäudebestand in %]		**Energieerzeugung**			
Energieeffizienz	**System**	**OEL-Kessel**	**GAS-Kessel**	**WP**	**BHKW**
Altbau	**RAD**	13,85%	28,09%	--	--
Altbau +	**RAD**	15,43%	31,28%	--	--
	FBH	0,00%	0,00%	0,80%	0,00%
Neubau	**RAD**	2,47%	5,00%	--	--
	FBH	0,00%	0,00%	3,10%	0,00%
Neubau +	**LH**	--	--	0,00%	--
	FBH	--	--	0,00%	--

RAD: Radiator LH: Luftheizung FBH: Fußbodenheizung WP: Wärmepumpe BHKW: Blockheizkraftwerk

Tabelle 6.2 Aktueller Gebäudebestand für Gebäudetyp Büro nach [51]

Sanierungskosten

Die folgenden Tabellen zeigen die spezifischen flächenbezogenen Sanierungskosten der Gebäudetypen Mehrfamilienhaus und Büro für alle betrachteten Möglichkeiten der Gebäudesanierung inklusive Wärmeübertragungssystem betrachtet. Ausgehend von den IWU Studien [19], [20] werden nur die energiebedingte Mehrkosten einer Modernisierung als Sanierungskosten berücksichtigt.

MFH [Sanierungskosten in €/m²]		**Altbau**	**Altbau +**		**Neubau**		**Neubau +**
Energieeffizienz	**System**	**RAD**	**RAD**	**FBH**	**RAD**	**FBH**	**FBH**
Altbau	**RAD**	--	--	--	37	73	141
Altbau +	**RAD**	--	--	--	30	66	133
	FBH	--	--	--	--	30	97
Neubau	**RAD**	--	--	--	--	36	116
	FBH	--	--	--	--	--	80
Neubau +	**FBH**	--	--	--	--	--	--

RAD: Radiator FBH: Fußbodenheizung

Tabelle 6.3 Sanierungskosten für Gebäudetyp Mehrfamilienhaus nach [19], [20]

BUE [Sanierungskosten in €/m²]		**Altbau**	**Altbau +**		**Neubau**		**Neubau +**	
Energieeffizienz	**System**	**RAD**	**RAD**	**FBH**	**RAD**	**FBH**	**LH**	**FBH**
Altbau	**RAD**	--	--	--	51	123	95	167
Altbau +	**RAD**	--	--	--	49	121	93	165
	FBH	--	--	--	--	49	--	93
Neubau	**RAD**	--	--	--	--	72	84	156
	FBH	--	--	--	--	--	--	84
Neubau +	**LH**	--	--	--	--	--	--	--
	FBH	--	--	--	--	--	--	--

RAD: Radiator LH: Luftheizung FBH: Fußbodenheizung

Tabelle 6.4 Sanierungskosten für Gebäudetyp Büro nach [19], [20].