

1 Einleitung

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht das Energiesystem eines Einfamilienhauses, welches bilanziell zu 100 % aus regenerativen Energiequellen versorgt wird. Zur Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser kommt eine Wärmepumpe zum Einsatz. In Kombination mit einem Wärmespeicher trägt diese zusätzlich zum eingesetzten Batteriespeicher dazu bei, die fluktuierend verfügbare elektrische Energie in das Energiesystem des Gebäudes zu integrieren. Das betrachtete Referenzgebäude mit den relevanten Komponenten des Energiesystems wird in Abschnitt 2.1 definiert.

1.1 Motivation und Stand der Forschung

In vielen Neubaugebieten werden in den dortigen Wohngebäuden ausschließlich Wärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitstellung eingesetzt, was insbesondere bei hauptsächlich wärmegeführter Betriebsweise, zu einer hohen Belastung der elektrischen Verteilnetze führen kann [48], [37]. Gleichzeitig steigt die installierte Leistung sowie die zugehörige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland immer weiter an, sodass im Jahr 2021 rund 23 % der Nettostromerzeugung aus Windenergieanlagen und rund 10 % durch Photovoltaikanlagen bereitgestellt wurden [7]. Der hohe Anteil fluktuierend einspeisender Erzeugungsanlagen bringt für das elektrische Energiesystem Herausforderungen hinsichtlich des zeitlichen und leistungsmäßigen Ausgleichs zwischen Energieangebot und -nachfrage mit sich. Verschiedene Arbeiten identifizieren den Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Speichern als wichtigen Baustein zur Nutzbarmachung der fluktuierend verfügbaren erneuerbaren Energie ([57], [9], [48], [42]). Gleichzeitig entfällt der überwiegende Anteil des Energiebedarfs im privaten Wohngebäudesektor aktuell auf die Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser [1], wobei im Jahr 2020 im Wohnungsneubau mit 35,5 % der größte Anteil der Wohneinheiten mit Wärmepumpen beheizt wurde [3].

Wenngleich der Anteil der erneuerbaren Energien im Jahr 2021 an der gesamten Nettostromerzeugung mit 45,8 % noch weit von einem zu 100 % erneuerbar gespeisten elektrischen Energiesystem entfernt ist, setzt die vorliegende Arbeit eine vollständig regenerative Versorgung des betrachteten wärmepumpenbeheizten Wohngebäudes voraus und untersucht damit unter anderem einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung

von CO₂-Emissionen im Wohngebäudesektor [37]. Gleichzeitig zielen die durchgeführten Untersuchungen darauf ab, das Potential der Reduktion der maximalen Netzbelastung durch den Einsatz von elektrischen und thermischen Speichern bei hohem Autarkiegrad des betrachteten Wohngebäudes zu evaluieren. Wie nachfolgend dargelegt, sind bisher durchgeführte Arbeiten stets auf die wirtschaftliche Auslegung der eingesetzten Energiesystemkomponenten im Wohngebäudesektor fokussiert. Der Einsatz größerer, aus heutiger Sicht für den Anlagenbetreiber unwirtschaftlicher Speicherkapazitäten, wird dabei nicht untersucht. In [56] wird festgestellt, dass die autarke Versorgung von Einfamilienhäusern ohne Netzanschluss möglich ist. Wegen der erforderlichen Back-Up-Systeme und einzusetzenden Speicherkapazitäten, wird dies jedoch nicht weiter verfolgt. Ebenso wenig ist die Untersuchung des Einsatzes unterschiedlicher Kombinationen von Wind- und Photovoltaikenergie Bestandteil bestehender Arbeiten.

Sämtliche Arbeiten gehen von vornherein von einer ökonomisch sinnvollen Auslegung für den Betrieb der Gebäudeenergiesysteme aus Sicht des Hausbesitzers aus. So untersuchen *Moshövel et al.* in [35] die Kombination aus maximalem Eigenverbrauch und der Reduktion von Einspeisespitzen in das elektrische Netz für ein PV-Speichersystem in privaten Haushalten. Es wird gezeigt, dass sich auf Basis einfacher Prognoseverfahren hohe Eigenverbrauchsquoten bei gleichzeitiger Einhaltung von Einspeisegrenzen erreichen lassen. Eine Kombination von elektrischen Speichern und Wärmepumpen zum Erreichen der genannten Managementziele wird nicht untersucht. Im Gegensatz dazu untersuchen *Tjaden et al.* in [54] den Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern zur Erhöhung der Eigenversorgung im Einfamilienhaus. Neben dem Einsatz von Batteriespeichern wird nachgelagert der Einfluss der thermischen Speicherung durch Überhitzung des Trinkwarmwasserspeichers und durch Erhöhung der Raumtemperatur auf den Autarkiegrad untersucht. Die Reduktion der maximalen Belastung des elektrischen Netzes wird dabei jedoch nicht betrachtet.

Weitere Arbeiten fokussieren verschiedene Betriebsstrategien und die Kombination von elektrischen und thermischen Speicherkapazitäten im Wohngebäudesektor. So betrachtet *Brunner* in [5] den Betrieb von elektrischen Wärmepumpen im Verteilnetz und implementiert dazu auf Basis mathematischer Optimierung verschiedene Betriebsstrategien, die einerseits den Anlagen- und andererseits den Netzbetreiber betreffen. Dabei werden verschiedene Gebäudestandards und thermische Speicherkapazitäten betrachtet. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf den lokalen Auswirkungen des Wärmepumpeneinsatzes auf das Verteilnetz. Die Arbeit von *Kippelt* befasst sich mit der Entwicklung eines modular aufgebauten Optimierungsmodells, welches Flexibilitätsoptionen auf thermischer und elektrischer Seite eines Gebäudes abbildet [28]. Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Zusammenwirkens verschiedener Flexibilitätsoptionen, die zu einem großen Teil auf der Kopplung des Strom- und Wärmesektors beruhen. Dabei werden üblich dimensionierte Systeme und vorhandene Potentiale betrachtet, sowie Rückwirkungen auf den Netzbetrieb durch Einbeziehung von Netzrestriktionen in das Optimierungsmodell untersucht.

Röhrenbeck widmet sich in [42] der zentralen Fragestellung, ob und unter welchen Rahmenbedingungen Wärmepumpen und Speichersysteme als Flexibilitäts Optionen im Kontext der Energiewende sinnvoll eingesetzt werden können. Die Betrachtung der Flexibilitäten geht im Rahmen des zellularen Ansatzes mit der Betrachtung übergeordneter Zellebenen über die Betrachtung einzelner Gebäude hinaus. Es werden dabei zwar zunächst unterschiedlich dimensionierte thermische Speicher und Wärmepumpen und die Auswirkungen auf die verfügbare Flexibilität untersucht, für die weiterführenden Betrachtungen werden jedoch ausschließlich unter ökonomischen Gesichtspunkten üblich dimensionierte Speicher und Wärmepumpensysteme einbezogen.

Ein weiteres Feld ist die ökonomische Optimierung der eingesetzten Systemkomponenten. *Angenendt et al.* stellen in [1] ein detailliertes gekoppeltes thermisch-elektrisches Modell eines Einfamilienhauses mit Photovoltaikanlage, Batteriespeicher und Wärmepumpe mit thermischem Speicher vor. Neben der Analyse verschiedener Strategien für den Betrieb der thermischen und elektrischen Komponenten, wird ebenfalls der Nutzen kombinierter Betriebsstrategien betrachtet. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf der ökonomisch optimierten Dimensionierung der Systemkomponenten. Die Ergebnisse der durchgeführten Fallstudie zeigen, dass integrierte Systeme mit Photovoltaik, Batteriespeicher und Wärmepumpe ökonomisch vorteilhaft gegenüber Wohngebäuden mit fossilen Heizsystemen und Versorgung ausschließlich aus dem elektrischen Netz sind.

1.2 Forschungslücke

Aus den zuvor genannten Literaturstellen geht hervor, dass bisherige Arbeiten stets unter der Prämisse der wirtschaftlichen Auslegung den Einsatz von Wärmepumpen und Speichern im Wohngebäudesektor untersuchen ([1], [54]). Dabei steht der wirtschaftliche Nutzen beziehungsweise die Erhöhung der Autarkie im Fokus. Andere Arbeiten ([42], [28]) untersuchen zwar die Rückwirkungen auf das elektrische Energiesystem, jedoch ebenfalls vor dem Hintergrund heute wirtschaftlicher beziehungsweise nahezu wirtschaftlicher Systemauslegungen (vgl. Abschnitt 2.1). Der Einsatz größerer elektrischer und thermischer Speichersysteme und der Einfluss dieser auf die Rückwirkungen auf das umgebende System werden bisher nicht thematisiert. *Terlow et al.* identifizieren ebenfalls die Untersuchung der Austauschbarkeit von elektrischen und thermischen Energiespeichern als Forschungslücke [49], wobei sich die Untersuchung der Austauschbarkeit ebenfalls auf den heute wirtschaftlich einsetzbaren Bereich der thermischen und elektrischen Speicherkapazitäten beschränkt. Weiterhin bleibt der Einfluss geänderter Umgebungsbedingungen, wie etwa Temperatur, globale Einstrahlung und vorherrschende Windgeschwindigkeit in der bestehenden Literatur weitgehend unberücksichtigt.

1.3 Forschungsfragen und Struktur der Arbeit

Vor dem oben erläuterten Hintergrund werden die nachfolgend genannten Ziele der Arbeit definiert und anhand dieser die Struktur der Arbeit dargelegt. Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses elektrischer und thermischer Speicherkapazitäten auf die Netzbelastung in wärmepumpenbeheizten Einfamilienhäusern. Daraus werden folgende Teilfragen abgeleitet, welche im Rahmen dieser Arbeit mittels der Ergebnisse der auf Basis der entwickelten Modelle durchgeführten Simulationsstudien beantwortet werden.

1. Welchen Einfluss hat der Erzeugungsmix beim Einsatz elektrischer und thermischer Speicherkapazitäten auf die maximale Belastung des elektrischen Netzes bei wärmepumpenbeheizten Einfamilienhäusern?

Als Grundlage der mathematischen Systembeschreibung werden im Kapitel 2 zunächst die verwendeten Eingangsdaten und Modelle der eingesetzten Systemkomponenten (Wärmepumpe, elektrischer Speicher, Heizungs- und Trinkwarmwasserspeicher, Windenergie- und Photovoltaikanlagen) erläutert. Im Kapitel 3 wird aufbauend auf den Komponentenmodellen und den getroffenen Annahmen aus Kapitel 2 ein thermisch-elektrisches Gesamtmodell, als Zulässigkeitsbedingungen eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems, erstellt. Das Energiemanagement, formuliert als Zielfunktion des Optimierungsmodells, steuert dabei die Entlastung des elektrischen Netzes (Leistungsbezug und -rückspeisung), die Steigerung des Vorortverbrauchs der eigenerzeugten regenerativen elektrischen Energie sowie den möglichst energieeffizienten Wärmepumpenbetrieb mit hoher Leistungsziffer. Die Validierung des Modells erfolgt anhand der unter heutigen Bedingungen wirtschaftlichen Auslegung des Energiesystems eines Einfamilienhauses (vgl. Abschnitt 2.1) anhand einschlägiger Literatur ([16], [1], [45], [54]).

Im Kapitel 4 werden zunächst die Varianten für die Untersuchung des Energiesystems des Einfamilienhauses hinsichtlich der eingesetzten Speicherkapazitäten und des Erzeugungsmixes, sowie geänderter Umgebungsbedingungen (Wetterdaten) und des Dämmstandards vorgestellt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse hinsichtlich der maximalen Belastung des elektrischen Verteilnetzes sowie der erreichten Autarkiegrade dargestellt und die betrachteten Varianten vergleichend diskutiert.

2. Wie beeinflussen sich die Minimierung der Netzbelastung und die Minimierung der Speicherkapazitäten in wärmepumpenbeheizten Einfamilienhäusern im Hinblick auf den optimalen Erzeugungsmix?

Aufbauend auf den Ergebnissen des thermisch-elektrischen Optimierungsmodells (Kapitel 3) wird ein Metamodell zur Beschreibung der Abhängigkeit der maximalen Netzbelastung von der Größe der eingesetzten Speicherkapazitäten abgeleitet.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Erstellung des Metamodells zur Beschreibung der Abhängigkeit der maximal mit dem elektrischen Netz ausgetauschten Leistung wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Das entwickelte Metamodell beschreibt die Abhängigkeit der Netzbelastung vom Einsatz verschiedener elektrischer und thermischer Speicherkapazitäten sowie vom regenerativen Erzeugungsmix. In Kapitel 6 wird das Metamodell innerhalb eines nicht-linearen mathematischen Optimierungsmodells verwendet, um den gesamtenergiesystemisch optimalen Auslegungspunkt des Systems unter Berücksichtigung der Netzkosten und der Komponentenkosten zu bestimmen.

3. Welchen Beitrag zur Netzentlastung leisten wärmepumpenbeheizte Einfamilienhäuser mit derzeit üblicher Speicherdimensionierung in einem EE-dominierten Energiesystem?

Das abschließende Kapitel 7 nutzt das in Kapitel 5 entwickelte Metamodell, um den Einfluss von aus heutiger Sicht realistischen Speicherkapazitäten im Einfamilienhaus auf die Reduktion der maximalen Belastung des elektrischen Netzes zu untersuchen. Weiterhin werden auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudien die heute übliche Speicherdimensionierung in Bezug zu den erforderlichen Kapazitäten zum Erreichen sehr hoher Autarkiegrade dargestellt.

2 Modellierung der Systemkomponenten

2.1 Niedrigenergiehausstandard mit heute üblicher Systemauslegung als Referenzgebäude

Als Referenzgebäude wird ein Einfamilienhaus im Niedrigenergiehausstandard mit einer Wohnfläche von 140m^2 herangezogen, welches mit drei vollberufstätigen Personen bewohnt ist. In dieser Arbeit wird dieser Gebäudestandard mit der Kurzbezeichnung SFH30 (engl. single family house (SFH)) benannt. Basierend auf den Daten des Statistischen Bundesamtes zur Wohngebäudeentwicklung [46] sowie der in [15] angegebenen Werte zur Errichtung von Effizienzhäusern, beträgt der Anteil dieses Gebäudestandards am Einfamilienhauszubau in den Jahren 2010 bis 2020 etwa 14% und einem Gesamtanteil an Einfamilienhäusern von etwa 1%.

Zur bilanziellen Eigenversorgung aus 100% regenerativen Quellen kommt eine Photovoltaikanlage zum Einsatz, welche eine installierte Leistung von $6,64\text{kW}$ aufweist (vgl. Abschnitt 3.2). Basierend auf den gültigen technischen Regeln wird für den elektrischen Bedarf ein Wert von jährlich 1750kWh pro Person und für den Warmwasserbedarf ein Wert von jährlich 500kWh pro Person [59] angenommen. Der Heizenergiebedarf ergibt sich abhängig von den herrschenden Umgebungsbedingungen für den angenommenen Gebäudestandard zu einem Wert von jährlich etwa $3,2\text{MWh}$. Ausgehend vom thermischen Gebäudestandard wird die Wärmepumpe mit einer elektrischen Nennleistung von $1,43\text{kW}$ ausgelegt, was nach den in [63] zusammengefassten Monitoringdaten einem typischen Wert für den Niedrigenergiehausstandard entspricht.

Hinsichtlich der eingesetzten Speicherkapazitäten werden in Anlehnung an [63] für den Heizungsspeicher ein Volumen von $0,57\text{m}^3$ und für den Trinkwarmwasserspeicher ein Volumen von $0,3\text{m}^3$ angesetzt. Die in [63] angegebenen Werte basieren auf Monitoringprojekten für den Wärmepumpeneinsatz und können somit als derzeit übliche Werte für die Auslegung der Speicherkapazitäten angesehen werden. Als zusätzliche Komponente wird ein Lithium-Ionen-Batteriespeicher eingesetzt, welcher in Anlehnung an [62] mit einer nutzbaren Kapazität von $6,56\text{kWh}$ angenommen wird. Dieser Wert basiert auf dem Marktstammdatenregister und spiegelt somit ebenfalls eine derzeit typische Auslegung wider. Tabelle 2.1 fasst die getroffenen Annahmen zusammen und verweist auf die zugehörigen Abschnitte dieses Kapitels.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der zentralen Annahmen zum verwendeten Referenzgebäude.

Angegeben sind die grundlegenden Annahmen zur heute üblichen Systemauslegung. Weiterhin wird auf die verwendete Literatur sowie die zugehörigen Abschnitte dieser Arbeit verwiesen.

	Details	Literatur	Abschnitt
Gebäudetyp	Einfamilienhaus mit Niedrigenergiehausstandard (Heizenergiebedarf etwa 30 kWh/m ² a, Bezeichnung SFH30), Wohnfläche: 140 m ² bewohnt mit drei Personen	[21], [54]	2.6
Heizwärmebedarf	abhängig von den Umgebungsbedingungen mit Parametern des Gebäudetyps SFH30 (siehe oben) berechnet	[54]	2.6.1
Trinkwarmwasserbedarf	500 kWh/a pro Person	[59]	2.6.2
elektrischer Energiebedarf	1750 kWh/a pro Person	[59]	2.5
Wärmepumpe	modulierende monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe, im Gebäudestandard SFH30 mit 1,43 kW elektrischer Nennleistung	[16], [54], [22]	2.8
Heizungsspeicher	Speichervolumen 0,57 m ³ im Temperaturbereich 35...45 °C Speichervolumenabhängige Verluste nach DIN EN 12977	[63], [13]	2.7
Warmwasserspeicher	Speichervolumen 0,3 m ³ im Temperaturbereich 40...60 °C Speichervolumenabhängige Verluste nach DIN EN 12977	[63], [13]	2.7
Batteriespeicher	Lithium-Ionen-Speicher mit nutzbarer Speicherkapazität von 6,56 kWh	[61], [33], [17]	2.9

2.2 Meteorologische Eingangsdaten

Für die Betrachtung des auf den regenerativen Energien Windkraft und Photovoltaik basierenden Energiesystems, bei dem insbesondere auch der temperaturabhängige Heizenergiebedarf berücksichtigt wird, werden konsistente meteorologische Eingangsdaten benötigt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zur Ermittlung der optimalen Systemauslegung repräsentative Basisdaten zum Einsatz kommen [20]. Grundlage der Zeitreihensimulation bilden daher die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes, in denen örtlich hoch aufgelöste Datensätze der Witterungsverhältnisse in stündlichen Zeitintervallen zur Verfügung stehen. Diese Datensätze basieren auf langjährigen Messungen und Beobachtungen an einer Vielzahl deutscher Stationen und wurden mittels geeigneter Modelle und Methoden für die Gesamtfläche Deutschlands interpoliert [11]. Basierend auf der langjährigen Datengrundlage werden gemäß der Vorgaben in [12] Zeitreihen der verschiedenen meteorologischen Parameter derart zusammengesetzt, dass die Testreferenzjahre somit die langjährigen Witterungsverhältnisse der jeweiligen Standorte repräsentieren, ohne dass Extremereignisse einzelner Jahre berücksichtigt werden.

Tabelle 2.2: Referenzstationen der 15 deutschen Klimaregionen.

Aufgeführt sind die Klimaregionen in Deutschland und die zugehörigen Referenzstandorte nach [6], für welche im Jahr 2011 die Testreferenzjahre des Deutschenwetterdienstes erstellt wurden. Diese werden zur Auswahl eines Standortes für das betrachtete Gebäude herangezogen.

#	Region	Referenzstation
1	Nordseeküste	Bremerhaven
2	Ostseeküste	Rostock-Warnemünde
3	Nordwestdeutsches Tiefland	Hamburg-Fuhlsbüttel
4	Nordostdeutsches Tiefland	Potsdam
5	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland	Essen
6	Nördl. und westl. Mittelgebirge, Randgebiete	Bad Marienberg
7	Nördl. und westl. Mittelgebirge, zentrale Bereiche	Kassel
8	Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen)	Braunlage
9	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland	Chemnitz
10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m	Hof
11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald (über 1000 m)	Fichtelberg
12	Oberrheinraben und unteres Neckartal	Mannheim
13	Schwäbisch-fränkisches Stufenland, Alpenvorland	Mühlendorf/Inn
14	Schwäbische Alb und Baar	Stötten
15	Alpenrand und -täler	Garmisch-Partenkirchen

In Anlehnung an die Einteilung Deutschlands in 15 Klimaregionen [6] werden Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Außentemperaturen für 15 repräsentative Standorte (vgl. Tabelle 2.2) ausgewertet. Abbildung 2.1 zeigt Boxplots der Außentemperaturen sowie der Tagesmittelwerte der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit für das Wetterjahr 2015J, welches ein durchschnittliches Jahr der aktuellen klimatischen Bedingungen widerspiegelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden außerdem weitere Wetterjahre zur Abbildung extremer und zukünftiger Witterungsverhältnisse verwendet (vgl. Abschnitt 4.1).

Abbildung 2.1a zeigt Boxplots der Luftaußentemperaturen der 15 in Tabelle 2.2 genannten deutschen Klimaregionen. Erwartungsgemäß liegt der Median der Temperaturen für die Regionen 8, 10 und 11 (Mittelgebirge) unterhalb derer der anderen Regionen. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Außentemperaturen für die Region 12 (Oberrheingraben) höher sind, als für die anderen Klimaregionen. Zusätzlich stellt Region 15 (Alpenrand und -täler) hinsichtlich der vergleichsweise unsymmetrischen Temperaturverteilung eine Ausnahme dar. Die Verteilung der Temperaturen in den übrigen Regionen ist erwartungsgemäß ähnlich.

Hinsichtlich der in Abbildung 2.1b dargestellten Tagesmittelwerte der Globalstrahlung ergeben sich zwischen den 15 betrachteten Klimaregionen keine nennenswerten Abweichungen. Bei der Betrachtung der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten in Abbildung 2.1c ist ein auffällig hoher Mittelwert in der Region 11 (Referenzmessstation Fichtelberg) hervorzuheben, in welcher gleichzeitig auch die breiteste Streuung der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit auftritt. Die geringste Streuung bei gleichzeitig geringstem Mittelwert tritt in der Region 15 (Alpenrand und -täler) auf. Die Region 3 (Nordwestdeutsches Tiefland mit Referenzmessstation Hamburg-Fuhlsbüttel) stellt hinsichtlich des Mittelwertes sowie der Streubreite der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit einen durchschnittlichen Standort dar. Gleiches gilt für die in Abbildung 2.1a dargestellten Temperaturen.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Verhältnisse, werden die Klimadaten der Region 3 für die Untersuchung des thermisch-elektrischen Energiesystems ausgewählt. Neben dem Testreferenzjahr 2015J, welches die derzeit vorherrschenden durchschnittlichen Wetterverhältnisse repräsentiert, werden ebenfalls die Extremwetterjahre 2015W und 2015S, die jeweils ein extremes Winterhalbjahr (2015W) beziehungsweise ein extremes Sommerhalbjahr (2015S) beinhalten, zur Verfügung gestellt. Weiterhin stellt das Testreferenzjahr 2045J ein durchschnittliches Wetterjahr dar, welches die heute prognostizierten Einflüsse des Klimawandels berücksichtigt. Die verschiedenen Wetterjahre werden, wie in Abschnitt 4.1 erläutert, für die Untersuchung des Einflusses geänderter meteorologischer Eingangsdaten herangezogen.