

Bachelor-Thesis

Auswirkungen energetischer Gebäudesanierung auf ein
Verteilnetz - Bewertung anhand eines Optimierungsmodells

Verfasser: Franz Irrenberg

Betreuer: Charlotte Senkpiel (M. Eng.) & Noha Saad Hussein (M.Sc.)

Erstkorrektor: Prof. Dr. Carsten F. Dormann

Zweitkorrektor: Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Abgabedatum: 30. September 2015

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder in ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Freiburg, den 29.09.2015

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit wurde als Teil des Forschungsprojektes "StroWae – Analyse einer Marktrolle zur Optimierung der dezentralen Strom-Wärmenutzung" am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme verfasst. Die Zielsetzung besteht darin die Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsstandards verschiedener Wohngebäude auf ein Wärmeverteilnetz zu analysieren. Dazu wird der Gebäudebestand des Verteilnetzes analysiert und eine Einteilung in repräsentative Referenzgebäude vorgenommen, sowie Sanierungsstandards nach den Mindestanforderungen zu den Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudebauteile durch die gesetzliche Energieeinsparungsverordnung und einem Passivhaus-Dämmstandard des Förderprogramms der Kreditanstalt für Wiederaufbau gewählt. Auf Basis dieser Ausgangsdaten wurde mit einem statistischen Lastprofilgenerator des Fraunhofer ISE der Wärmebedarf der Referenzgebäude in allen Sanierungsstandards bestimmt, anhand dessen ausführlich die Energieeinsparung durch die Sanierungen untersucht wird. Mit dem Wärmebedarf als Input wird durch ein projektinternes Modell ein optimales Versorgungssystem minimaler Kosten in zwei Szenarien für alle Referenzgebäude in dem jeweiligen Sanierungszustand berechnet. Das erste Szenario basiert auf einer Fernwärme-Ausgangsversorgung der Referenzgebäude und liefert als Ergebnis eine von den Sanierungen unabhängige, fast ausschließlich mit Solarthermie betriebene Wärmeerzeugung, worauf hin ein weiteres Szenario mit derselben Ausgangsversorgung, aber einer Erhöhung der solarthermischen Kostenparameter um die eines Wärmespeichers betrachtet wird. Die Erhöhung der Kostenparameter bewirkt keine Veränderung in der Konstellation der zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzten technischen Anlagen, hat aber einen starken Einfluss auf die Zusammensetzung der gesamten Systemkosten. Für beide Szenarien kann festgestellt werden, dass die Gesamtsystemkosten eine Reduktion gleicher prozentualer Höhe durch die Sanierungen erfahren und die Gesamtsystemkosten im Wesentlichen durch die in der Betriebsführung der technischen Anlagen anfallenden Kosten bestimmt werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Einheitenverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Motivation	10
1.2 Zielsetzung und Aufbau	11
1.3 Politischer Rahmen	12
1.4 Stand der Wissenschaft	12
2 Methodik	14
2.1 Wahl der Gebäude	15
2.2 Wahl der Sanierungsstandards	17
2.3 Darstellung und Vergleich des Wärmebedarfs	18
3 Beschreibung des Optimierungsmodells	22
3.1 Modell-Input	23
3.2 Struktur und Funktion	24
4 Auswertung der Szenarien	26
4.1 Basisszenario	26
4.1.1 Technologiezubau	27
4.1.2 Betriebsführung	28
4.1.3 Kosten	35
4.2 Alternativszenario	36
5 Diskussion und Ausblick	37

Literaturverzeichnis	39
Anhang	41
A Wärmebedarf	41
B Wärmenetz	46
C Gebäudegrenzwerte	46
D Ergebnisse der Betriebsführung	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise	14
Abbildung 2: Aufteilung des Gebäudebestands nach Wohneinheiten (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)	16
Abbildung 3: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen	20
Abbildung 4: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen	21
Abbildung 5: Tagesverlauf der SynPro-Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen	22
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Wärmeverbundnetzes	24
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Modellstruktur.....	26
Abbildung 8: Ergebnisse der zugebauten Leistung verschiedener Technologien für alle Referenzgebäude im gesamten Jahr	27
Abbildung 9: Berechnete Volllaststunden der zugebauten Leistung nach Technologie für alle Referenzgebäude im gesamten Jahr	28
Abbildung 10: Ergebnisse der Wärmeerzeugung verschiedener Technologien als Anteile am Wärmebedarf des ganzen Jahres für alle Referenzgebäude.....	29
Abbildung 11: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar	30
Abbildung 12: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember	31
Abbildung 13: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar	32
Abbildung 14: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember	32
Abbildung 15: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar	33

Abbildung 16: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember	34
Abbildung 17: Vergleich der optimierten Kosten des Basisszenarios für alle Sanierungsstandards	35
Abbildung 18: Vergleich der optimierten Kosten beider Szenarien für alle Sanierungsstandards.....	37
Abbildung 19: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen	41
Abbildung 20: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen	41
Abbildung 21: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen	42
Abbildung 22: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen	42
Abbildung 23: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen	43
Abbildung 24: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen	43
Abbildung 25: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen	44
Abbildung 26: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen	44
Abbildung 27: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen	45
Abbildung 28: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar	47
Abbildung 29: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember	47
Abbildung 30: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar	48
Abbildung 31: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember	48

Abbildung 32: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar	49
Abbildung 33: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember	49
Abbildung 34: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar	50
Abbildung 35: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember	50
Abbildung 36: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar	51
Abbildung 37: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember	51
Abbildung 38: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar	52
Abbildung 39: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember	52
Abbildung 40: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar	53
Abbildung 41: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember	53
Abbildung 42: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar	54
Abbildung 43: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember	54
Abbildung 44: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar	55
Abbildung 45: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauphysikalische Eigenschaften der Referenzgebäude (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)	16
Tabelle 2: Anforderungen an die U-Werte von Gebäudebauteilen, nach (Feldmann 2012).....	17
Tabelle 3: Vergleich des Jahreswärmebedarfs der durch SynPro berechneten Lasten.....	19
Tabelle 4: Input-Parameter der technischen Anlagen bei der Optimierung (Datengrundlage: Fraunhofer ISE).....	23
Tabelle 5: Vordefiniertes Wärmeverbundnetz (Datengrundlage: Fraunhofer ISE).....	46
Tabelle 6: Grenzwerte der installierbaren Leistung nach Art der Technologie (Datengrundlage: Fraunhofer ISE).....	46

Abkürzungsverzeichnis

EEV	Endenergieverbrauch
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
EnEV	Energieeinsparungsverordnung
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
dena	Deutsche Energieagentur
TRY	Testreferenzjahr
DWD	Deutscher Wetterdienst
WSchV	Wärmeschutzverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MFH	Mehrfamilienhaus
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² *K)]

Einheitenverzeichnis

W	Watt
kW	Kilowatt
KWh	Kilowattstunden
m	Meter
K	Kelvin
a	Jahr

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch ein weltweit auf endlichen fossilen Ressourcen basierendes System werden die Menschen in den kommenden Jahren vor viele Herausforderungen gestellt (BMW i 2012). Ein damit einhergehendes ökologisches Problem ist unter anderem der Klimawandel, der durch die Wachstumsrate der Emissionen von 3% pro Jahr kontinuierlich unterstützt wird (Olivier et al. 2013). Ebenso wichtig sind die grundsätzlichen Abhängigkeiten von fossilen Brennstoffen, sodass ohne Güterverkehr bereits nach drei Tagen die Regale in deutschen Supermärkten leer wären (Martens 2014). Darüber hinaus sind ökonomische Folgen bereits unübersehbar, wie die so genannten "Ewigkeitskosten" der auf unabsehbare Zeit laufenden Grundwasserpumpen im Ruhrgebiet, das durch den Steinkohleabbau abgesunken ist (Knauer 2014). Eine Umgestaltung der Energieversorgung ist also unbedingt erforderlich.

In Anbetracht dessen hat die Bundesregierung im Energiekonzept 2010 einige Klimaschutzziele für 2050 definiert. So sollen die Treibhausgasemissionen um mindestens 80% gegenüber 1990 sinken, der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 60% steigen und der Primärenergiebedarf sogar um 80% reduziert werden (Bundesregierung 2010).

Gegenwärtig ist der Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Wärmemix mit rund 10% noch deutlich geringer als im Strommix mit rund 26% (Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. 2014). Dabei spielt die Wärmebereitstellung eine entscheidende Rolle in der Energieversorgung, da 2012 insgesamt 53% des gesamten Endenergieverbrauchs dafür verwendet wurden (Ziesing et al. 2013).

Allein der Gebäudebereich bestimmt rund 40% des deutschen Endenergieverbrauchs, sowie ein Drittel der CO₂-Emissionen (Bundesregierung 2010). Der Handlungsbedarf nach Energieeinsparungen in diesem Sektor wird nicht weniger dadurch deutlich, dass sich die derzeitige Sanierungsrate bei 1% pro Jahr befindet, obwohl Altbauten über 85% des gesamten Gebäudebestandes ausmachen und drei Viertel noch vor der 1. Wärmeschutzverordnung 1979, ohne energetische Vorgaben, errichtet wurden (Bundesregierung 2010).

Eine Energiesystemtransformation weg von fossilen Brennstoffen, hin zu erneuerbaren Energien bringt vor allem durch das schwankende Angebot von Sonne und Wind starke Fluktuationen mit sich, die eine Herausforderung für den Systemwandel darstellen. Interessant ist dabei vor allem der Ansatz, Maßnahmen und Veränderungen in einem Gebiet mit mehreren Gebäuden kollektiv abgestimmt zu betrachten, gegenüber der Optimierung einzelner Gebäude. Dazu wird derzeit am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ein umfassendes Modell im Rahmen des Projektes "StroWae" entwickelt, um eine neue Marktrolle zur Optimierung der gekoppelten, dezentralen Strom- und Wärmenutzung in einem Verteilnetz zu analysieren. Dabei geht es darum, Anreize für den Ausbau und Betrieb erneuerbarer Energien zu schaffen, sowie Flexibilitätsmechanismen und Effizienzmaßnahmen zu nutzen.

Die energetische Gebäudesanierung ist eine wichtige, zu betrachtende Maßnahme im Kontext der Energieeffizienz des gesamten Systems. Aus diesem Grund wird sich diese Arbeit als Teil des Gesamtmodells im Wesentlichen mit der Analyse der Effekte unterschiedlicher Sanierungsstandards von Referenzgebäuden in einem Wärmeverteilnetz beschäftigen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse und anschließende Bewertung von Effekten unterschiedlicher Sanierungsstandards verschiedener Wohngebäude auf ein Wärmeverteilnetz. Dieses baut auf realen Daten auf und wird durch ein Optimierungsmodell abgebildet, anhand dessen dann die Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen auf das System in unterschiedlichen Ausgangssituationen bzw. Szenarien berechnet werden. Der Input ist dabei der Wärmebedarf, der durch thermische Lastprofile des Wohngebäudebestands dargestellt ist, welche durch einen statistischen Lastprofilgenerator bestimmt wurden. Der Output besteht aus einem optimalen Versorgungssystem mit minimalen Kosten der Betriebsführung und Investitionen in den Zubau technischer Anlagen zur Wärmeerzeugung. Entscheidende Fragestellungen, die analysiert werden sind:

- Welche Effekte bringen die Sanierungen mit sich?
- Wie wirken sich die Sanierungen auf die Systemkosten aus?

Die vorliegende Arbeit gliedert sich nachfolgend in 5 Kapitel. Kapitel 1 gibt eine Einführung in das Thema der Arbeit. Es werden die aktuellen Herausforderungen erläutert, die Notwendigkeit für die Transformation des deutschen Gebäudesektors, sowie der politische Rahmen gezeigt und auf den Stand der Wissenschaft eingegangen.

Es folgt in Kapitel 2 die Beschreibung der Methodik, bei der zunächst Referenzgebäude und Sanierungsstandards ausgewählt werden. Diese dienen als Grundlage zur Berechnung des Wärmebedarfs, der erläutert und grafisch untersucht wird.

In Kapitel 3 wird das der Arbeit zugrunde liegende Optimierungsmodell beschrieben. Es wird der Input-Rahmen des Modells beschrieben, die Modellstruktur veranschaulicht und die Funktionsweise erläutert, um dann für das jeweilige Szenario ein kostenoptimales System nach verschiedenen Sanierungsstandards zu berechnen.

Daraufhin werden in Kapitel 4 die berechneten Szenarien aufgeführt und ausgewertet, basierend auf den oben genannten Fragestellungen. Dazu werden diese im Wesentlichen auf Variation untersucht, wichtige Effekte dargestellt und besondere Richtungen von Impulsen oder Regelmäßigkeiten aufgezeigt, wie zum Beispiel der vermehrte Einsatz von Technologien eines bestimmten Energieträgers.

Die in der Arbeit gewonnenen Ergebnisse werden in Kapitel 5 zusammengefasst und diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaufgaben gegeben.

1.3 Politischer Rahmen

In Anbetracht des großen Energie- und CO₂-Einsparpotentials im Gebäudebereich hat die Bundesregierung im Energiekonzept 2010 die energetische Modernisierung des Gebäudebestandes als zentralen Schlüssel zur Energiewende aufgezeigt, sowie als wichtigste Maßnahme zur Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger und Minderung der Abhängigkeiten von Energieimporten (Bundesregierung 2010). Das zentrale Ziel dabei ist ein bis 2050 nahezu klimaneutraler Gebäudebestand. Das heißt, der Primärenergiebedarf soll um 80% reduziert werden und der Wärmebedarf bis 2020 um 20% sinken. Dafür wird eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate von jährlich etwa 2% vorausgesetzt (Bundesregierung 2010).

Zur Umsetzung der Ziele sind die relevanten Instrumente die Energieeinsparverordnung (EnEV), sowie das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG). In dieser Arbeit sind vor allem die Anforderungen für Sanierungen im Wohngebäudebestand relevant, die in der EnEV 2014 definiert werden, aber seit der EnEV 2009 nicht weiter verschärft wurden. Die Vorgaben richten sich nach Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust, wobei für Änderungen an der Gebäudehülle, wie zum Beispiel Dämmungen, Höchstwerte für den Wärmedurchgang einzelner Bauteile angegeben sind (Feldmann 2012).

Um das Ziel einer doppelten Sanierungsrate erreichen zu können, hat die Bundesregierung darüber hinaus Sanierungs-Förderprogramme bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) aufgelegt (Bundesregierung 2010). Die Förderungen beinhalten Tilgungszuschüsse und Zinsverbilligungen bei der Kreditaufnahme, sowie Kostenzuschüsse bei Investitionen. Die für diese Arbeit relevanten Förderungsprogramme sind dabei verschiedene Effizienzhaus-Standards der KfW, bei denen auf Grundlage der EnEV 2009 auch jeweils der Wärmedurchgang einzelner Bauteile vorgegeben wird (Feldmann 2012). Diese werden in Kapitel 2.2 genauer erläutert.

1.4 Stand der Wissenschaft

Aktuelle Forschung im Bereich der Energiesystemoptimierung, mit Blick auf die Erschließung von Effizienzpotentialen im Gebäudebereich und der Integration erneuerbarer Energien im Wärmesektor, wird vor allem durch das BMWi vorangetrieben und finanziert. Ein im Kontext dieser Arbeit relevantes Förderungskonzept des BMWi, bei dem besonders das systemische Zusammenwirken von energieoptimierten Gebäuden und Quartieren im Fokus steht, ist die "energieeffiziente Stadt - EnEff: Stadt" (BMW 2014). Herausforderungen dabei sind die Fluktuationen und Unregelmäßigkeiten durch Dezentralisierung von Strom- und Wärmezeugung, aber auch die sich wandelnden Gebäudetechnologien auf Verteilnetze. Mit dieser Thematik beschäftigen sich die im Folgenden dargestellten Projekte.

Ein Forschungsprojekt, in dem intelligente Energiesysteme untersucht und die thermische Komponente in die Betrachtung einbezogen wurde, ist "EnEFF: Stadt - Smart Energy Management".

Dabei ging es um Möglichkeiten für die Verbesserung eines aktiven Last- und Erzeugungsmanagements dezentraler Systeme und um die Schaffung finanzieller Anreize. Für die thermische Betrachtung wurden mit einem Tool der TU-Dresden numerisch Daten für ein repräsentatives Wärmeverteilnetz samt Verbraucher ermittelt und anschließend mit einem Optimierungstool verbunden, um eine möglichst kostengünstige Einsatzplanung zu erreichen. Als Ergebnis der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Möglichkeit der Nutzung des thermischen Verteilnetzes als Wärmespeicher Vorteile bietet und theoretisch gut geeignet sei, um speziell thermische Lastspitzen abzufangen (Felsmann et al. 2012).

Eine Studie, bei der untersucht wurde, wie ein kostenoptimales Energiesystemmodell der Zukunft aussieht, welches das Mindestziel einer Absenkung der CO₂ Emissionen um 80 % erreicht, ist "Energiesystem Deutschland 2050" des Fraunhofer ISE. Wichtige Ergebnisse daraus sind, dass der moderate Ausbau von Wärmenetzen, die durch Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen unterschiedlicher Leistungsklasse versorgt werden, nützlich erscheint und bei ambitionierten Klimaschutzziele eine weitgehende energetische Gebäudesanierung im Kontext des Gesamtsystems auch aus Kostengründen sinnvoll ist. Allerdings spielt Erdgas als fossiler Energieträger noch eine wesentliche Rolle im Gesamtsystem, sodass Techniken, die Erdgas nutzen, wie KWK-Anlagen, auch noch im Wärmesektor vorkommen. Die jährlichen Gesamtkosten für die Volkswirtschaft sind nach dem Umbau der Energieversorgung in der gleichen Größenordnung wie heute. Im Gegensatz wäre eine Energieversorgung wie heute im Jahr 2050 wesentlich teurer, da mit einem Anstieg der Weltmarktpreise für fossile Energieträger zu rechnen ist. Dabei gibt es weiteren Forschungsbedarf, sodass als nächste Weiterentwicklungen an dem Modell Detaillierungen von Versorgungskonzepten im Gebäudesektor und im Bereich der Mobilität geplant sind (Henning & Palzer, 2013).

Mit den Schwierigkeiten der Fluktuation erneuerbarer Energien im Energiesystem, durch das schwankende Angebot von Sonne und Wind, beschäftigt sich das aktuelle Forschungsvorhaben "EnEFF: Stadt - Kommunale Strom- und Wärmenetze integriert planen und optimieren", bei dem es um Entwicklung von Planungs- und Optimierungsmodellen geht. Ziel ist, die kommunalen Energieerzeugungs- und Verteilstrukturen so auslegen zu können, dass die Anforderungen eines sich verändernden Strommarktes Rückgänge im Wärmebedarf durch Sanierungen bei der Netzplanung und Förderung von Technologien gesamtwirtschaftlich berücksichtigt, sowie Treibhausgasemissionen und Primärenergieeinsatz minimiert werden. Bisher wurden Netz- und Gebäudekostenmodelle, sowie Preis- und Technologieszenarien entwickelt. Darüber hinaus wurde von dem Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH ein Simulationstool für notwendige städtische Strom- und Wärmenetzerweiterungen durch wachsende Anteile an BHKW und Wärmepumpen entwickelt und parallel von der Universität Konstanz Algorithmen zur Optimierung des gebäudenahen Technologiemixes unter Berücksichtigung des notwendigen Netzausbaus untersucht (EnEFF: Stadt 2014).

In Kapitel 5 werden die, in der Zielsetzung beschriebenen, zentralen Fragestellungen dieser Arbeit in den Kontext des Standes der Wissenschaft eingeordnet und diskutiert. Daraus resultierend wird auf noch bestehenden beziehungsweise notwendigen Forschungsbedarf hingewiesen.

2 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise der Arbeit, die in Abbildung 1 veranschaulicht ist. Dabei werden zunächst aus dem Bestandssystem verschiedene repräsentative Mehrfamilienhäuser für die Optimierung ausgewählt. Darüber hinaus werden angelehnt an die EnEV und KfW, verschiedene Sanierungsstandards ausgewählt. Für diese werden die sich jeweils ergebenden Wärmedurchgangskoeffizienten der relevanten Gebäudekenngößen bestimmt. Die Gebäudeeigenschaften und Sanierungsstandards dienen als Input für die Erzeugung synthetischer Lastprofile, die grafisch untersucht werden. Mit der je nach Sanierungsstandard unterschiedlichen Wärmenachfrage wird dann das jeweilige Szenario als optimales System nach minimalen Gesamtsystemkosten berechnet.

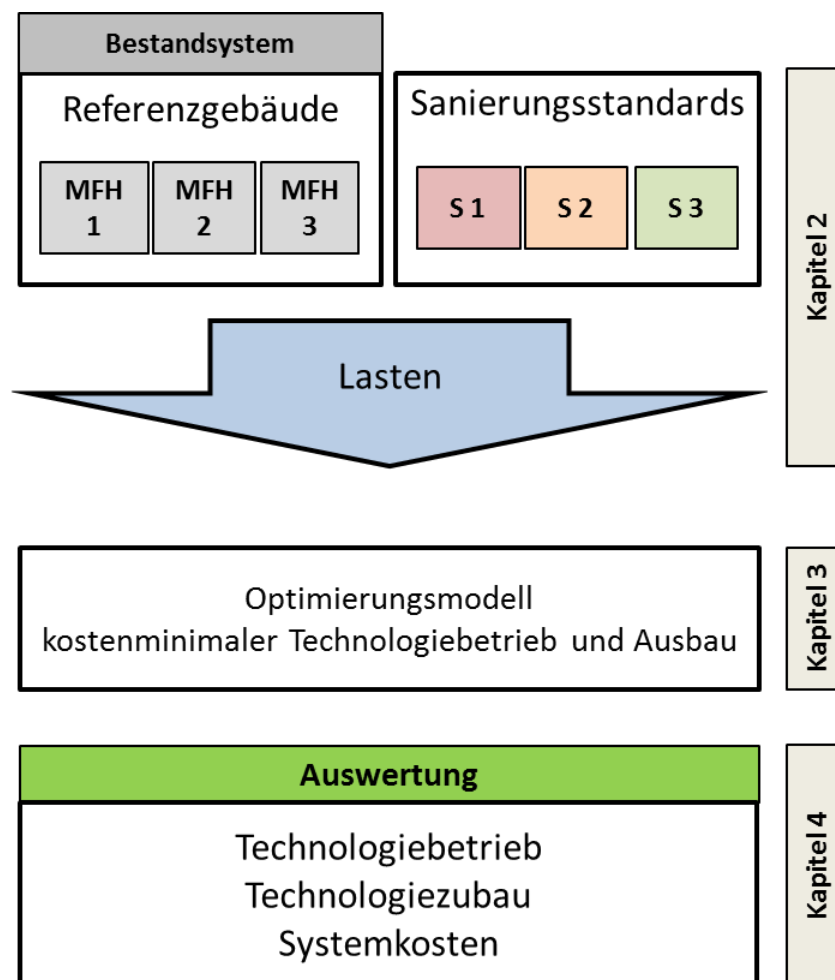


Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise

2.1 Wahl der Gebäude

Da diese Arbeit einen Teilbereich im Rahmen des Projektes "StroWae – Analyse einer Marktrolle zur Optimierung der dezentralen Strom-Wärmenutzung" des Fraunhofer ISE darstellt, können Daten und Berechnungen anderer institutsinterner Projekte genutzt werden. Das hier verwendete Optimierungsmodell bildet ein Verteilnetz ab, das näherungsweise einen Teil von Freiburg Weingarten darstellt. Aus diesem Grund werden die Gebäudedaten aus dem durch das Fraunhofer ISE begleitete Sanierungsprojekt "Weingarten 2020" verwendet. Dessen Ziel war, im Gegensatz zu der hier durchgeführten synthetischen Optimierung, die Planung, Umsetzung und messtechnische Analyse der energetischen Sanierungen und Energieversorgung des Stadtteils (Herkel et al. 2014). Der Gebäudebestand besteht aus Mehrfamilien- und Wohnhochhäusern, die sich durch die Anzahl der Stockwerke und Wohnungseinheiten unterscheiden. Im Wesentlichen kann der Bestand wie folgt zusammengefasst werden:

2-3 geschossige Mehrfamilienhäuser mit 4-16 Wohneinheiten (Kategorie 2-3)

4 geschossige Mehrfamilienhäuser mit 21-55 Wohneinheiten (Kategorie 4)

8-9 geschossige Mehrfamilienhäuser mit 33-120 Wohneinheiten (Kategorie 8-9)

16 geschossige Mehrfamilienhäuser mit 96 Wohneinheiten (Kategorie 16)

Dabei unterscheiden sich Gebäude mit gleicher Anzahl an Stockwerken und Wohnungseinheiten durch die stark rationalisierte und einfache Bauweise, wenn überhaupt nur sehr geringfügig in den Baueigenschaften. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit einzelne Referenzgebäude exemplarisch ausgewählt. Demnach wird stellvertretend jeweils eins der am häufigsten vorkommenden Gebäude nach Anzahl der Wohneinheiten für die genannten Kategorien ausgesucht. Die Referenzgebäude ergeben sich damit wie folgt:

Kategorie 2-3: besteht zu 45% aus Mehrfamilienhäusern mit 6 Wohneinheiten (MFH6)

Kategorie 4: besteht zu 75% aus Mehrfamilienhäusern mit 32 Wohneinheiten (MFH32)

Kategorie 8-9: besteht zu 50% aus Mehrfamilienhäusern mit 120 Wohneinheiten (MFH120)

Kategorie 16: besteht zu 100% aus Mehrfamilienhäusern mit 96 Wohneinheiten (MFH96)

In Abbildung 2 wird der Anteil der ausgesuchten Referenzgebäude am gesamten Gebäudebestand dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass diese vier Gebäudearten mit insgesamt 52% rund die Hälfte des gesamten Quartiers ausmachen. Die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude gehen direkt in die Berechnung der synthetischen Lastprofile ein, die in Kapitel 2.3 näher erläutert werden. Eine Übersicht der wichtigsten Referenzgebäudedaten liefert Tabelle 1. Darüber hinaus wird anhand der gewählten Referenzgebäude der Input Rahmen für die Optimierung in Kapitel 2.4 definiert.

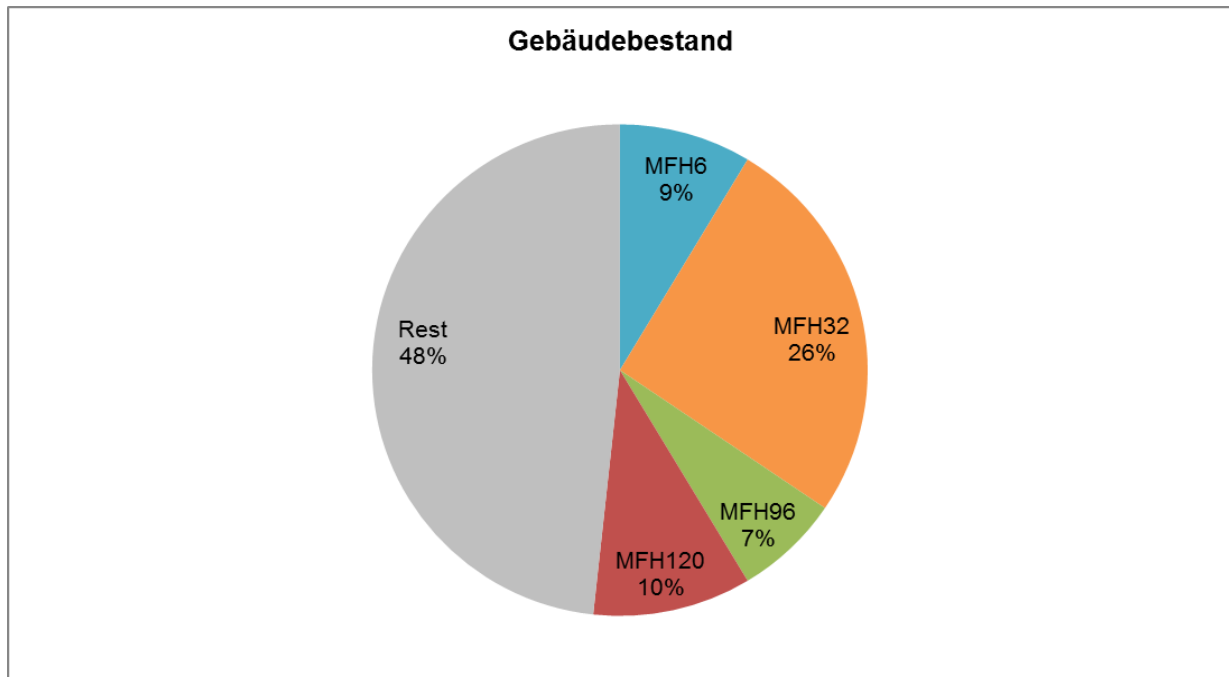


Abbildung 2: Aufteilung des Gebäudebestands nach Wohneinheiten (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)

Tabelle 1: Bauphysikalische Eigenschaften der Referenzgebäude (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)

Eigenschaften	Einheit	MFH6	MFH32	MFH96	MFH120
Baujahr		1968	1967	1967	1969
Ausrichtung - Azimut von Süd	[°]	0	0	0	0
Wohnfläche	[m ²]	515	1958	6519	8309
Raumhöhe	[m]	3	3	3	3
beheiztes Volumen	[m ³]	1287	4895	16298	20773
Wandfläche	[m ²]	27	1057	3436	3555
Dachfläche	[m ²]	195	726	592	1766
Bodenfläche	[m ²]	195	726	592	1763
Fensterfläche	[m ²]	11	657	1618	1406
Fensterfläche - Südausrichtung	[m ²]	6	253	555	118
Fensterfläche - Westausrichtung	[m ²]	5	75	476	558
Fensterfläche - Nordausrichtung	[m ²]	6	253	132	30
Fensterfläche - Ostausrichtung	[m ²]	5	75	454	700
U-Wert Wand	[W/m ² K]	1.02	1.02	1.02	1.02
U-Wert Dach	[W/m ² K]	0.30	0.72	0.30	0.29
U-Wert Boden	[W/m ² K]	0.57	0.57	0.57	0.57
U-Wert Fenster	[W/m ² K]	1.90	1.70	2.00	1.90

2.2 Wahl der Sanierungsstandards

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, werden die gesetzlichen Vorgaben für Änderungen im Wohngebäudebestand aktuell in der EnEV 2014 definiert, die allerdings seit der EnEV 2009 nicht weiter verschärft wurden. Dabei ergeben sich nach der Norm DIN-18599, aus einem zulässigen Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust eines Neubaus, die Höchstwerte des Wärmedurchgangs der zu sanierenden Bauteile. Diese Höchstwerte werden als Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) mit der Einheit $W/(m^2 \cdot K)$ angegeben. Auf Grundlage des zulässigen Primärenergiebedarfs der EnEV 2009 ergeben sich verschiedene Effizienzhaus-Standards der KfW. Demnach stellt ein KfW115-Effizienzhaus ein Gebäude mit 115% des Jahres-Primärenergiebedarfs eines vergleichbaren Neubaus nach 3 Absatz 1 EnEV2009 dar (Feldmann 2012).

Für diese Arbeit wird neben dem unsanierten Zustand der Referenzgebäude, ein Zustand betrachtet, der den gesetzlichen Mindestanforderungen für Änderungen im Gebäudebestand nach EnEV 2009 entspricht. Dafür eignet sich das KfW100-Effizienzhaus, da bei diesem, analog zu KfW115, der zulässige Jahres-Primärenergiebedarf mit 100% genau der eines EnEV2009-Neubaus ist. Ein weiterer Zustand ist, dass alle Referenzgebäude Passivhäusern entsprechen. Dabei wird das KfW55-Effizienzhaus, mit 55% Jahres-Primärenergiebedarf gegenüber EnEV2009, verwendet. Als zusätzliche Vorgabe für einen Passivhaus-Standard sind auch Lüftungskonzepte vorgeschrieben (Feldmann 2012), die jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Prinzipiell gibt es neben den umfassenden Sanierungen zu einem Effizienzhaus-KfW-Standard auch Einzelmaßnahmen, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet werden. Für die Berechnung des Wärmebedarfs nach umfassenden Sanierungen werden die, aus den Vorgaben der ausgewählten Effizienzhaus-Standards KfW100 und KfW55, notwendigen Kenngrößen in Form von U-Werten der Bauteile Außenwand, Fenster, Dach und Boden verwendet. Eine Übersicht der Daten liefert Tabelle 2.

Tabelle 2: Anforderungen an die U-Werte von Gebäudebauteilen, nach (Feldmann 2012)

Sanierungsgrad	KfW100	KfW55
U-Wert Außenwand [W/m^2K]	0.32	0.20
U-Wert Fenster [W/m^2K]	1.50	0.91
U-Wert Dachfläche [W/m^2K]	0.23	0.14
Fußboden [W/m^2K]	0.40	0.25

2.3 Darstellung und Vergleich des Wärmebedarfs

Um den Betrieb und die Planung eines Energie-Versorgungssystems detailliert betrachten und optimieren zu können, sind hochauflösende Lastprofile eine wichtige Voraussetzung. Diese stellen den zeitlichen Verlauf der vor Ort produzierten und benötigten Energie dar. Zur Modellierung von Lastprofilen ist eine detaillierte Datenlage notwendig, wobei das Verhalten der Bewohner, die verwendeten Geräte und die physikalische Beschaffenheit des Gebäudes eine große Rolle spielen (Fischer et al. 2015). Die dem Projekt "StroWae" zur Verfügung gestellten Lastprofile, wurden synthetisch dem Tool "SynPro" des Fraunhofer ISE erzeugt. Die dafür verwendete Methode basiert auf einem stochastischen Modell, welches die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Nutzergruppen, Gebäudeeigenschaften und die Anzahl elektrischer Geräte bei der Bestimmung von Energieflüssen zu berücksichtigen (Fischer et al. 2015). Dabei stimmt der Output des Modells mit Werten aus der Richtlinie 4655 des Vereins Deutscher Ingenieure näherungsweise überein (Fischer et al. 2015).

Für diese Arbeit sind die Lastprofile des Wärmebedarfs für die Referenzgebäude aus Kapitel 2.1 relevant, die mit dem SynPro-Modell nach der Norm "DIN EN ISO 13790 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling" von (Fischer et al. 2015), aus den Gebäudedaten und einem Wetterdatensatz des Testreferenzjahres (TRY) 2012 vom Deutschen Wetterdienst (DWD), für die Sanierungsstandards aus Kapitel 2.2 berechnet wurden. Dabei wurden neben solaren Wärmegewinnen auch interne Wärmegewinne berücksichtigt. Die internen Wärmegewinne setzen sich aus den Anwesenheitszeiten von Personen und deren benutzten Geräten zusammen, die bei jeder Berechnung statistisch ausgewürfelt werden, um unterschiedliches Nutzerverhalten darzustellen. Ein weiterer Input für die Berechnung des Wärmebedarfs sind Raumsolltemperaturen, die nach der Norm DIN 18599 für Wohngebäude auf 20°C am Tag und 16°C in der Nacht festgelegt wurden (Maas 2014).

Die Lastprofile des Wärmebedarfs werden mit SynPro in W als Viertelstundenwerte für das ganze Jahr 2012 berechnet. Anschließend wurden im Rahmen dieser Arbeit arithmetisch Stunden- und Tagesmittelwerte in kW gebildet, um kürzere Rechenzeiten in der Optimierung zu erhalten. Zunächst wird der Wärmebedarf des gesamten Jahres in kWh für die verschiedenen Referenzgebäude und Sanierungsstandards betrachtet, der in Tabelle 3 dargestellt ist. Darin sieht man deutliche Veränderungen im Gesamtwärmebedarf, wobei dieser mit einem KfW100-Standard mindestens um 27% bei MFH6 und maximal 52% bei MFH96 reduziert wird. Mit einem KfW55-Standard liegt eine Energieeinsparung von mindestens 46% bei MFH6 und maximal 70% bei MFH96 gegenüber dem unsanierten Zustand vor.

Tabelle 3: Vergleich des Jahreswärmebedarfs der durch SynPro berechneten Lasten

Referenzgebäude	Jahreswärmebedarf [kWh]	Einsparung [%]
MFH6	15,635	
MFH6 KfW100	11,401	27%
MFH6 KfW55	8,430	46%
MFH32	161,801	
MFH32 KfW100	82,474	49%
MFH32 KfW55	50,517	69%
MFH96	403,046	
MFH96 KfW100	194,443	52%
MFH96 KfW55	121,411	70%
MFH120	480,509	
MFH120 KfW100	264,116	45%
MFh120 KfW55	182,725	62%

Im Folgenden wird der Wärmebedarf exemplarisch für das Referenzgebäudes MFH120 erläutert. Die Darstellungen für die verbleibenden Referenzgebäude sind im Anhang A hinterlegt. Der Jahresverlauf der von SynPro berechneten Lasten ist in Form von Tagesmittelwerten in Abbildung 3 veranschaulicht. Darin ist zu erkennen, dass sich der Wärmebedarf gegenläufig zur Außentemperatur verhält, sodass geringe Außentemperaturen mit einem hohen Wärmebedarf zusammentreffen. Darüber hinaus ist deutlich erkennbar, dass der Wärmebedarf aller Sanierungsstandards in den Wintermonaten Januar, Februar, November und Dezember durchschnittlich am größten ist und mit Abstand die stärksten Lastspitzen auftreten, sowie in den Monaten Mai, Juni, Juli und August kein Bedarf besteht. Dies hängt mit den klimatischen Verhältnissen der Jahreszeiten zusammen, bei denen neben dem Jahresgang der Außentemperaturen auch die Strahlung der Sonne und damit die solaren Wärmegewinne eine wichtige Rolle spielen.

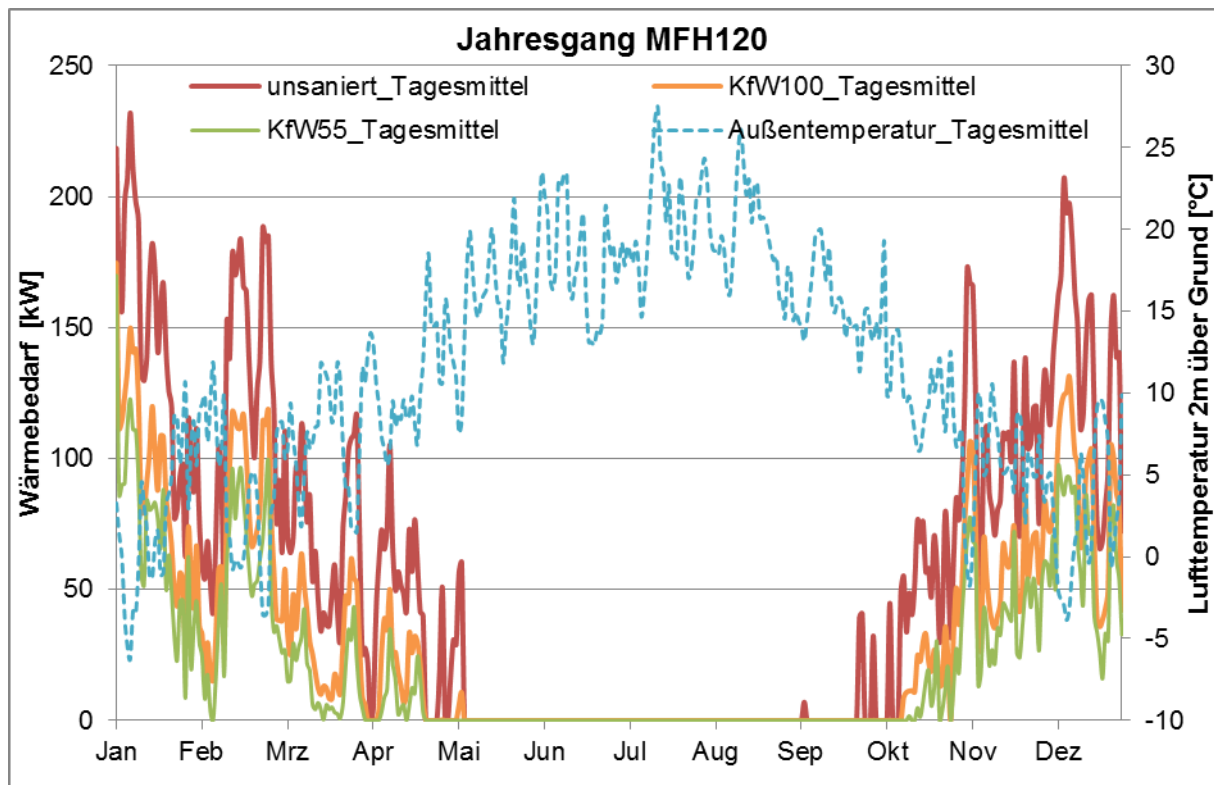


Abbildung 3: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen

Um die Unterschiede des Wärmebedarfs zwischen den Sanierungsstandards näher zu untersuchen, wurden Jahresdauerlinien gebildet, für die Stundenmittelwerte des ganzen Jahres der Größe nach sortiert wurden. Mit der Jahresdauerlinie in Abbildung 4 ist zu sehen, dass im unsanierten Zustand die größten Wärmemengen benötigt werden und der Bedarf in rund 42% des Jahres, besteht. Mit einem KfW100-Standard wird die Zeit der benötigten Wärme auf 36% des Jahres, um 6%, verkürzt. Die geringsten Wärmemengen werden mit einem KfW55-Standard benötigt, sowie die Zeit des Wärmebedarfs auf 31% des Jahres verringert, was einer Reduktion von 11% gegenüber dem unsanierten Zustand und 5% gegenüber dem KfW100-Standard entspricht. Außerdem ist erkennbar, dass die absolute Spitzenlast des gesamten Jahres im unsanierten Zustand bei ca. 440 kW liegt und mit einem KfW100-Standard um rund 16% auf 370 kW reduziert wird. Ein höherer KfW55-Standard führt zu einer weiteren, aber nur minimalen Reduktion der absoluten Spitzenlast von 2% gegenüber dem KfW100-Standard auf 360 kW. Darüber hinaus wird durch die Sortierung der Lasten ein relativ konstanter vertikaler Abstand zwischen den Kurven der verschiedenen Sanierungen dargestellt, der eine nahezu gleichbleibende Energieeinsparung suggeriert.

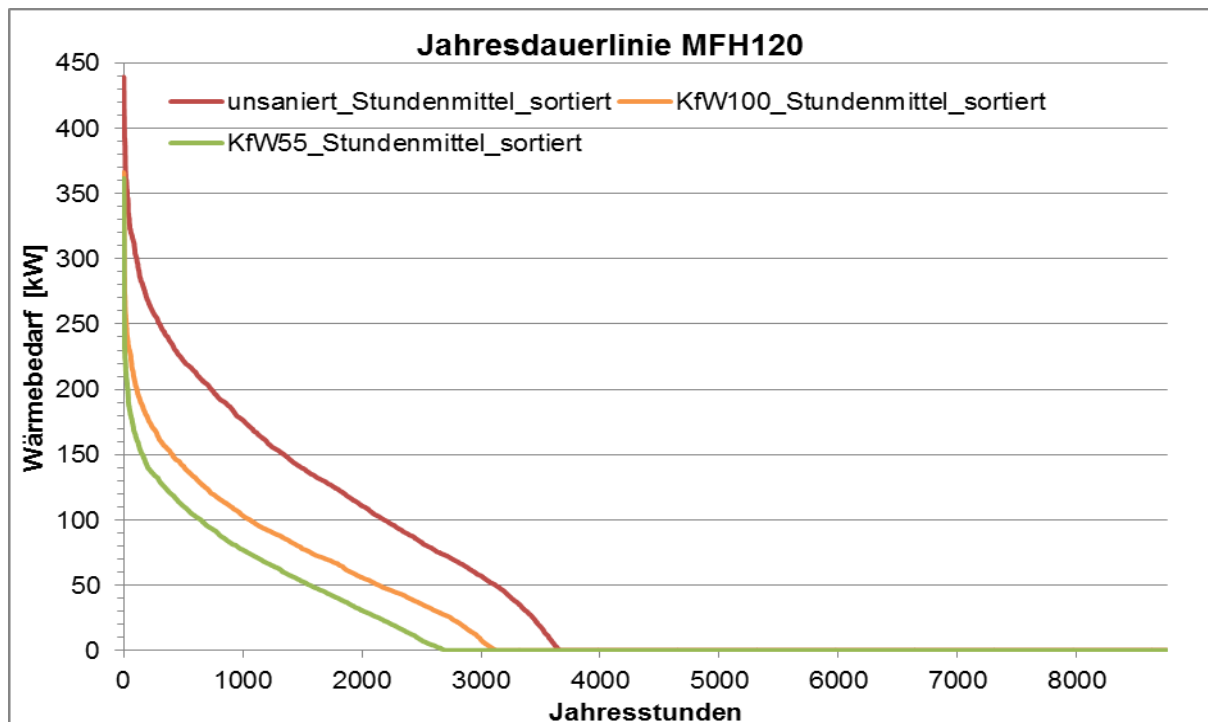


Abbildung 4: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen

Für eine genauere Betrachtung sind in Abbildung 5 die Tagesgänge des Wärmebedarfs in Stundenmittelwerten exemplarisch vom 02. und 03. Januar aufgeführt. Der Tagesgang zeigt einen exponentiellen Anstieg des Wärmebedarfs für alle Sanierungsstandards zwischen der 30. und 32., sowie der 54. und 56. Jahresstunde, was 6 und 8 Uhr morgens entspricht, wobei die Steigungen tendenziell mit zunehmender Sanierung abnehmen. Von dem morgendlichen Maximum ausgehend sinkt der Wärmebedarf über die Mittags- und Nachmittagsstunden hinweg unregelmäßig ab, bis zu einem leichten Anstieg in den Abendstunden, der je nach Sanierungsstand zeitlich versetzt und unterschiedlich stark auftritt. Zwischen der 47. und 49., sowie der 71. und 73. Stunde also 23 Uhr und 01 Uhr, fällt der Wärmebedarf auf 0 ab, wobei die Sanierungen auch hier die Senkung reduzieren.

Es ist insgesamt erkennbar, dass keine konstante Wärmezufuhr notwendig ist, da das Nutzerverhalten bzw. die internen und solaren Wärmegewinne berücksichtigt wurden. So wird in der Mitte eines Tages während der allgemeinen Arbeitszeit bei tendenziell wenig aktiven Nutzern und großen Solaren Gewinne der Wärmebedarf verringert, sowie umgekehrt am Anfang und Ende eines Tages mit vielen aktiven Nutzern und geringen solaren Gewinnen der Wärmebedarf erhöht. Durch die internen Wärmegewinne und die Absenkung der Raumsolltemperatur auf 16°C in der Nacht tritt außerdem nicht unmittelbar ein Raumwärmebedarf in dieser Zeit auf, sodass es zum Beispiel zwischen der 49. und 54. Jahresstunde eine Heizpause gibt. Da die Nutzeraktivität allerdings bei der Berechnung der Lastprofile für die Sanierungsstandards jeweils statistisch zufällig bestimmt wird, kommt es jedoch auch dazu, dass es Zeitpunkte gibt, wie in der 56. und 62. Stunde, in denen mit einem KfW55-Standard mehr Wärme benötigt wird, als mit einem KfW100-Standard. Eine gleichbleibende Energieeinsparung zwischen den verschiedenen Sanierungsstandards liegt dementsprechend nicht vor.

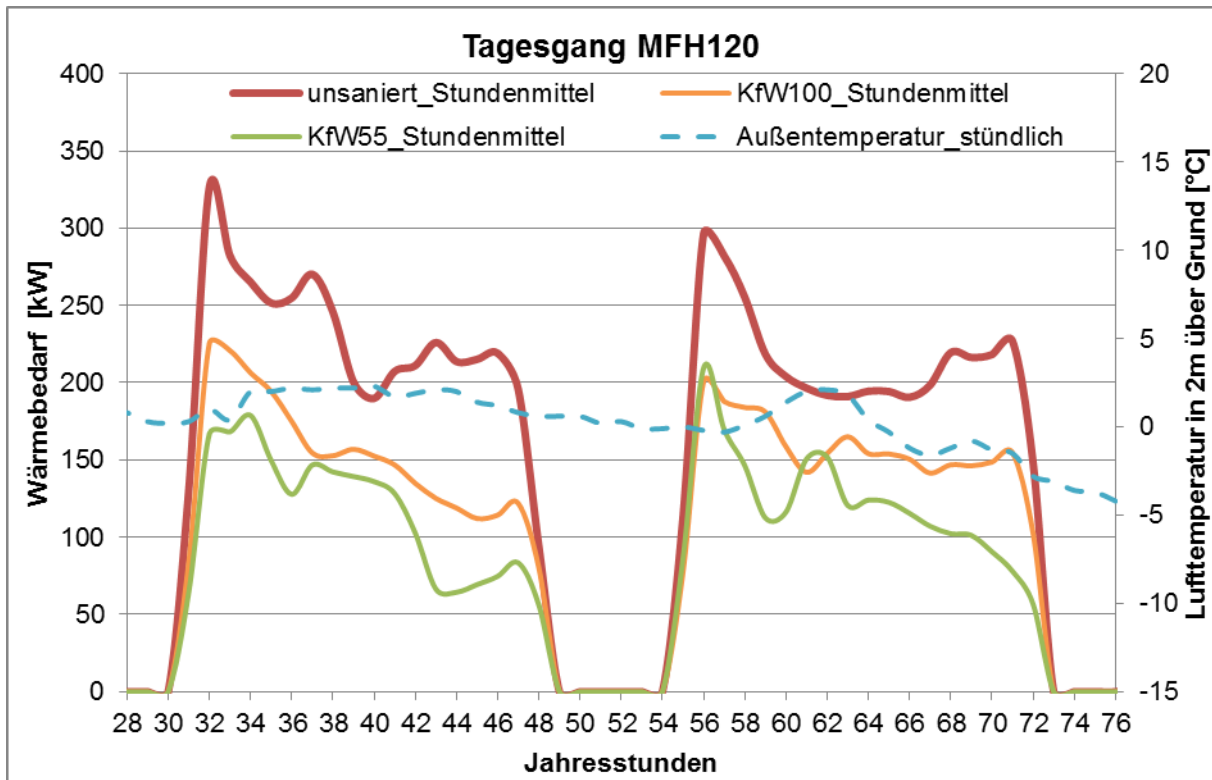


Abbildung 5: Tagesverlauf der SynPro-Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH120 in allen Sanierungszuständen

Für die restlichen Referenzgebäude zeigt sich ein ähnliches Verhalten im Jahresverlauf des Wärmebedarfs und der Jahresdauerlinie, wobei die Verkürzungen der Bedarfszeiten durch Sanierungen für die verschiedenen Referenzgebäude unterschiedlich stark ausfallen. Auch der Tagesgang verläuft gleichartig, sodass auch für die restlichen Referenzgebäude keine gleichbleibende Energieeinsparung vorzufinden ist.

3 Beschreibung des Optimierungsmodells

Das in dieser Arbeit verwendete Optimierungsmodell stellt grundsätzlich ein zu lösendes, gemischt-ganzzahliges Problem dar. Dies ist eine spezielle Form der linearen Optimierung, da eine oder mehrere Variablen nur ganzzahlige bzw. diskrete Werte annehmen dürfen und die Lösungskomplexität dadurch zunimmt (Kallrath 2013). Das Modell ist in General Algebraic Modeling System (GAMS) geschrieben, das als kommerzielle Software angeboten wird. GAMS verfügt über eine integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) und über eine Schnittstelle für Gleichungslöser von Drittanbietern (Kallrath 2013). Für das im Folgenden beschriebene Optimierungsproblem wird die Lizenz des Fraunhofer ISE und damit der CPLEX von IBM als Gleichungslöser verwendet.

3.1 Modell-Input

Der Modell-Input des Optimierungsmodells besteht aus den Stundenmittelwerten für das TRY 2012 des Wärmebedarfs der vier ausgewählten Referenzgebäude MFH6, MFH32, MFH96 und MFH120 in den Zuständen unsaniert, KfW100 und KfW55. Die Technologiedaten, die dem Modell für die Optimierung zur Verfügung stehen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Dabei sind den Technologien die jeweiligen Energieträger, deren Preise aus dem Jahr 2014, sowie Lebensdauer, Wirkungsgrad und verschiedene Kostenarten zugeordnet, die am Fraunhofer ISE ermittelt wurden. Da das Modell für den Zubau von Technologien in Form von Investitionsvorhaben eine erwartete Verzinsung berücksichtigt, wird ein dafür notwendiger Zinssatz angegeben, der mit 6% für jede Technologie eine vereinfachte Annahme darstellt.

Tabelle 4: Eingangsparameter der technischen Anlagen bei der Optimierung (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)

Technologie	Energieträger	Energieträgerpreise [€/kWh]	Betriebskosten fix [€/kWh]	Betriebskosten variabel [€/kWh]	Wirkungsgrad	Investitionskosten [€/kW]	Zinssatz	Lebensdauer [Jahre]
Holzpellet-Kessel	Holzpellets	0.05	59.25	0.076	0.92	365.28	0.06	20
Luft-Wärmepumpe	Strom	0.29	5.33	0.051	3.50	1792.68	0.06	15
Sole-Wärmepumpe	Strom	0.29	5.45	0.039	4.60	3151.64	0.06	15
Biogas-BHKW	Biogas	0.11	28.07	0.012	0.46	935.83	0.06	15
Micro-BHKW	Erdgas	0.07	56.14	0.020	0.55	2807.02	0.06	15
Mini-BHKW	Erdgas	0.07	62.39	0.028	0.54	2079.51	0.06	15
Groß-BHKW	Erdgas	0.07	28.07	0.012	0.46	935.83	0.06	15
Gas-Brennwertkessel	Erdgas	0.07	4.95	0.070	0.98	330.00	0.06	15
Öl-Niedertemperaturkessel	Heizöl	0.06	40.00	0.100	0.86	372.50	0.06	15
Fernwärme	Erdgas	0.07	1.47	0.089	0.85	139.58	0.06	35
Solarthermie-Flachkollektor			15.00	0.003	0.55	1000.00	0.06	20
Wärmespeicher			0.23	0.017	0.90	23.33	0.06	15

Allen Mehrfamilienhäusern, sind Grenzen bzw. Höchstwerte in kW für die installierbare Leistung der Technologien gesetzt. Diese wurden vom Fraunhofer ISE nach den Gebäudeeigenschaften festgelegt, wie zum Beispiel die Solarthermie-Kapazität nach der jeweilig nutzbaren Dachfläche. Die Grenzwerte der für diese Arbeit relevanten Gebäude sind in Anhang C hinterlegt. Jedes der Referenzgebäude hat neben den dezentralen Technologien Zugang zu einem Wärmeverbundnetz, das durch die Entfernung und einen Grenzwert des möglichen Wärmetransports zwischen den einzelnen Gebäuden definiert ist, die in Anhang B hinterlegt sind. Die Funktionsweise des Fernwärmenetzes wird im folgenden Kapitel erläutert.

3.2 Struktur und Funktion

Die Struktur des Modells ist in Abbildung 7 dargestellt. Danach fließen, in Anlehnung an den bereits beschriebenen Input-Rahmen, neben dem Wärmebedarf die in Tabelle 4 aufgeführten technologischen und ökonomischen Eingangsparameter in die Optimierung ein. Mit diesen Eingangsparametern werden die Kosten der Betriebsführung bei der Wärmeerzeugung, zur Deckung des Bedarfs für jede Stunde im Jahr berechnet.

Für die Deckung des Wärmebedarfs kann neben der dezentralen Wärmeerzeugung der Input-Technologiearten, auch das Wärmeverbundnetz genutzt werden. Von diesem kann jedes Gebäude Wärme einer zentralen Erzeugungsanlage beziehen, die mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) betrieben wird. Das BHKW kann mit Erd- oder Biogas betrieben werden und nutzt das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), um effizient Strom und Wärme zu produzieren, wobei in dieser Arbeit nur die Wärme betrachtet wird. Der Aufbau des Wärmenetzes ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Dabei besteht eine Leitung zwischen der zentralen Erzeugerregion und dem direkt angrenzenden MFH32. Von diesem besteht wiederum eine Leitung an das angrenzende MFH120. So sind alle Referenzgebäude einseitig miteinander verbunden. Der Transport von Wärme im Verbundnetz ist wie ein Handel abgebildet – MFH32 kann Wärme von dem zentralen BHKW importieren und diese nach Abzug des eigenen Bedarfs in das MFH120 exportieren. Im Optimalfall, kann das Modell die Kapazität des Wärmeverbundnetzes zwischen den Regionen erhöhen oder neue Leitungen beispielsweise direkt von dem zentralen BHKW einem der Referenzgebäude zuzubauen, jedoch nicht zurück bauen oder die Kapazität verringern.

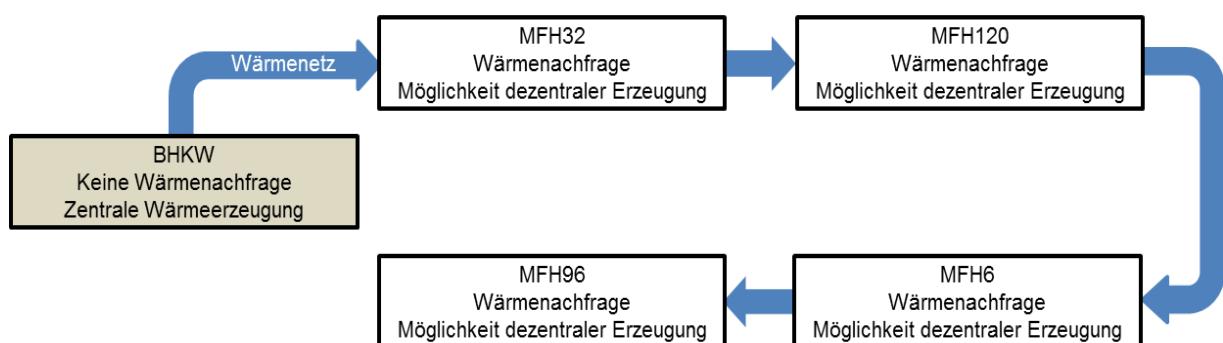


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Wärmeverbundnetzes

Eine weitere Möglichkeit zur Deckung des Wärmebedarfs ist die Nutzung von Wärmespeichern. Für diese ist der Ladestand in einer Jahresstunde durch den Ladestand in der vorherigen Jahresstunde abzüglich Entladung und plus Beladung definiert. Dabei wird keine zeitabhängige Entladung des Speichers abgebildet, sondern ein Verlust an thermischer Energie pro be- oder entladene thermische kWh, da es sich bei diesen Speichern um Warm- und Heizwasserspeicher in Wohngebäuden handelt und nicht um einen großen dezentralen Wärmespeicher in dem Wärmeverbundnetz.

Weitere lineare Nebenbedingungen beschränken das Be- und Entladen pro Zeiteinheit auf die installierte Kapazität in Abhängigkeit des Ladestandes und das dieser die installierte Kapazität nicht überschreitet. Zusätzlich ist eine binäre Entscheidungsvariable abgebildet, die sicherstellt, dass der Speicher entweder be- oder entladen wird. Wie bei dem Fernwärmenetz kann das Modell falls lohnenswert, die Speicherkapazität erhöhen jedoch nicht verringern.

Insgesamt wird die dezentrale Wärmeerzeugung der Input-Technologiearten, sowie der Wärmebezug aus dem Fernwärmenetz oder Wärmespeichern, zu den jeweiligen fixen und variablen Betriebskosten nach Tabelle 4 genutzt. Neben den variablen Betriebskosten werden die variablen Gesamtkosten zusätzlich mit den Preisen, der je nach Technologie verwendeten Energieträger für die Wärmeerzeugung berechnet.

Die Möglichkeit des Zubaus bzw. der Installation zusätzlicher Kapazitäten im Optimalfall, erfolgt zu den jeweiligen in Tabelle 4 aufgeführten Investitionskosten. Der Zubau ist kein reales Bauvorhaben, sondern ist vielmehr eine Aussage zu welcher Jahresstunde sich die jeweilige Leistung einer Technologie finanziell lohnt. Das Modell berücksichtigt erwartete Verzinsungen für Investitionen als Kostenaufwand, in Form von Annuitäten. Diese geben die verzinsten Investitionskosten, auf den Berechnungszeitraum des TRY 2012 aufgeteilt, als regelmäßige Belastung pro Jahresstunde an. Der Verzinsungszeitraum, der als Lebensdauer der Investition definiert ist, und der Zinssatz sind als Eingangsparameter für die jeweilige Technologie in Tabelle 4 aufgeführt.

Gemäß Abbildung 7 bilden alle in der Betriebsführung anfallenden fixen, variablen und Fernwärmetransferkosten, sowie alle Annuitäten als Zielfunktion des Modells in der Summe die Gesamtsystemkosten. Als wesentlichen Optimierungsschritt berechnet das Modell aus den verschiedenen Möglichkeiten der Betriebsführung und Zubau-Varianten, welche Kombinationen zur Deckung des Wärmebedarfs in den Jahresstunden die geringsten Gesamtsystemkosten ergeben. Der Output des Modells besteht also aus einer kostenminimalen, für jede Jahresstunde aufgelösten Versorgungssystem-Empfehlung mit Betriebsführung und Zubau für ein Wärmeverteilnetz.

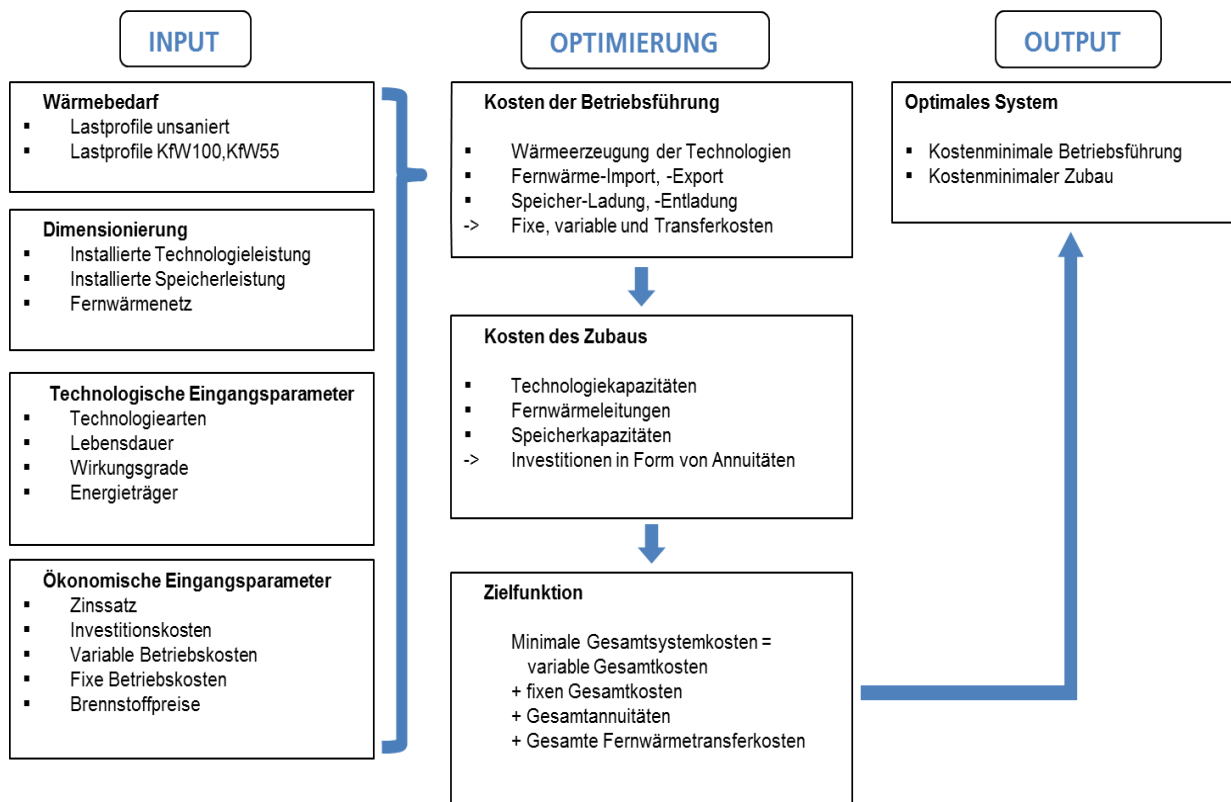


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Modellstruktur

4 Auswertung der Szenarien

In diesem Kapitel werden die Szenarien definiert und nacheinander der darin optimierte Technologiezubau, -betrieb und die Kosten beschrieben. Es wird zunächst ein Basisszenario und anschließend ein Alternativszenario definiert, um die Sensitivität zu untersuchen. Die Szenarien werden für alle Sanierungsniveaus durchgerechnet, wobei die vier Referenzgebäude stets in demselben Zustand sind, sodass die Unterschiede der Sanierungen auf das System deutlich herausgearbeitet werden können.

4.1 Basisszenario

Das Basisszenario wird mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Inputrahmen berechnet und es wird der gesamte Berechnungszeitraum des TRY 2012 für die Auswertung betrachtet. In diesem Szenario sind alle Mehrfamilienhäuser in der ersten Jahresstunde an das Fernwärmenetz angeschlossen, das von der zentralen Erzeugungsanlage als Erdgas-BHKW versorgt wird, die Versorgung der restlichen Jahresstunden wird durch das Modell optimiert. Thermische Speicherkapazitäten sind nicht vorinstalliert, sodass diese eine Zubau-Option für das Modell darstellen.

4.1.1 Technologiezubau

Der Technologiezubau beschränkt sich zeitlich für alle Sanierungsstandards auf die morgendlichen Stunden des ersten Januar, sowie einzelner Tage im Dezember, da der Wärmebedarf, gemäß dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Tagesgang, morgens stark ansteigt und in diesen Monaten die höchsten Lastspitzen auftreten. Die im gesamten System zugebaute Leistung der Technologien ist in Abbildung 8 dargestellt und wird als Leistung in kW angegeben. Darin ist Grundsätzlich zu erkennen, dass bis auf den unsanierten Zustand nur in Solarthermie und Gas-Brennwertkessel als dezentrale Technologiearten investiert wird und weder Wärmespeicher noch Fernwärme lohnenswerte Investitionen darstellen. Es ist zu beachten, dass das aufgeführte Groß-BHKW eine dezentrale Anlage in einem Mehrfamilienhaus darstellt und nicht die zentrale Erzeugungsanlage des Fernwärmenetzes. Darüber hinaus wird im unsanierten Zustand aller Gebäude mit insgesamt 957 kW die größte Leistung zugebaut. Bei einem KfW100-Standard der Gebäude sinkt die zugebaute Leistung um ein Viertel auf 727 kW und für Gebäude eines höheren KfW55-Standards wird mit 732 kW in der gleichen Größenordnung Leistung installiert. Solarthermie stellt dabei mit 65% im unsanierten Zustand und 64% mit einem KfW100-Standard den größten Anteil dar, der allerdings mit einem KfW55-Standard auf 54% sinkt. Auffallend sind der größte Anteil von Gas-Brennwertkesseln mit 46% der installierten Leistung, bei einem KfW55-Standard, sowie die 71 kW Groß-BHKW mit 7% der installierten Leistung im unsanierten Zustand.

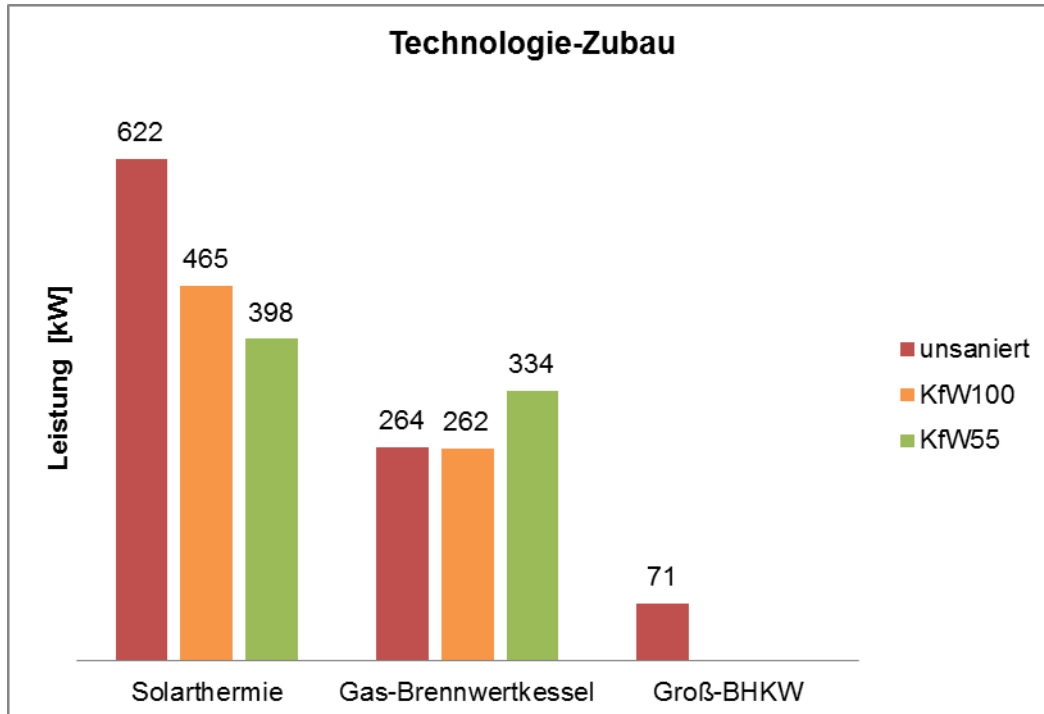


Abbildung 8: Ergebnisse der zugebauten Leistung verschiedener Technologien für alle Referenzgebäude im gesamten Jahr

Relevant ist neben der zugebauten Leistung auch die Nutzung der jeweiligen technischen Anlagen. Um diese zu vergleichen, wurden als Maß für den Nutzungsgrad Volllaststunden berechnet, die angeben wie viele Stunden im Jahr eine Technologie mit voller Leistung betrieben werden müsste, um die gesamte Jahresenergiemenge (die auch mit Pausen und Teillastbetrieb erzeugt wurde) zu produzieren. Die Volllaststunden der zugebauten Technologien sind in Abbildung 9 grafisch dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Solarthermie in jedem Sanierungsstandard mit Abstand die meisten Volllaststunden hat und die Leistung der Gas-Brennwertkessel nur geringfügig ausgenutzt wird. Eine Ausnahme stellt das Groß-BHKW mit 40% der Volllaststunden der Solarthermie im unsanierten Zustand dar. Eine genauere Betrachtung des Einsatzes der technischen Anlagen zur Deckung des Wärmebedarfs folgt im nächsten Kapitel.

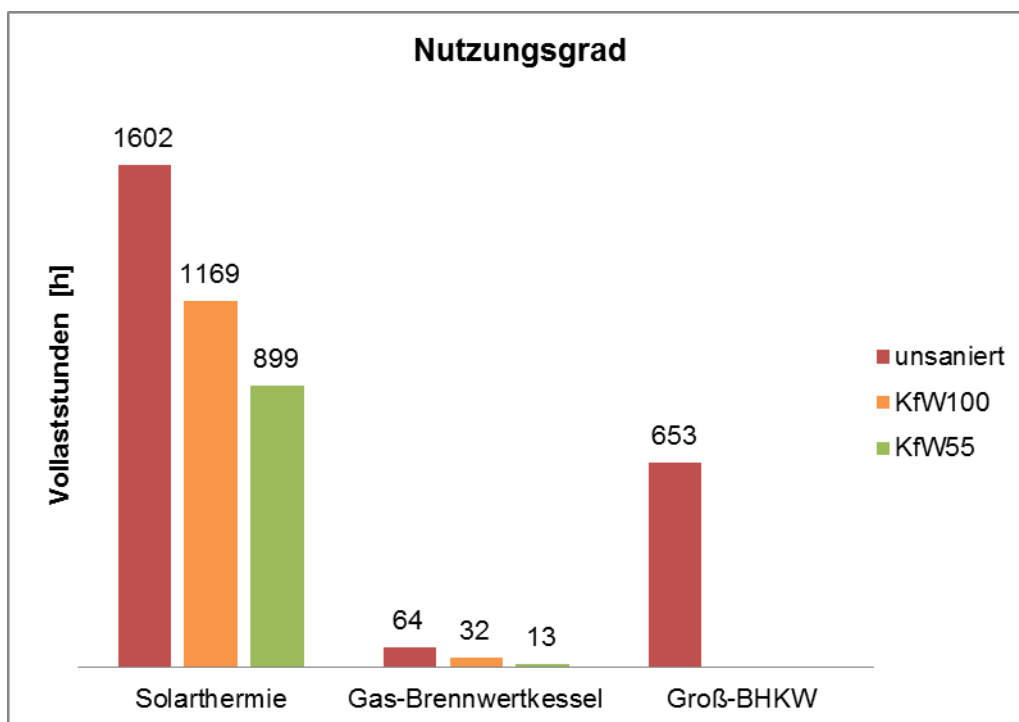


Abbildung 9: Berechnete Volllaststunden der zugebauten Leistung nach Technologie für alle Referenzgebäude im gesamten Jahr

4.1.2 Betriebsführung

Zunächst werden die Anteile der durch die jeweilige Technologie erzeugten Wärme an dem Wärmebedarf des gesamten Jahres, für alle Referenzgebäude erläutert, die in Abbildung 10 veranschaulicht sind. Darin ist zu erkennen, dass der gesamte Wärmebedarf fast ausschließlich mit Solarthermie gedeckt wird, bei steigender Tendenz mit einem höheren Sanierungsstandard. Die Fernwärmeentnahme hat an dem gesamten Wärmebedarf nur einen verschwindend geringen Anteil, da auch nicht über den ersten Zeitschritt hinaus in Fernwärme investiert wurde. Für den geringen Anteil, der nicht mit Solarthermie erzeugt wird, werden Gas-Brennwertkessel eingesetzt, wobei im unsanierten Zustand mit 5% mehr als doppelt so viel Wärme damit erzeugt wird wie in den sanierten Zuständen.

Die ausschließlich im unsanierten Zustand erzeugte Wärme des Groß-BHKW hat, trotz mehr Volllaststunden dieser Technologie, nur einen weniger als halb so großen Anteil an der Deckung des gesamten Wärmebedarfs wie der Gas-Brennwertkessel.

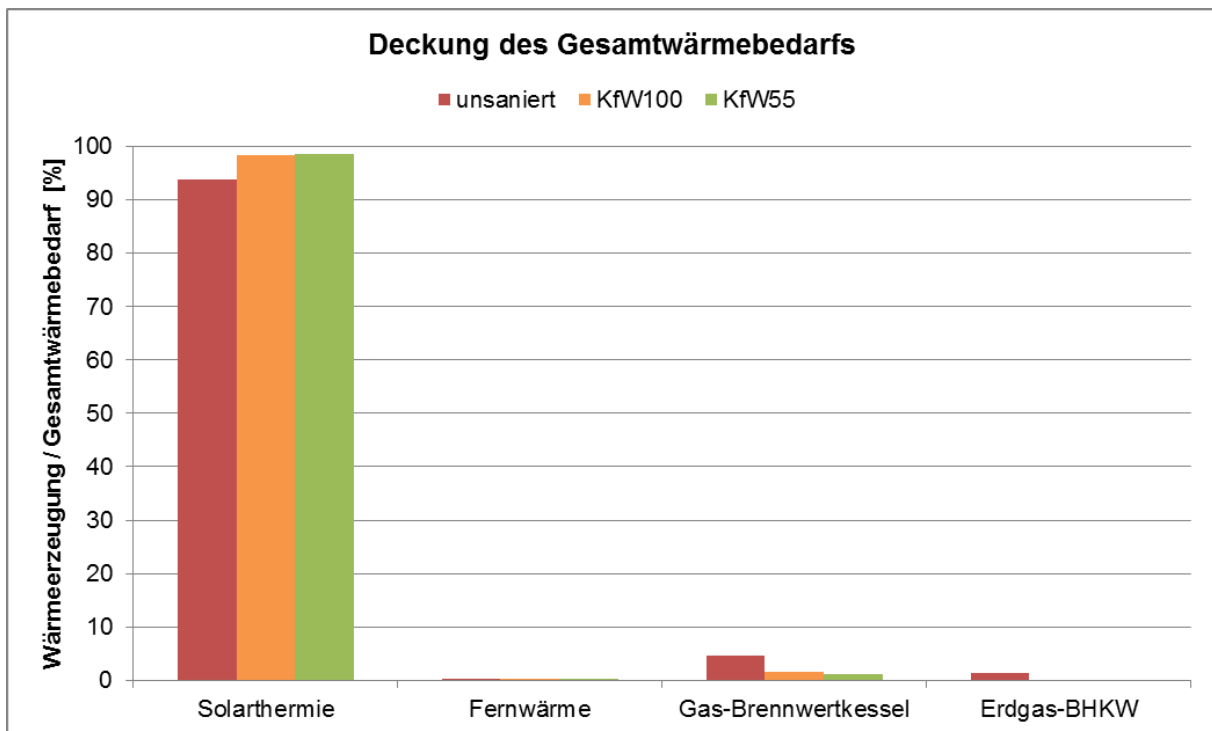


Abbildung 10: Ergebnisse der Wärmeerzeugung verschiedener Technologien als Anteile am Wärmebedarf des ganzen Jahres für alle Referenzgebäude

Analog zu Kapitel 2.3 wird nachfolgend der zeitliche Verlauf des Technologiebetriebs exemplarisch für das Referenzgebäude MFH120 erläutert, anhand der im letzten Kapitel erwähnten, auch für die zubaurelevanten Zeiträume am Anfang und Ende des Jahres. Die Darstellungen für die verbleibenden Referenzgebäude sind in Anhang D hinterlegt. In Abbildung 11 sind die Tagesgänge der kumulierten Wärmeerzeugung in kW vom 01. bis 04. Januar und in Abbildung 12 die Tagesgänge vom 06. bis 09. Dezember im unsanierten Zustand veranschaulicht. Es wurde eine kumulierte Darstellung gewählt, da so deutlich erkennbar ist, dass die gesamte Wärmeerzeugung dem Wärmebedarf entspricht. In der Abbildung des ersten Zeitraumes ist zu erkennen, dass nach der ersten Jahresstunde mit 60 kW Fernwärmeentnahme viel solarthermische Leistung zur Wärmeerzeugung zugebaut und eingesetzt wird, um die Grundlast bis zu einem Grenzwert von 310 kW bereit zu stellen. Für die darüber hinausgehenden Lasten in den morgendlichen Stunden werden zusätzlich 50 kW eines Gas-Brennwertkessels genutzt, sowie die restlichen 30 kW für die Lastspitzen dem Fernwärmenetz entnommen. Die gleiche Zusammensetzung der Wärmeerzeugung ist am 04. Januar zu erkennen. Fernwärme wird im gesamten Jahr nur in 28 Stunden zur Deckung der Lastspitzen bezogen, während Gas-Brennwertkessel in 69 Stunden verwendet werden. An den Tagen mit geringerem Wärmebedarf wird am 02. Januar bis auf 10 kW fast nur Solarthermie genutzt, sowie am 03. Januar ausschließlich Solarthermie.

In der Abbildung des zweiten Zeitraumes am Ende des Jahres lohnt sich im Sinne minimaler Systemkosten der Zubau weiterer solarthermischer Leistung, wodurch der Grenzwert der genutzten Leistung um ca. 14% auf 360 kW am 08. und 09. Dezember ansteigt. Dementsprechend fällt die Wärmeerzeugung für die Lastspitzen mit 40 kW eines Gas-Brennwertkessels und 10 kW Fernwärmeentnahme geringer als am Anfang des Jahres aus.

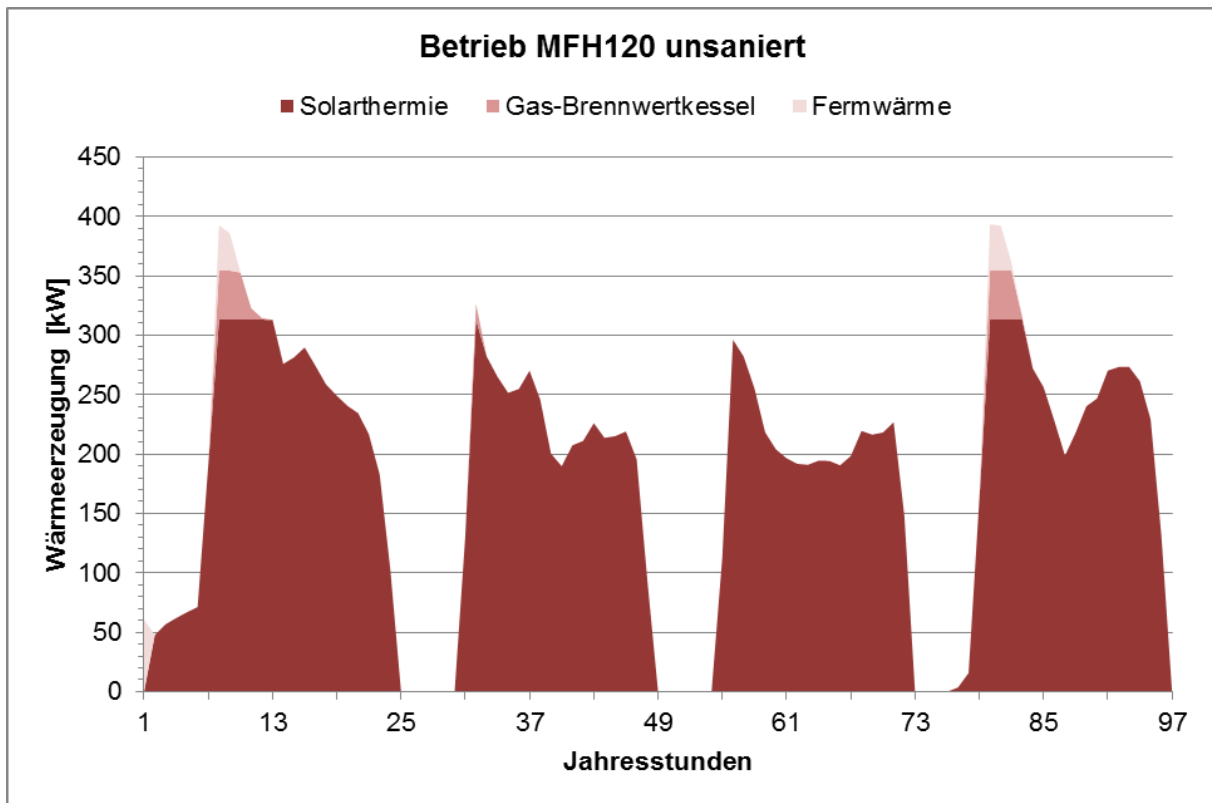


Abbildung 11: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar

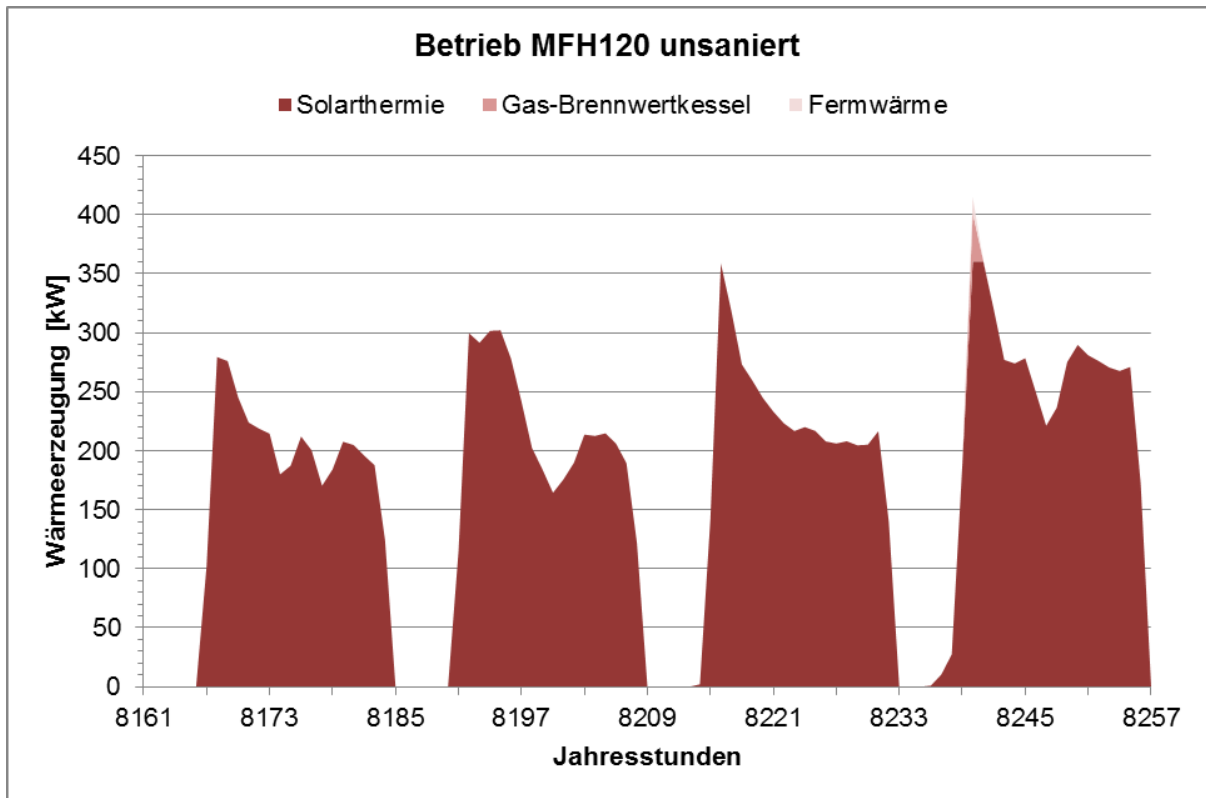


Abbildung 12: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember

Für dieselben Zeiträume wurden auch Tagesgänge der kumulierten Wärmeerzeugung mit einem KfW100-Standard des MFH120 erstellt. Nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die wesentlichen Unterschiede zum unsanierten Zustand im ersten Zeitraum eine um 32% auf 210 kW verringerte, durch Solarthermie bereitgestellte Grundlast und dadurch eine Nutzung des Gas-Brennwertkessels für größere Lasten, bei geringfügig größerer, aber seltenerer Fernwärmeentnahme in 4 Stunden im Jahr für Lastspitzen. Gas-Brennwertkessel werden zeitlich auch mit einem KfW100 Standard in 69 Stunden des Jahres eingesetzt. Im zweiten Zeitraum am Ende des Jahres nach Abbildung 14, lohnt sich auch ein Zubau von solarthermischer Leistung ab dem 07. Dezember um 9% auf 230 kW, sodass deren Wärmeerzeugung den gesamten Tages-Wärmebedarf deckt.

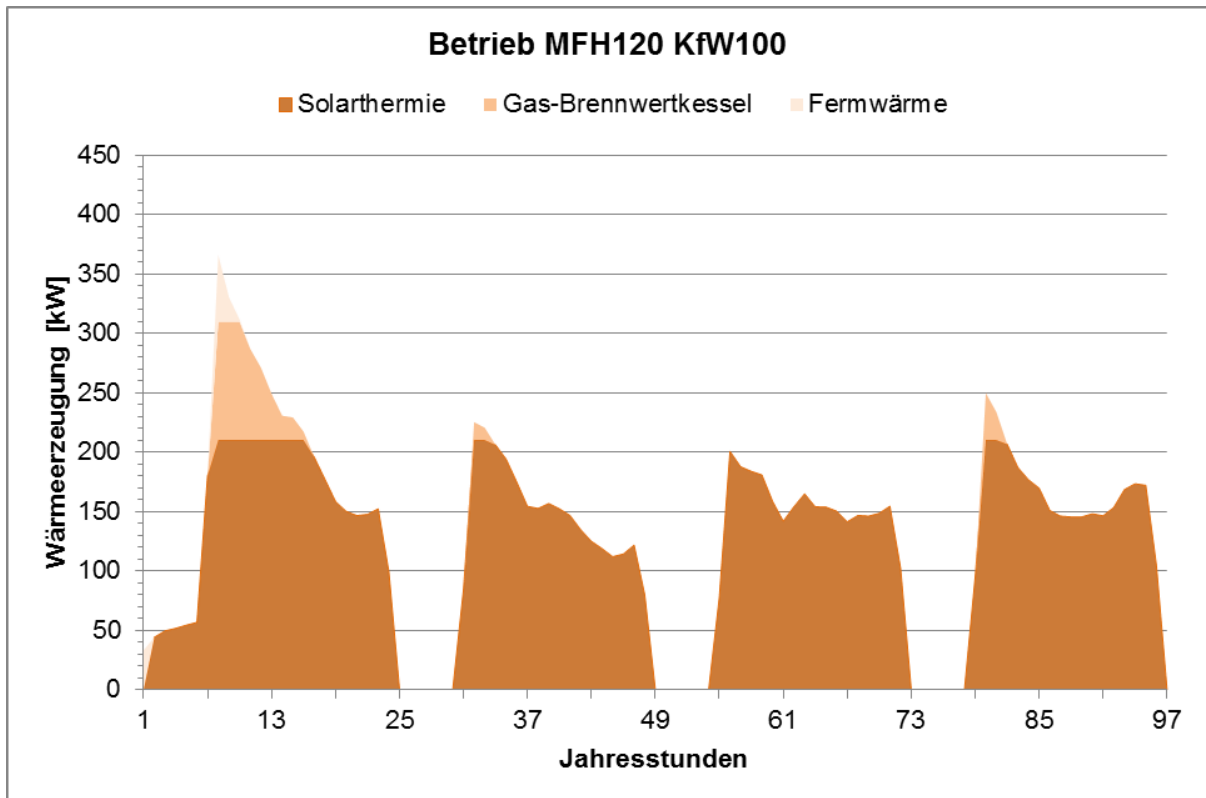


Abbildung 13: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar

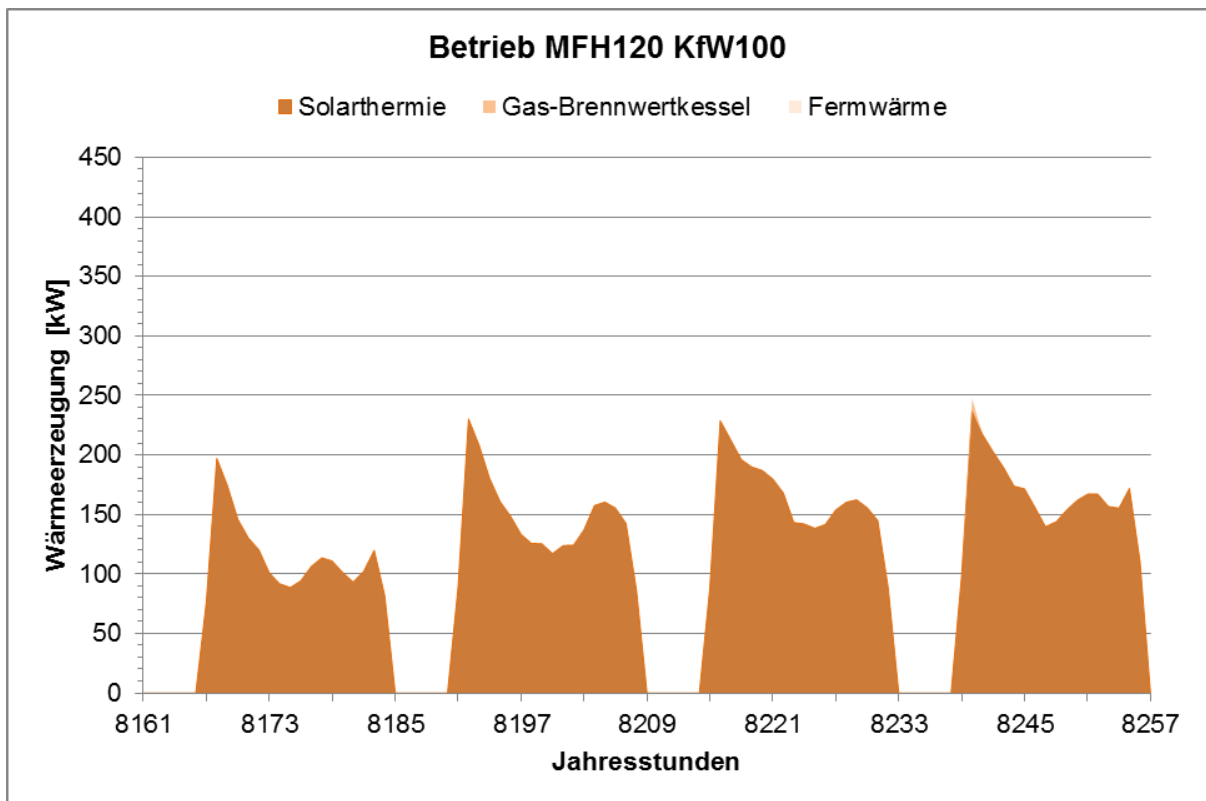


Abbildung 14: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember

Die Tagesgänge bei einem KfW55-Standard wurden ebenfalls für die gleichen Zeiträume erstellt. Für den ersten Zeitraum nach Abbildung 15 ist eine weitere Absenkung der Wärmeerzeugung durch Solarthermie von ca. 45% gegenüber dem unsanierten Zustand und ca. 19% gegenüber dem KfW100-Standard zu erkennen. Die Wärmeerzeugung des Gas-Brennwertkessels nimmt dadurch bei großen Lasten deutlich zu, bei geringerer Fernwärmeentnahme für Spitzenlasten gegenüber den anderen Sanierungsstandards in 3 Stunden des Jahres. Die Anzahl der verwendeten Stunden im Jahr liegt bei dem Gas-Brennwertkessel mit einem KfW55-Standard genau wie bei allen anderen Sanierungszuständen bei 69 Stunden. Im zweiten Zeitraum nach Abbildung 16 lohnt sich ebenfalls, im Vergleich zu den anderen Sanierungszuständen ein Zubau solarthermischer Leistung, der mit ca. 8% der geringste ist. Allerdings wird im Gegensatz zu dem KfW55-Standard am 07. und 08. Dezember noch Wärmeerzeugung durch einen Gas-Brennwertkessel in den morgendlichen Stunden bereitgestellt.

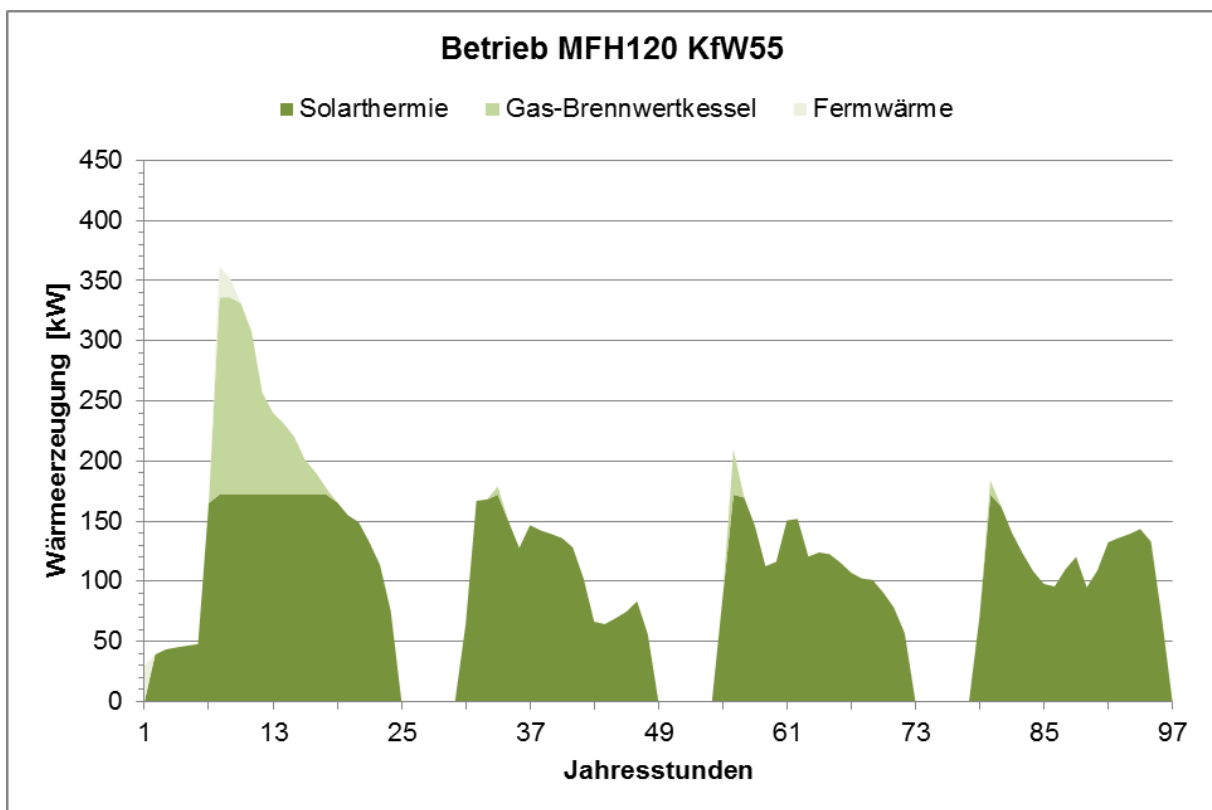


Abbildung 15: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar

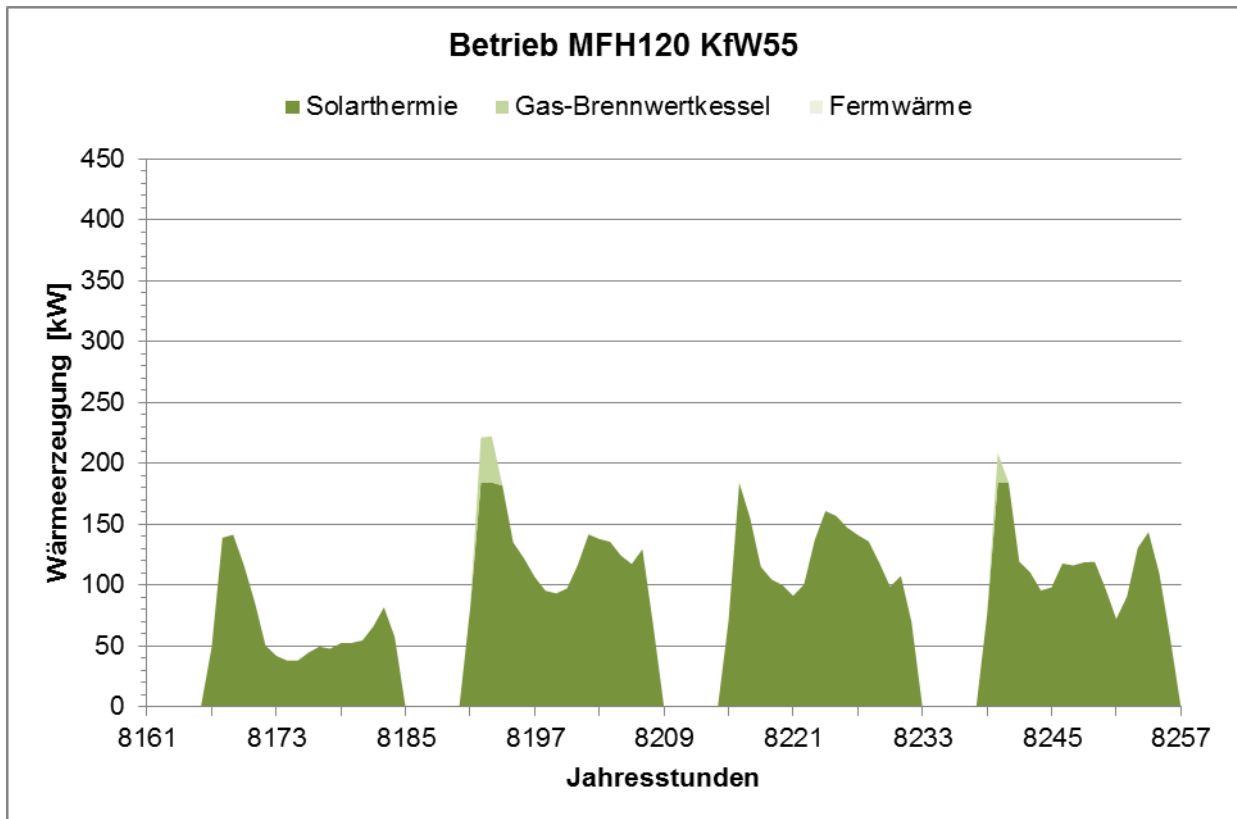


Abbildung 16: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH120 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember

Mit der Betriebsführung wird deutlich, dass viele Volllaststunden und große solarthermische Leistung vor allem durch die Deckung der Grundlast im Tagesverlauf zustande kommen. Der Verlauf der von Tages- und Jahreszeit unabhängigen Wärmeerzeugung durch Solarthermie erscheint unrealistisch und wird im 5. Kapitel weiter diskutiert. Die von Energieträgern abhängigen Technologien, wie Gas-Brennwertkessel, lohnen sich nach minimalen Systemkosten als Investition erst an einzelnen Tagen eines großen Bedarfs, jedoch eher als Investitionen in Fernwärme für die im Jahresverlauf seltenen Spitzenlasten. Andere Referenzgebäude setzen zur Deckung der Grundlast auch Solarthermie ein, haben aber durch andere Randbedingungen eine unterschiedliche Zusammensetzung bei der Deckung größer Lasten. So wird bei MFH32 in allen Sanierungszuständen neben Solarthermie ausschließlich Fernwärme bezogen und bei MFH96 mit einer Limitierung von solarthermischer Leistung durch die Dachfläche neben einem Gas-Brennwertkessel das Groß-BHKW im unsanierten Zustand am Ende des Jahres genutzt. Mit einem höheren Sanierungsstandard sinkt der allgemeine Wärmebedarf, sodass die notwendige solarthermische Wärmeerzeugung für die Grundlast tendenziell reduziert wird. Vereinzelt führt das zwar zu einer größeren Wärmeerzeugung mit Gas-Brennwertkesseln, allerdings kommt dies auch seltener vor, da Tage mit großem Wärmebedarf und Spitzenlasten durch Sanierungen seltener auftreten. Eine Erläuterung der aus der Betriebsführung resultierenden Kosten folgt im nächsten Kapitel.

4.1.3 Kosten

Die Kostenverteilung des Basisszenarios ist für alle Sanierungsstandards in Abbildung 17 dargestellt. Darin sind die gesamten Systemkosten im unsanierten Zustand mit Abstand am größten und werden mit einem KfW100-Standard um rund 48% reduziert. Mit einem KfW55-Standard kann gegenüber dem unsanierten Zustand eine Reduktion der Systemkosten von ca. 54% erzielt werden und gegenüber dem KfW100-Standard eine Reduktion von rund 12%. Nach Kapitel 3 setzen sich die Systemkosten als Summe aus den restlichen in Abbildung 17 gezeigten Kostenarten zusammen. Dabei ist zu erkennen, dass der Anteil der Fernwärmetransmissionskosten und Annuitäten an den Systemkosten vernachlässigbar gering ist, da nach Kapitel 4.1.2 Fernwärme nur geringfügig zur Deckung der Spitzenlasten übertragen wird und generell selten Leistung zugebaut wurde. Die Systemkosten werden also im Wesentlichen durch die mit der Betriebsführung entstehenden variablen und fixen Kosten bestimmt, wobei die variablen Kosten den größten Einfluss auf die starke Reduktion der Systemkosten durch Sanierungen haben. Der Grund für die höheren variablen Kosten im unsanierten Zustand ist die in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 beschriebene, vermehrte Nutzung von Gas-Brennwertkessel, sowie eines Groß-BHKWs, da neben den höheren variablen Betriebskosten gegenüber Solarthermie vor allem der Erdgaspreis pro erzeugte kWh zusätzliche variable Kosten verursacht. Nach Kapitel 4.1.1 wird mit einem KfW55-Standard zwar mehr Gas-Brennwertkessel-Leistung als im unsanierten und KfW100-Sanierungszustand installiert, aber geringfügiger genutzt, sodass auch die variablen Kosten im KfW55-Standard geringer ausfallen. Durch die nach Tabelle 4 mit Abstand kleinsten variablen Betriebskosten und mit der solaren Einstrahlung als kostenlosen Energieträger, fallen bei der Wärmeerzeugung mit Solarthermie hauptsächlich fixe Kosten an. Aus diesem Grund führen häufig, zur Deckung der Grundlast genutzte, große Leistungen von Solarthermie zu minimalen Systemkosten und bilden mit deren fixen Kosten den Hauptteil dieser Systemkosten.

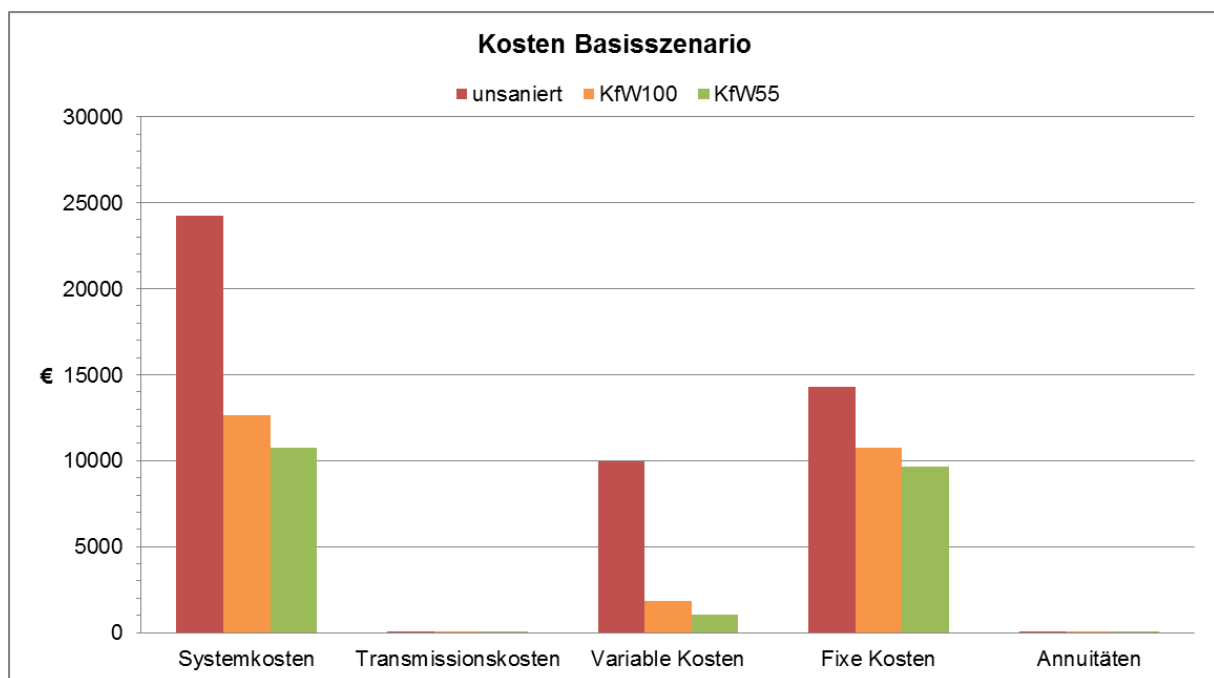


Abbildung 17: Vergleich der optimierten Kosten des Basisszenarios für alle Sanierungsstandards

4.2 Alternativszenario

Das Alternativszenario wird mit derselben Versorgung der ersten Jahresstunde des Basisszenarios berechnet und es wird ebenfalls der gesamte Berechnungszeitraum betrachtet. Da solarthermische Flachkollektoren eigentlich nicht ohne Wärmespeicher verwendet werden und diese im Basisszenario nicht installiert wurden, wird mit diesem Szenario untersucht, ob sich auch eine Kombination aus Solarthermie und Wärmespeicher für das System lohnt. Dafür werden, um gleichzeitig die Sensitivität der Kostenparameter zu testen, die Investitions-, die fixen und die variablen Betriebskosten eines Wärmespeichers nach Tabelle 4 zu denen des Solarthermie-Flachkollektors hinzu addiert.

Für den Leistungszubau technischer Anlagen und deren Vollaststunden ergibt sich im Alternativszenario kein Unterschied zum Basisszenario. Das Gleiche gilt dementsprechend für den Vergleich der Wärmeerzeugung und den zeitlichen Verlauf der Betriebsführung, sodass selbst die vorgenommene Kostenerhöhung durch einen Wärmespeicher den Vorteil eines kostenlosen Energieträgers gegenüber den restlichen Technologien nicht eingrenzt.

Die Variation der Kostenparameter hat allerdings eine Veränderung der Systemkosten zur Folge, die in Abbildung 18 dargestellt ist. Darin werden die, nach Kapitel 4.1.3 für die Systemkosten hauptsächlich relevanten, fixen und variablen Kosten des Jeweiligen Sanierungszustands beider Szenarien kumuliert dargestellt. Die Sanierungszustände des Alternativszenarios sind dabei mit dem jeweiligen Zustand "+S" bezeichnet, was abgekürzt "mit Speicher" bedeutet. Deutlich erkennbar bleiben die fixen Kosten in dem jeweiligen Sanierungszustand auf der gleichen Höhe und werden demnach durch zusätzliche Kosten eines Wärmespeichers marginal beeinflusst. Im unsanierten Zustand führen die zusätzlichen Kosten eines Wärmespeichers zu einer Verdreifachung der variablen Kosten. Bei einem KfW100-Standard sind die variablen Kosten mit Speicher ca. 7-mal so groß und bei einem KfW55-Standard ca. 8-mal so groß wie ohne Speicher. Zusammenfassend stellen die variablen Kosten durch einen enthaltenen Wärmespeicher im Gegensatz zum Basisszenario den Großteil der Systemkosten dar und führen zu einer Verdopplung dieser in jedem Sanierungszustand, wobei die prozentuale Reduktion der Systemkosten durch höhere Sanierungsstandards erhalten bleibt.

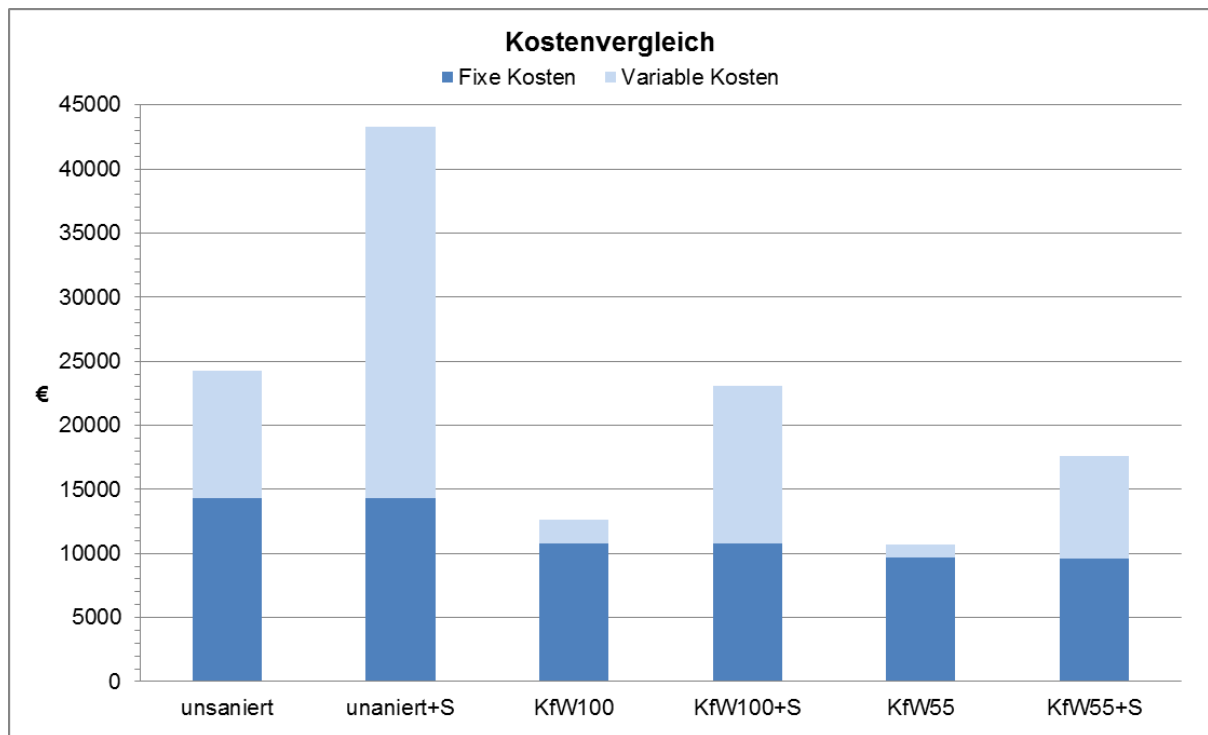


Abbildung 18: Vergleich der optimierten Kosten beider Szenarien für alle Sanierungsstandards

5 Diskussion und Ausblick

Die Auswertung der Modellszenarien in Kapitel 4 zeigt ein kostenminimales Energieversorgungssystem, in dem der Wärmebedarf unabhängig von verschiedenen Sanierungszuständen über das ganze Jahr hinweg fast ausschließlich mit Solarthermie gedeckt wird. Auffällig ist, dass von den Technologien, die Energieträger abhängig sind wenn, dann nur Gas-Brennwertkessel geringfügig für seltene Spitzenlasten eingesetzt werden, die durch einen höheren Sanierungsstand reduziert werden. Dies kommt daher, dass Solarthermie im Vergleich der Input-Technologiearten besonders geringe variable Betriebskosten hat und keine Energieträger zur Wärmeerzeugung notwendig sind, die zusätzliche variable Kosten verursachen. Das wird vor allem durch die Ergebnisse des Alternativszenarios deutlich, die zeigen, dass eine Erhöhung der variablen Betriebskosten einen starken Effekt auf die Systemkosten hat. Die Auswertung der Betriebsführung zeigt, dass im Modell die solarthermische Leistung zur Wärmeerzeugung unabhängig von Tages und Jahreszeiten je nach Bedarf voll genutzt werden kann. Dies ist in der Realität nicht möglich, da die Wärmeerzeugung durch Solarthermie von solarer Einstrahlung als essentielle Energiezufuhr abhängig ist. Eine realistische Abbildung ist dementsprechend, auf dem Stand des in dieser Arbeit verwendeten Modells nur begrenzt möglich.

Die nach den Fragestellungen aus Kapitel 1.2 in der Arbeit betrachteten, umfangreichen Sanierungen zu KfW-Effizienzhaus-Standards, führen mit einer erwarteten Reduktion des Wärmeverbrauchs auch zu einer Reduktion der Systemkosten.

Dabei kann festgestellt werden, dass dieser Effekt durch die Veränderung vom unsanierten Zustand der Gebäude, zu einem Sanierungsstand, der den gesetzlichen Mindestanforderungen entspricht, vier Mal so stark ist, wie durch die Veränderung von einem Sanierungsstand mit Mindestanforderungen zu einem Passivhaus-Dämmstandard. Die Höhe der zugebauten Leistung verschiedener Technologiearten zur Bereitstellung der Wärme wird durch Sanierungen zwar beeinflusst, jedoch haben Investitionen in Form von Annuitäten nur einen vernachlässigbar geringen Anteil an den Systemkosten, während die dafür wesentlich ausschlaggebendere Betriebsführung nur marginal mit Sanierungen variiert. Auch eine Erhöhung der Kostenparameter nach Kapitel 4.2 verändert die Konstellation der zur Wärmeerzeugung eingesetzten technischen Anlagen in den verschiedenen Sanierungszuständen nicht. Insgesamt muss eine Bewertung von Sanierungsmaßnahmen durch das Optimierungsmodell allerdings auch kritisch betrachtet werden, da nach Kapitel 2.3 bereits die Erzeugungsweise synthetischer Lastprofile zu unrealistischen Verläufen des Wärmebedarfs führen kann, sodass in einzelnen Jahresstunden mit einem Passivhaus-Dämmstandard mehr Wärme benötigt wird, als mit einem Sanierungsstand, der den gesetzlichen Mindestanforderungen entspricht.

Verglichen mit dem Stand der Wissenschaft nach Kapitel 1.4, geht es in dem Forschungsprojekt "EnEFF: Stadt-Smart Energy Management" auch um den Kontext finanzieller Anreize in einem Wärmeverteilnetz, es wird jedoch ein aktives Erzeugungsmanagement untersucht, im Gegensatz zu den in dieser Arbeit betrachteten Sanierungen. Die Studie "Energiesystem Deutschland 2050" des Fraunhofer ISE hat ebenfalls ein kostenoptimales Energiesystem untersucht, wobei allerdings neben Gebäudesanierungen im Wärmesektor auch der Stromsektor für das ganze Land betrachtet wurde und Technologien, wie KWK-Anlagen als Verbindung dieser Bereiche abgebildet wurden. Die Verbindung des Strom- und Wärmesektors durch KWK zur Betrachtung des Gesamtsystems ist auch ein wesentliches Vorhaben im Rahmen des Projektes "StroWae – Analyse einer Marktrolle zur Optimierung der dezentralen Strom-Wärmenutzung" des Fraunhofer ISE, von dem diese Arbeit nur einen Teilbereich darstellt. Im Gegensatz zu anderen Forschungsvorhaben wie "EnEFF: Stadt - Kommunale Strom- und Wärmenetze integriert planen und optimieren", bei dem es neben der die Kopplung von Energieteilsystemen im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung auch um minimalen Primärenergieeinsatz geht, setzt das Projekt "StroWae" den Fokus der Optimierung auf minimale Kosten bei Wahrung der Systemstabilität.

Forschungsbedarf besteht im Bereich der ganzheitlichen Energiesystemoptimierung in der nachhaltigen Betrachtungsweise, wobei neben der Versorgungssicherheit, sowie ökonomischer Effizienz der minimale Energie- und Ressourcenverbrauch im Mittelpunkt der Optimierung stehen könnte. Dabei kommt es nicht nur auf einen reduzierten Primärenergieverbrauch durch effizientere Technologien und Sanierungen an, sondern auch auf deren Herstellungsbedingten Ressourcenverbrauch, Rohstoffimportabhängigkeit und Wiederverwendbarkeit bzw. Entsorgungsaufwand. Forschungsaufgaben in diesem Zusammenhang wären, die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen einem reinen kosten- und ressourcenoptimalen System zu ermitteln, sowie festzustellen ob diese Ausrichtungen auch kombinierbar sind.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2012): Energiestatistiken-Internationaler-Energiemarkt. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-internationaler-energiemarkt,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. (10.08.2015)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014): Bekanntmachung Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-6-energieforschungsprogramm,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. (22.08.2015)

Bundesverband Erneuerbare Energie e.V (2014): Wärme. Berlin. <http://www.bee-ev.de/Energieversorgung/Waerme/index.php>. (06.08.2015)

Deutsche Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. <http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?blob=publicationFile&v=5>. (05.08.2015)

EnEFF: Stadt - Forschung für die energieeffiziente Stadt (2014): Kommunale Strom- und Wärmenetze integriert planen und optimieren. <http://www.eneff-stadt.info/de/planungsinstrumente/projekt/details/hybrides-planungsverfahren-zur-energieeffizienten-waerme-und-stromversorgung-von-staedtischen-verte/>. (23.08.2015)

Feldmann, Rainer (2012): EnEV-Anforderungen und KfW-Förderprogramme für energieeffizientes Bauen und Sanieren. Frankfurt. http://www.hessenenergie.de/Downloads/DI-Nach/dln-emodm/emodm12-dfs/4_%20Feldmann-120417.pdf. (10.08.2015)

Felsmann, C.; Seifert, J.; Grunewald, J.; Schach, R.; Schegner, P. (2012): Smart Energy Management - intelligentes Energiemanagement von Strom - Gas - Wärme - Kälte. http://www.eneff-stadt.info/fileadmin/media/Projektbilder/Waerme-und_Kaeltenetze/Smart_Energy_Management/Abschlussbericht_Smart_Energy_Management_121212.pdf (22.08.2015)

Fischer, David; Scherer, Johannes; Haertl, Andreas; Byskov Lindberg, Karen; Elci, Mehmet; Wille-Haussmann, Bernhard (2014): Stochastische Modellierung und Simulation von Energieflüssen für Wohnquartiere. <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453641105.html>. (02.09.2015)

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2013): ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050 Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO -Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien. <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf>. (30.08.2015)

Herkel, Sebastian; Bachmaier, Andreas; Elci, Mehmet; Kagerer, Florian; Narmsara, Sattaya (2014): WEINGARTEN 2020 Forschungs- und Demonstrationsvorhaben im Rahmen des Förderprogramms EnEFF-Stadt des BMWi. http://www.eneff-stadt.info/fileadmin/media/Projektbilder/Pilotprojekte/Freiburg_Weingarten/Projekt-Abschlussbericht_Phase_I_Weingarten2020_20140131.pdf (26.08.2015)

Kallrath, Josef (2013): Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Springer Verlag.

Maas, Anton; Schlitzberger, Stephan (2014): DIN V 18599 für Wohngebäude – verbesserte Bewertungsansätze und Überprüfung der Anwendungsmöglichkeit auf das Effizienzhaus Plus Konzept. <http://www.irbnet.de/daten/rswb/14049014899.pdf>. (26.08.2015)

Martens, Florian; Brühl, Hannes (2014): Robust, flexibel, unverzichtbar - Verteiler-Lkw bilden das Rückgrat des regionalen Gütertransports. Mercedes-Benz.

<http://www.presseportal.de/pm/28486/2697106>. (07.08.2015)

Olivier, Jos; Janssens-Maenhout, Greet; Muntean, Marilena; Peters, Jeroen. (2013): Trends in Global CO2 Emissions: 2013.

http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/pbl-2013-trends-in-global-co2-emissions-2013-report-1148.pdf.

(07.08.2015)

Roland Knauer (2014): Pumpen für die Ewigkeit. Spektrum.de.

<http://www.spektrum.de/news/ewigkeitskosten-wasser-pumpen-bis-in-alle-ewigkeit-spektrum-de/1222444>.

(07.08.2015)

Ziesing, Hans-Joachim; Rohde, Clemens; Kleeberger, Heinrich; Tzscheutschler, Peter; Geiger, Bernd; Frondel, Manuel; Ritter, Nolan (2013): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012. Berlin.

www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_endbericht_anwendungsbilanzen_2011-2012_endg.pdf. (06.08.2015)

Anhang

A Wärmebedarf

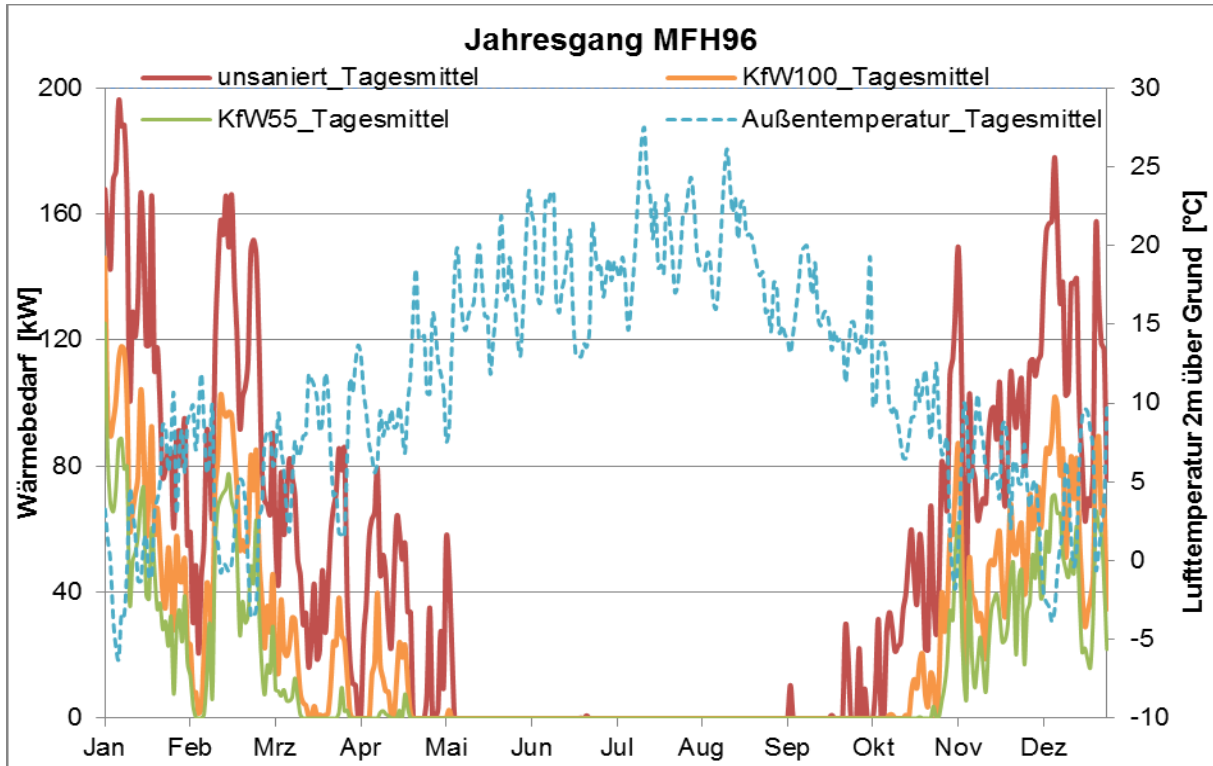


Abbildung 19: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen

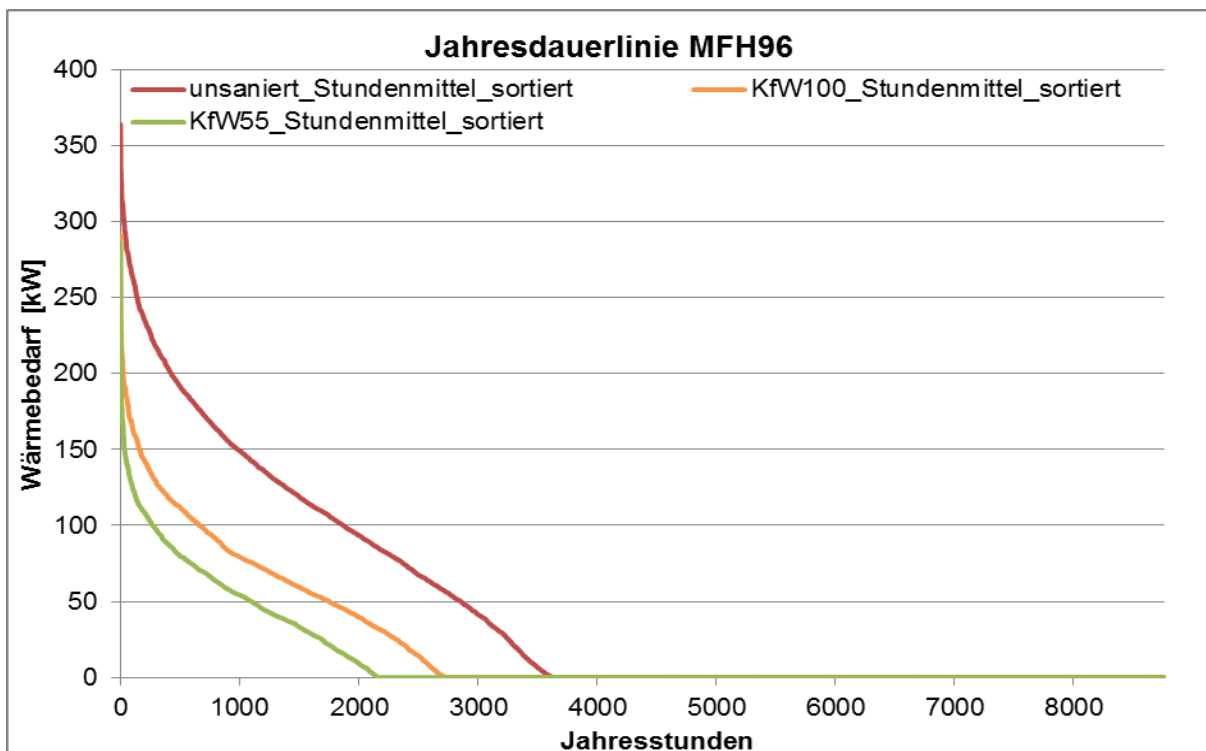


Abbildung 20: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen

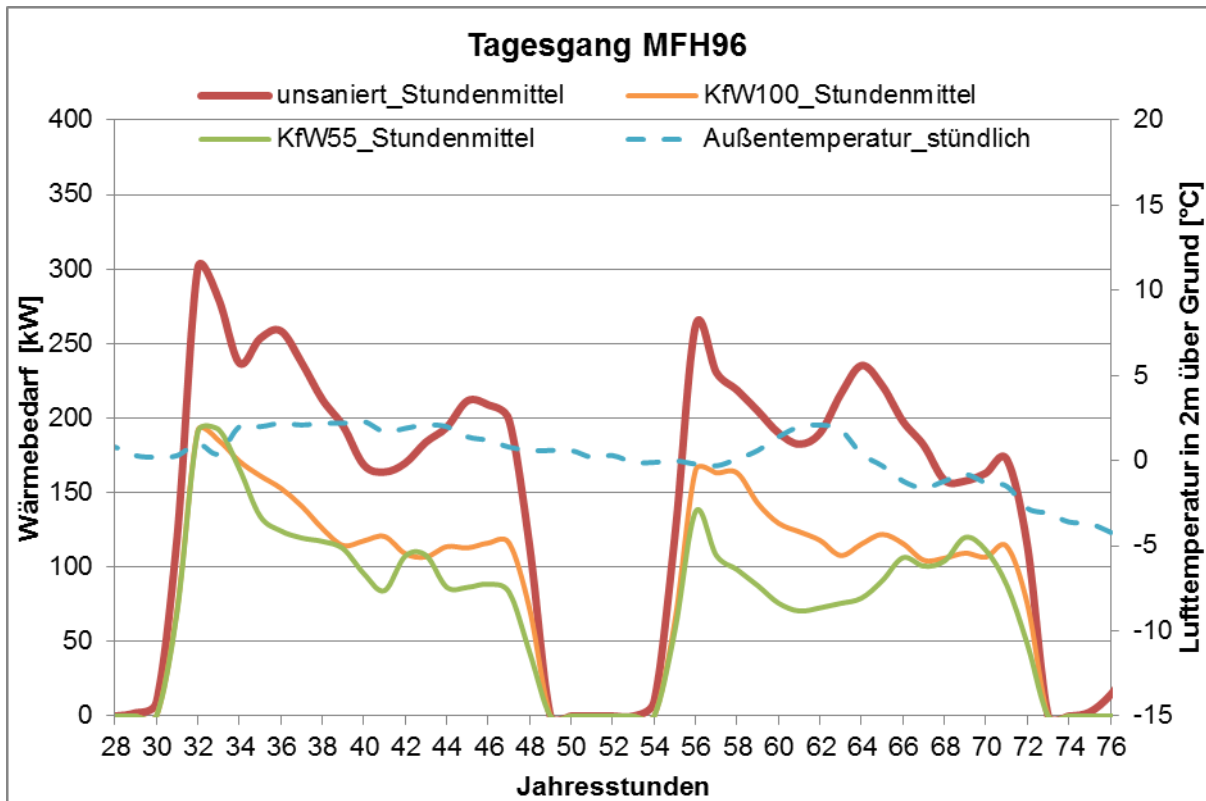


Abbildung 21: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH96 in allen Sanierungszuständen

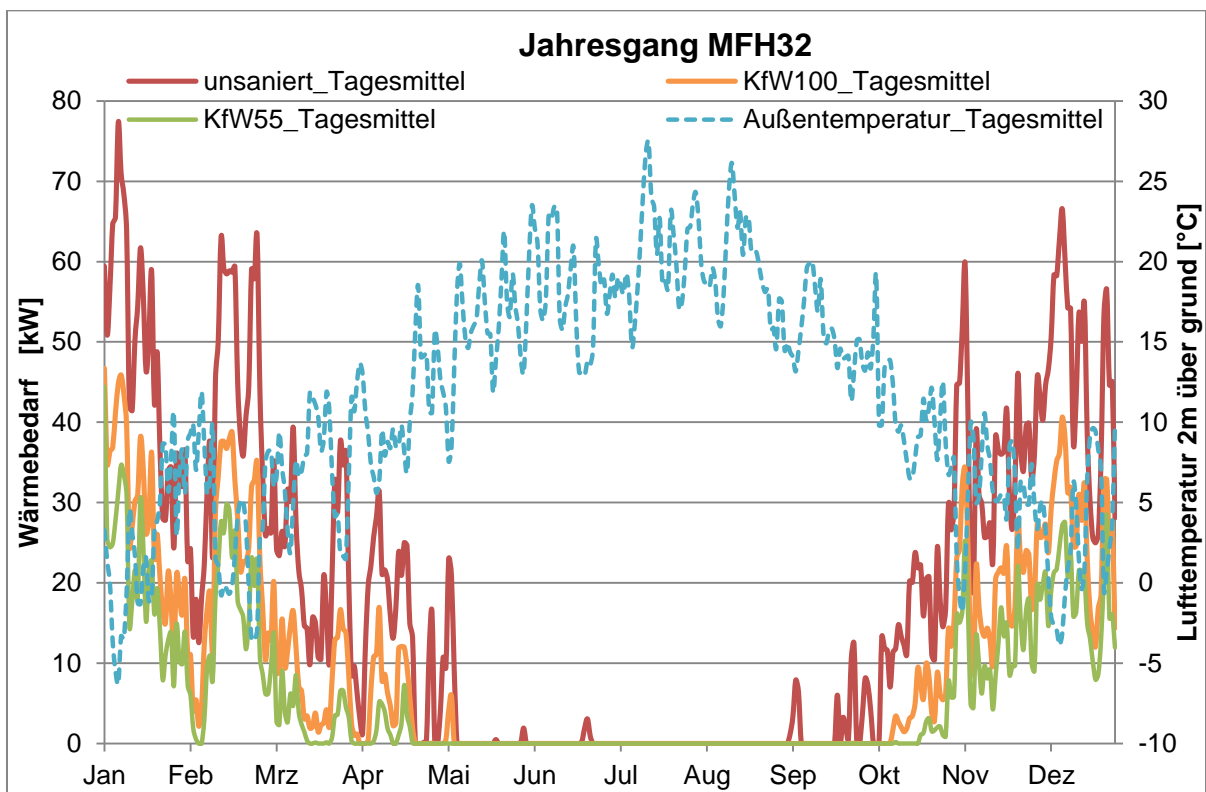


Abbildung 22: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen

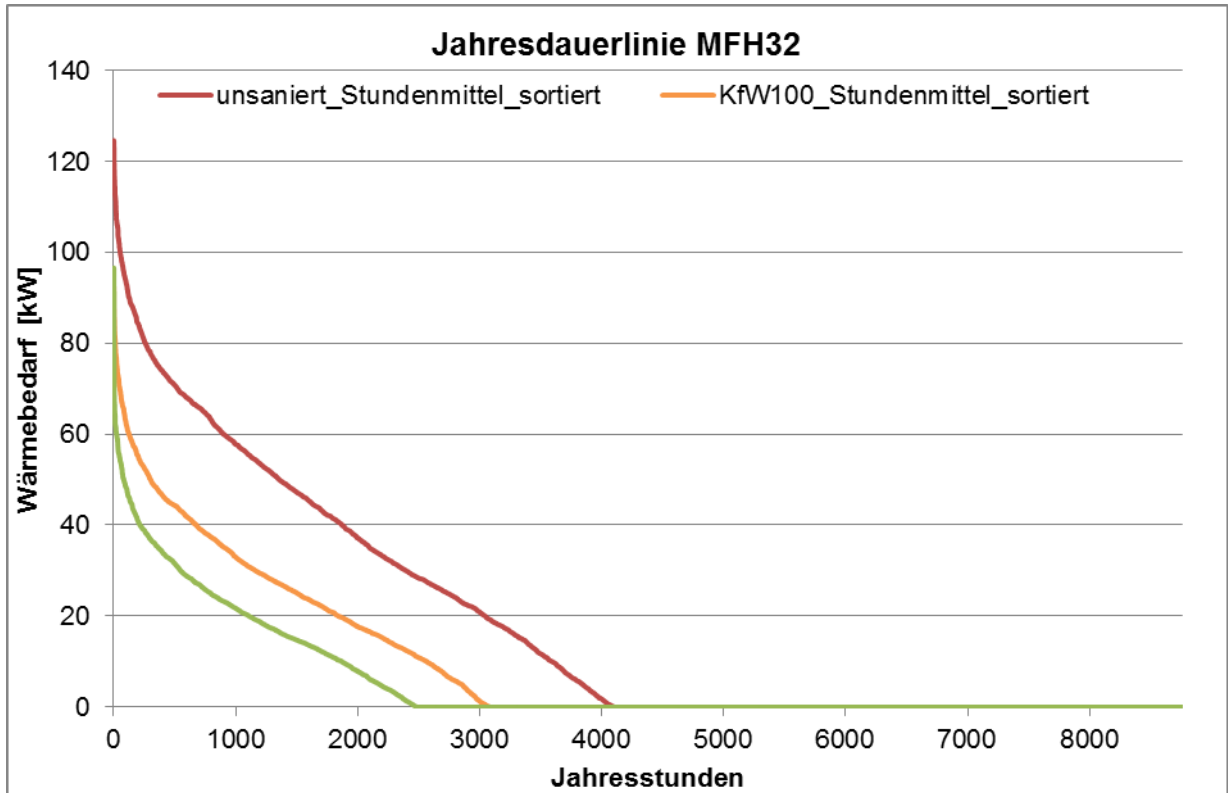


Abbildung 23: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen

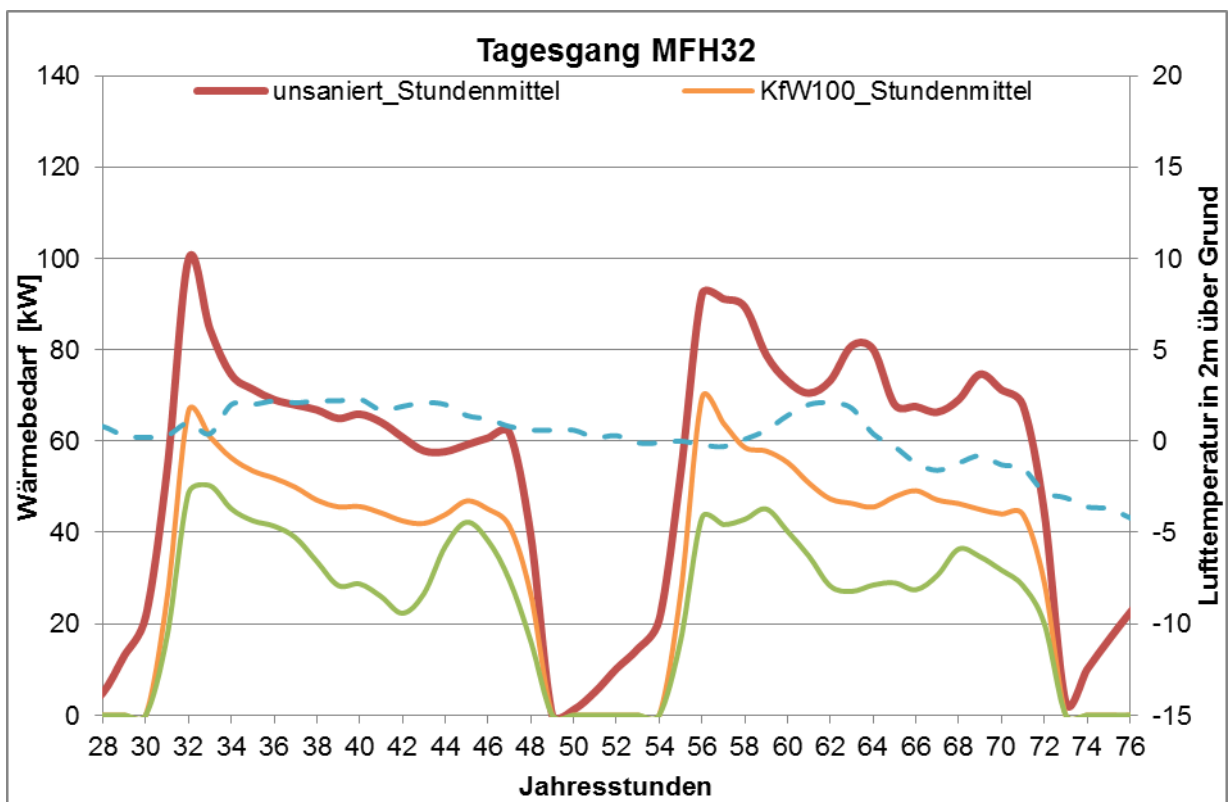


Abbildung 24: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH32 in allen Sanierungszuständen

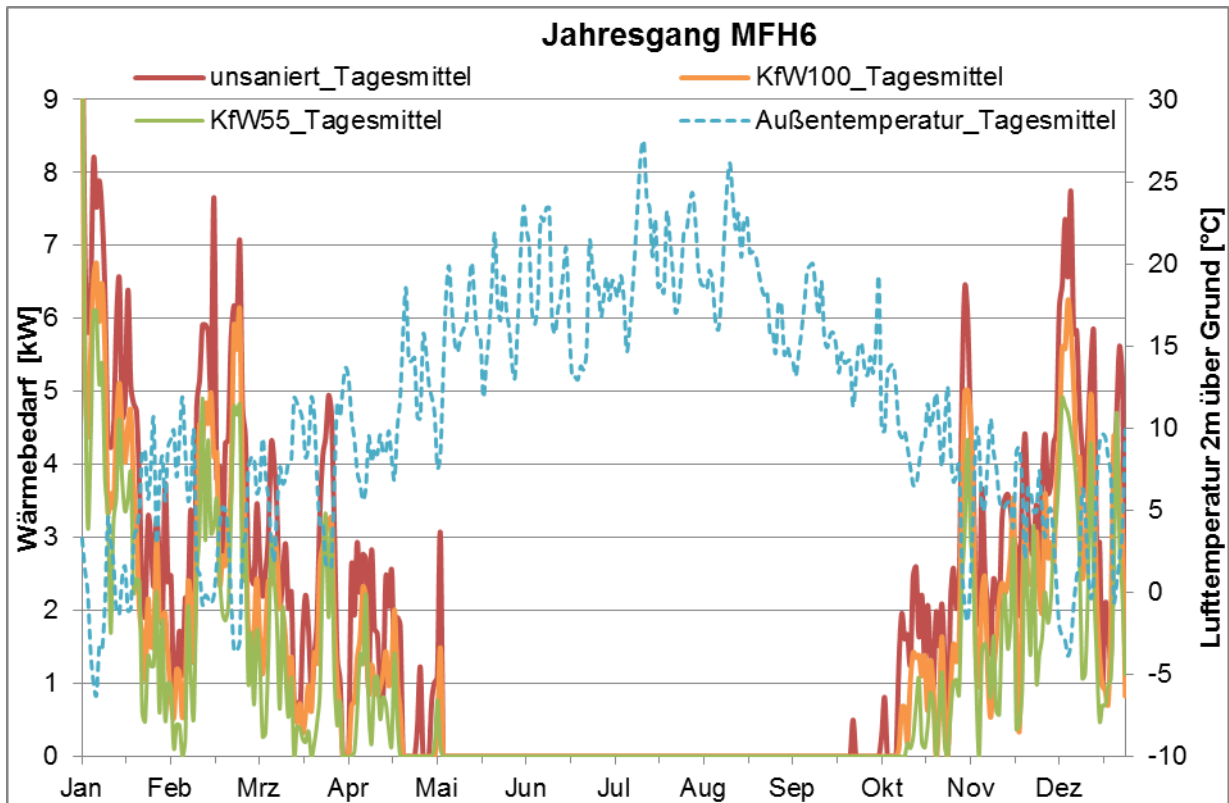


Abbildung 25: Jahresverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Tagesmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen

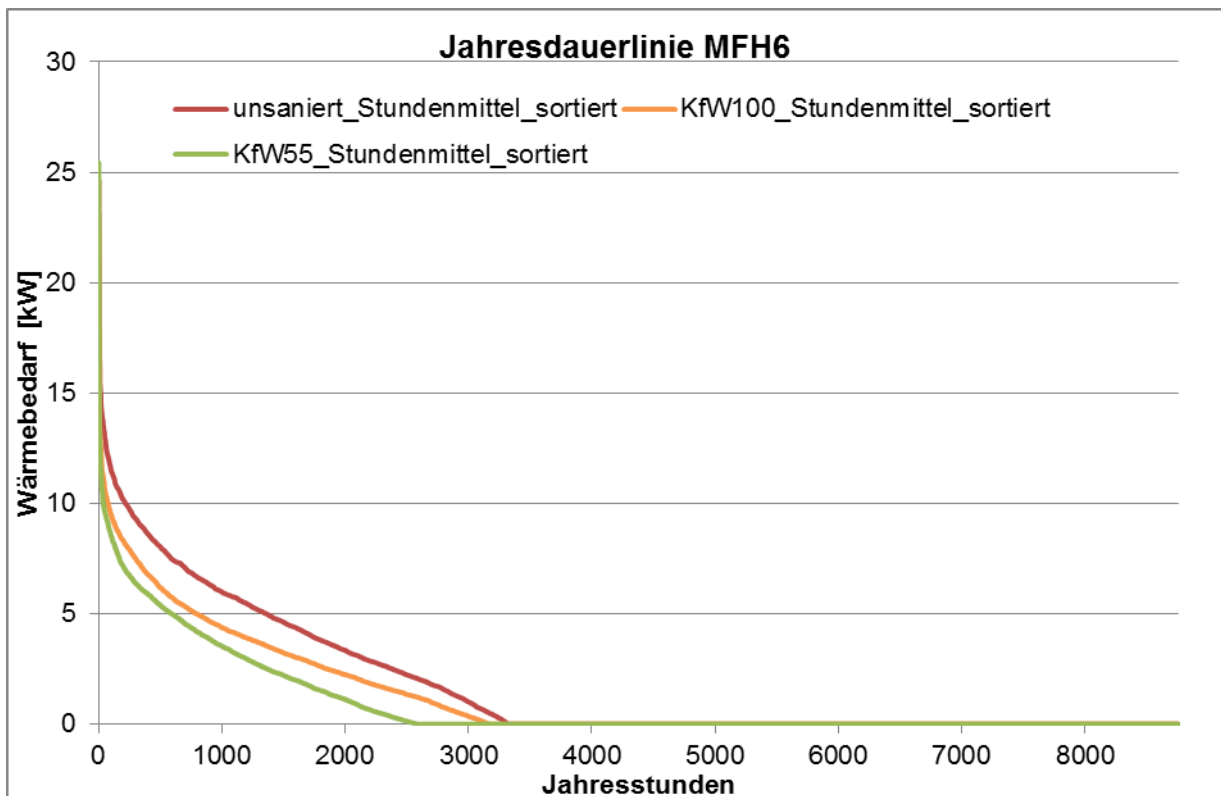


Abbildung 26: Jahresdauerlinie der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen

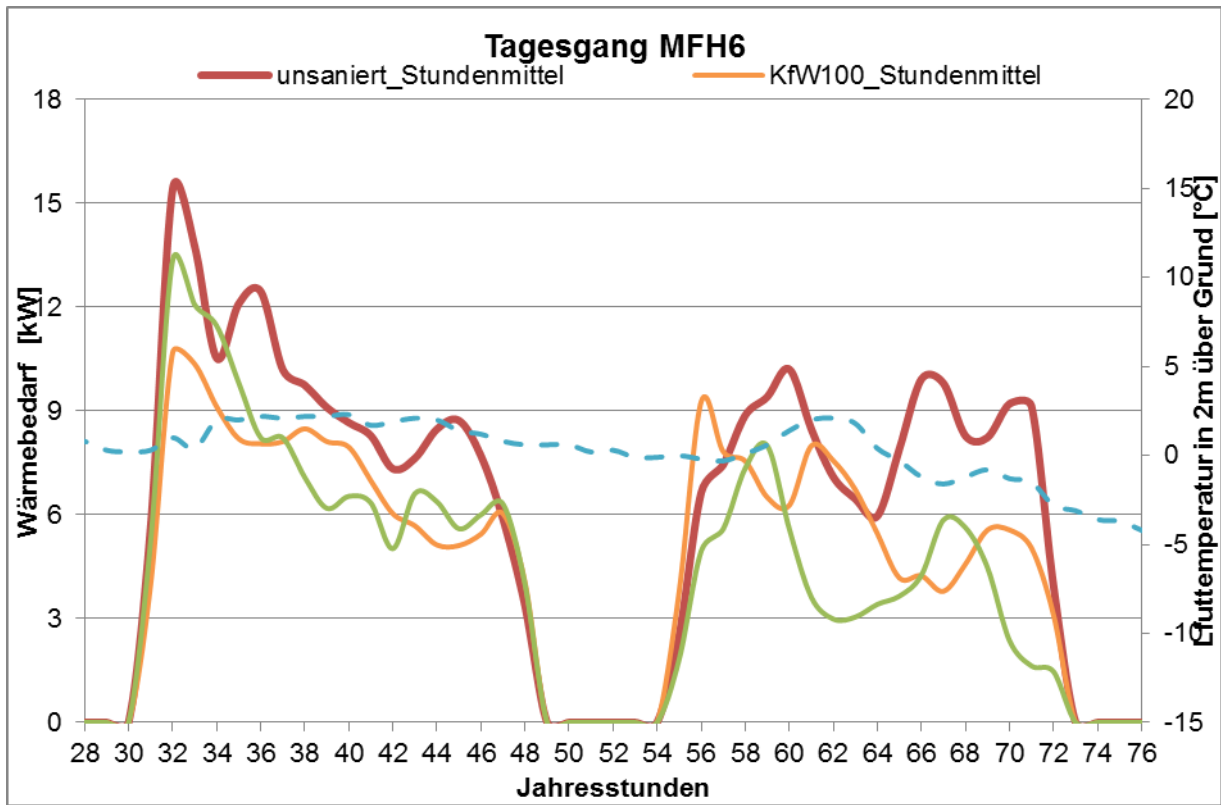


Abbildung 27: Tagesverlauf der durch SynPro berechneten Lasten in Form von Stundenmittelwerten für MFH6 in allen Sanierungszuständen

B Wärmenetz

Tabelle 5: Vordefiniertes Wärmeverbundnetz (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)

Start	Ziel	Transportgrenze [kW]	Leitungslänge [m]
BHKW	MFH32	28940	342
MFH32	BHKW	0	342
BHKW	MFH120	0	668
MFH120	BHKW	0	668
BHKW	MFH96	0	900
MFH96	BHKW	0	900
BHKW	MFH6	0	1499
MFH6	BHKW	0	1499
MFH32	MFH120	12283	326
MFH120	MFH32	0	326
MFH32	MFH96	0	558
MFH96	MFH32	0	558
MFH32	MFH6	0	1156
MFH6	MFH32	0	1156
MFH120	MFH96	28940	232
MFH96	MFH120	0	232
MFH120	MFH6	0	831
MFH6	MFH120	0	831
MFH96	MFH6	10918	598
MFH6	MFH96	0	598

C Gebäudegrenzwerte

Tabelle 6: Grenzwerte der installierbaren Leistung nach Art der Technologie (Datengrundlage: Fraunhofer ISE)

Technologie	MFH6	MFH32	MFH96	MFH120	zentral-BHKW
Holzpellet-Kessel	26	131	311	346	
Luft-Wärmepumpe	26	131	311	346	
Sole-Wärmepumpe	26	131	311	346	
Solarthermie-Flachkollektor	46	173	141	420	
Biogas-BHKW	0	261	311	567	10,000
Micro-BHKW	0	0	0	0	
Mini-BHKW	52	0	0	0	
Groß-BHKW	0	261	311	567	10,000
Gas-Brennwertkessel	26	131	311	346	
Öl-Niedertemperaturkessel	26	131	311	346	
Fernwärme	26	131	311	346	
Wärmespeicher	8,343	15,761	0	5,307	

D Ergebnisse der Betriebsführung

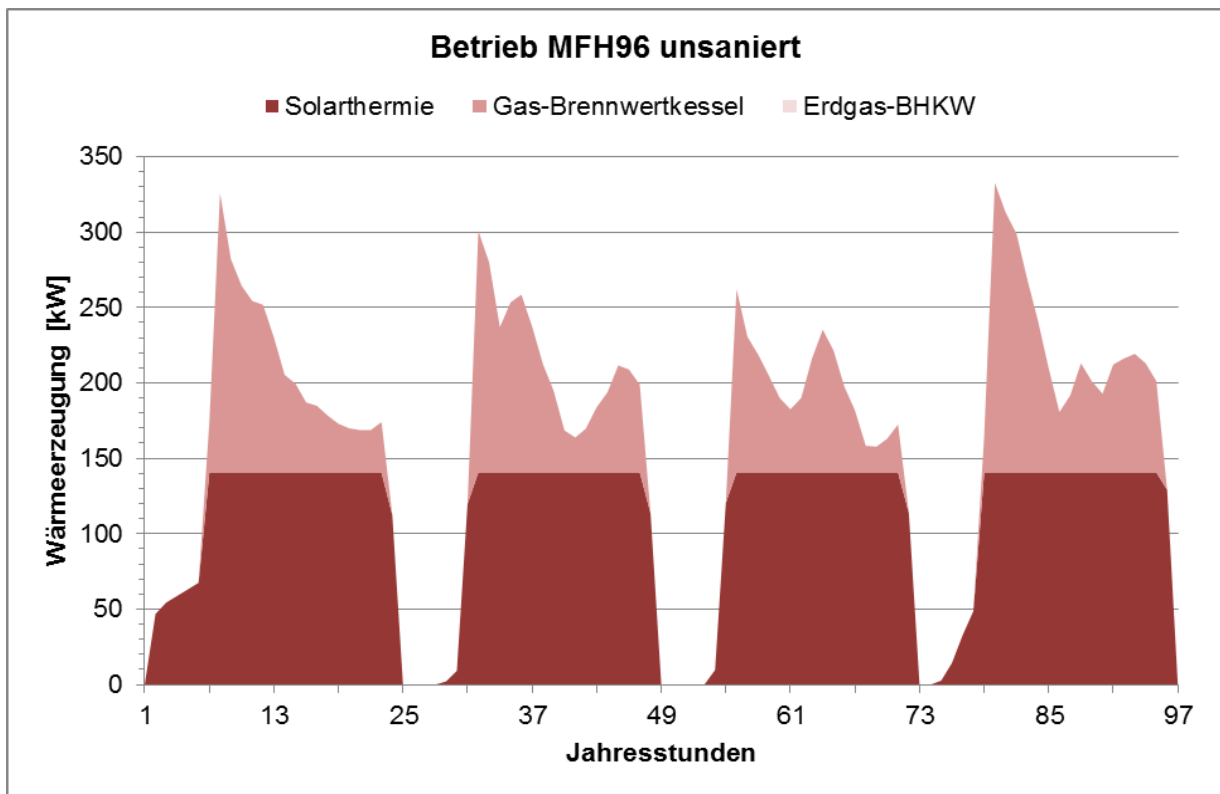


Abbildung 28: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar

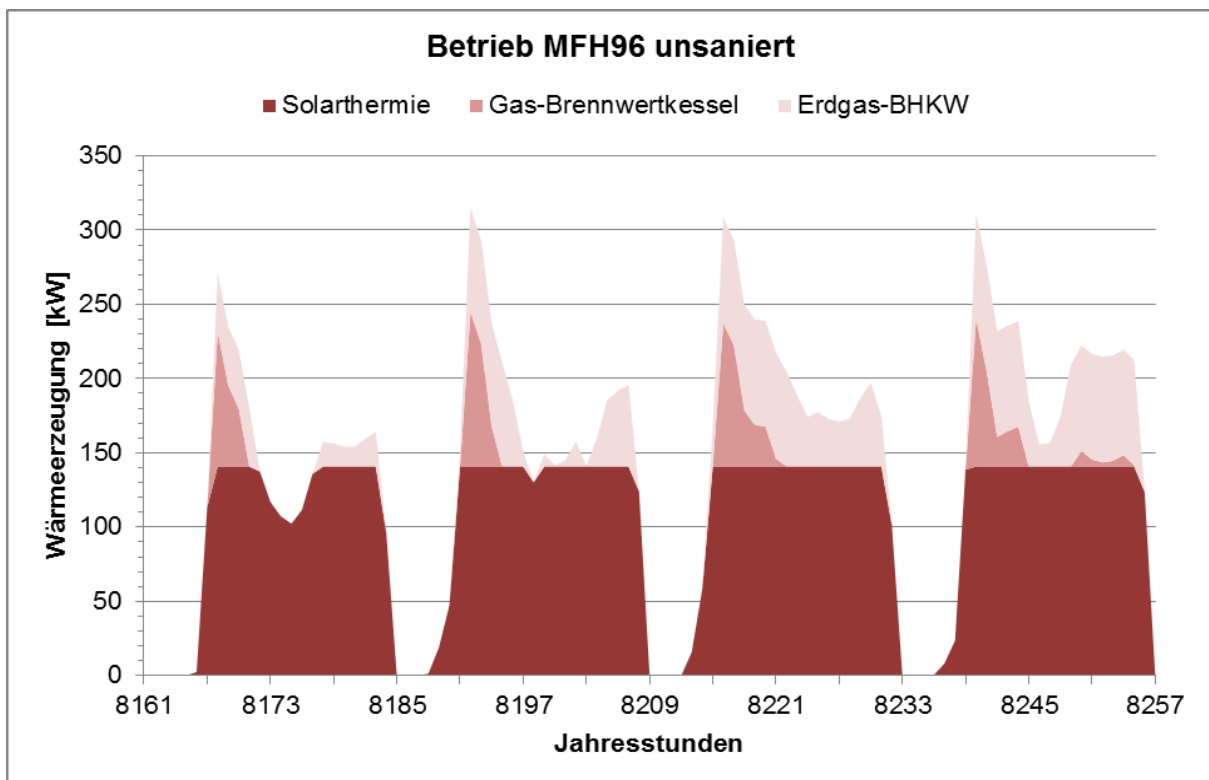


Abbildung 29: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember

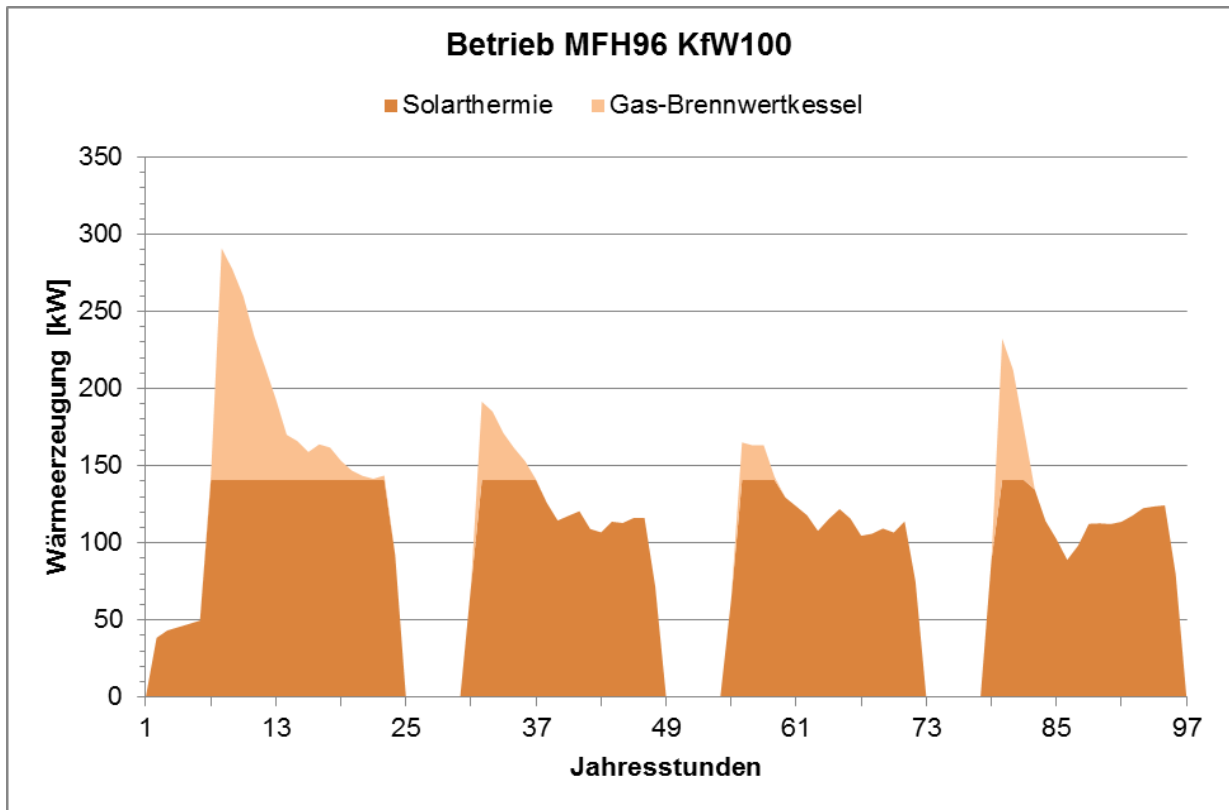


Abbildung 30: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH96 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar

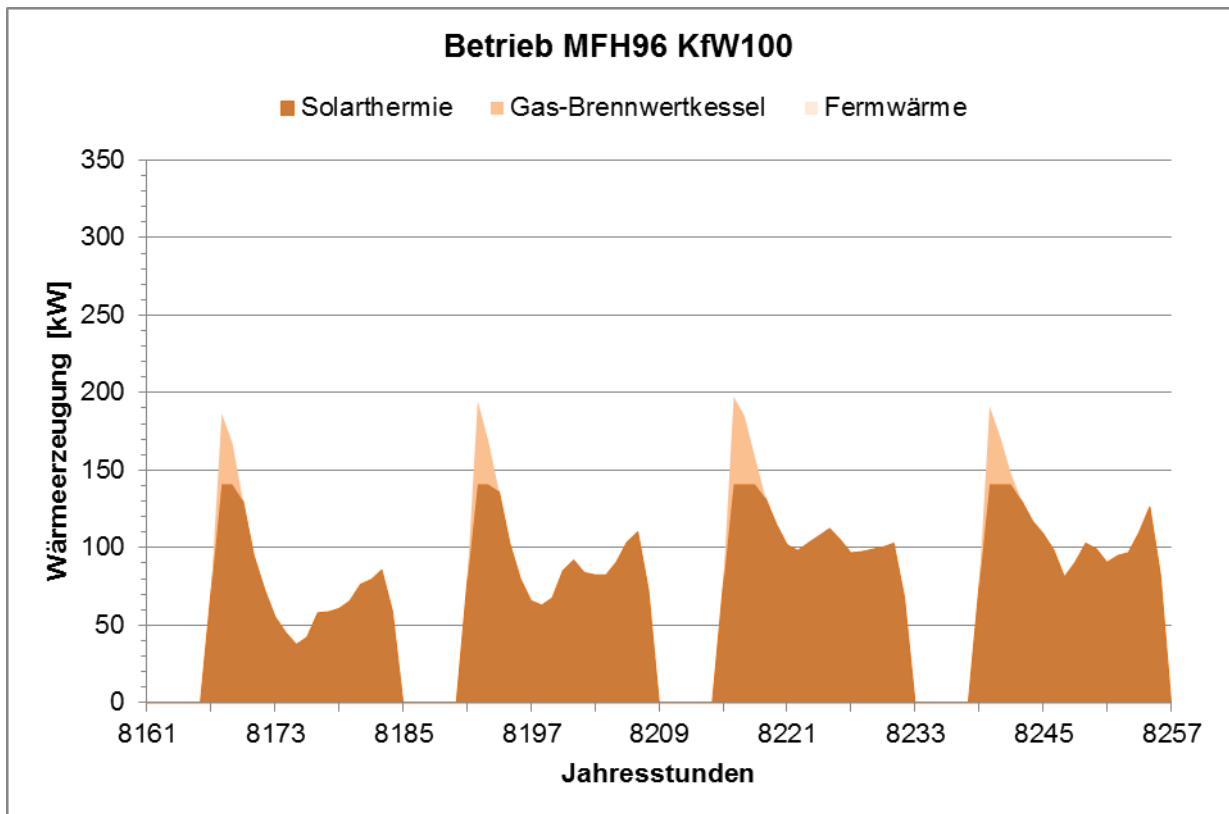


Abbildung 31: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH96 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember

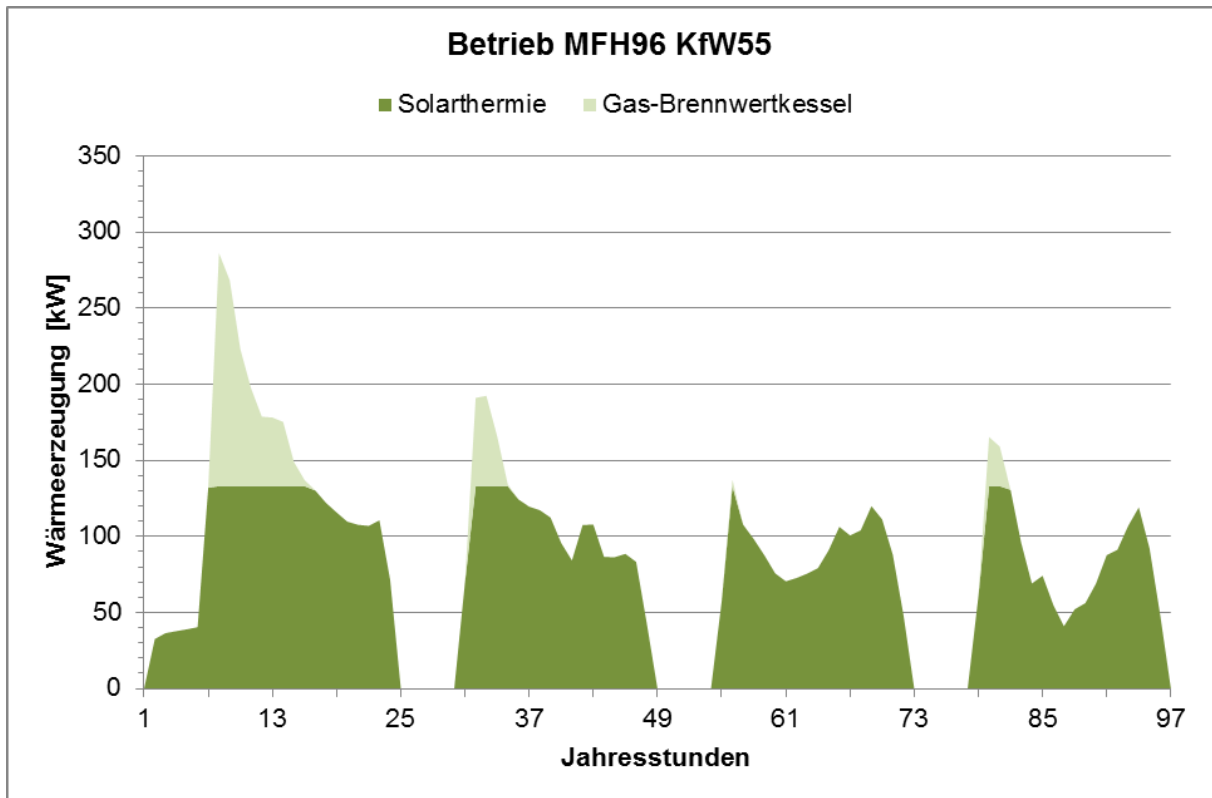


Abbildung 32: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar

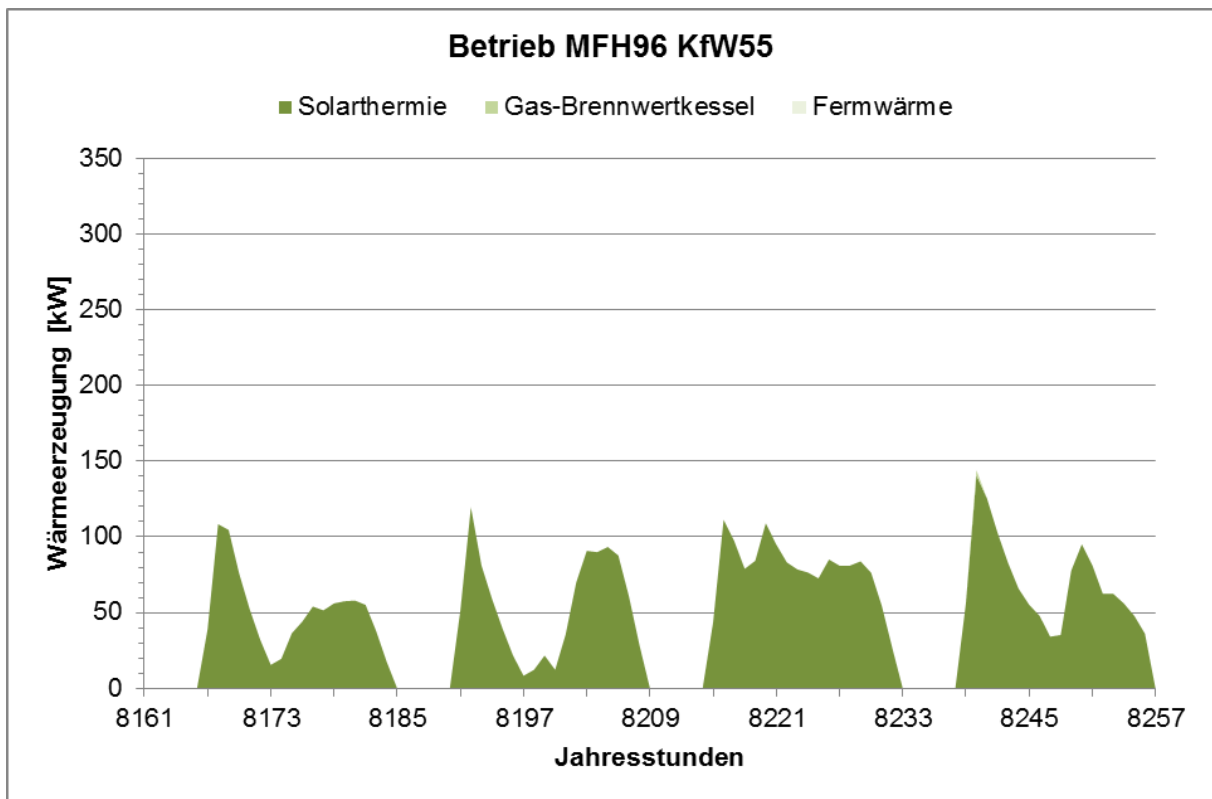


Abbildung 33: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH96 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember

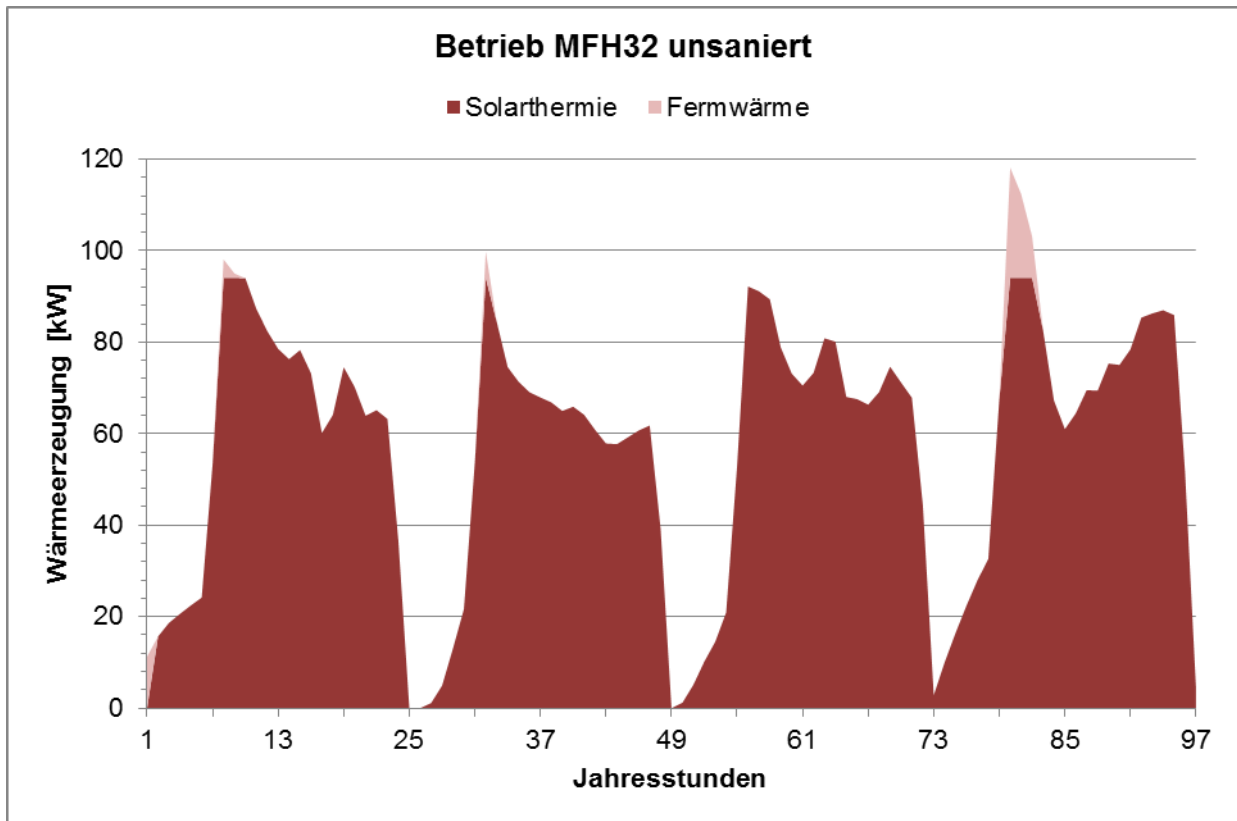


Abbildung 34: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH32 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar

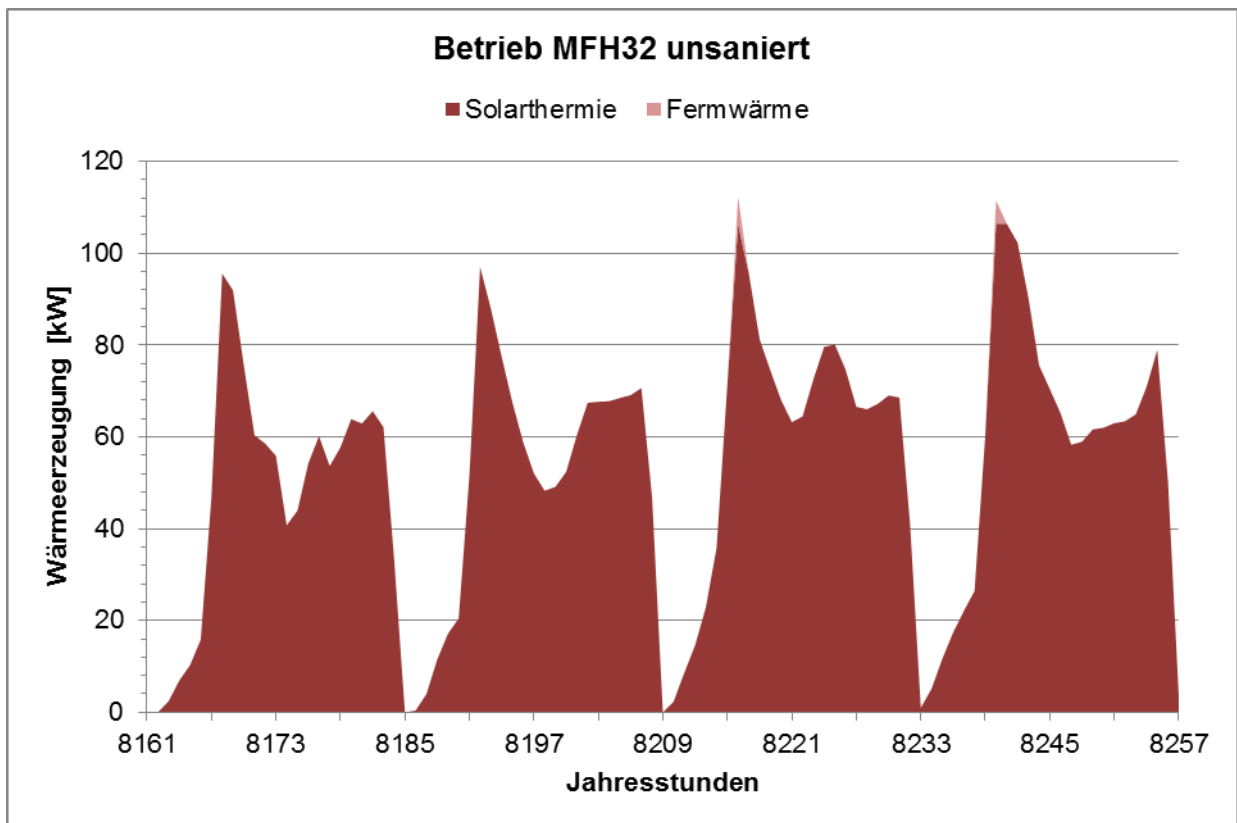


Abbildung 35: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH32 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember

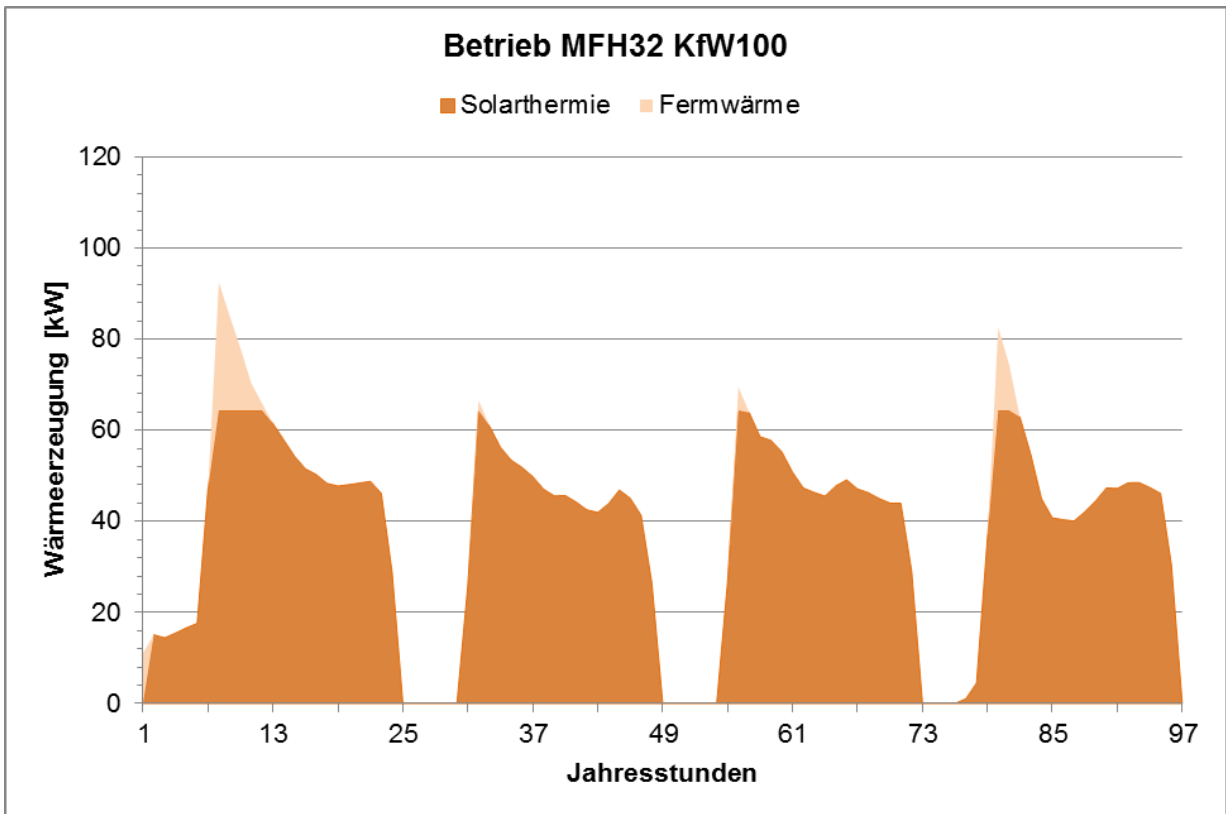


Abbildung 36: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar

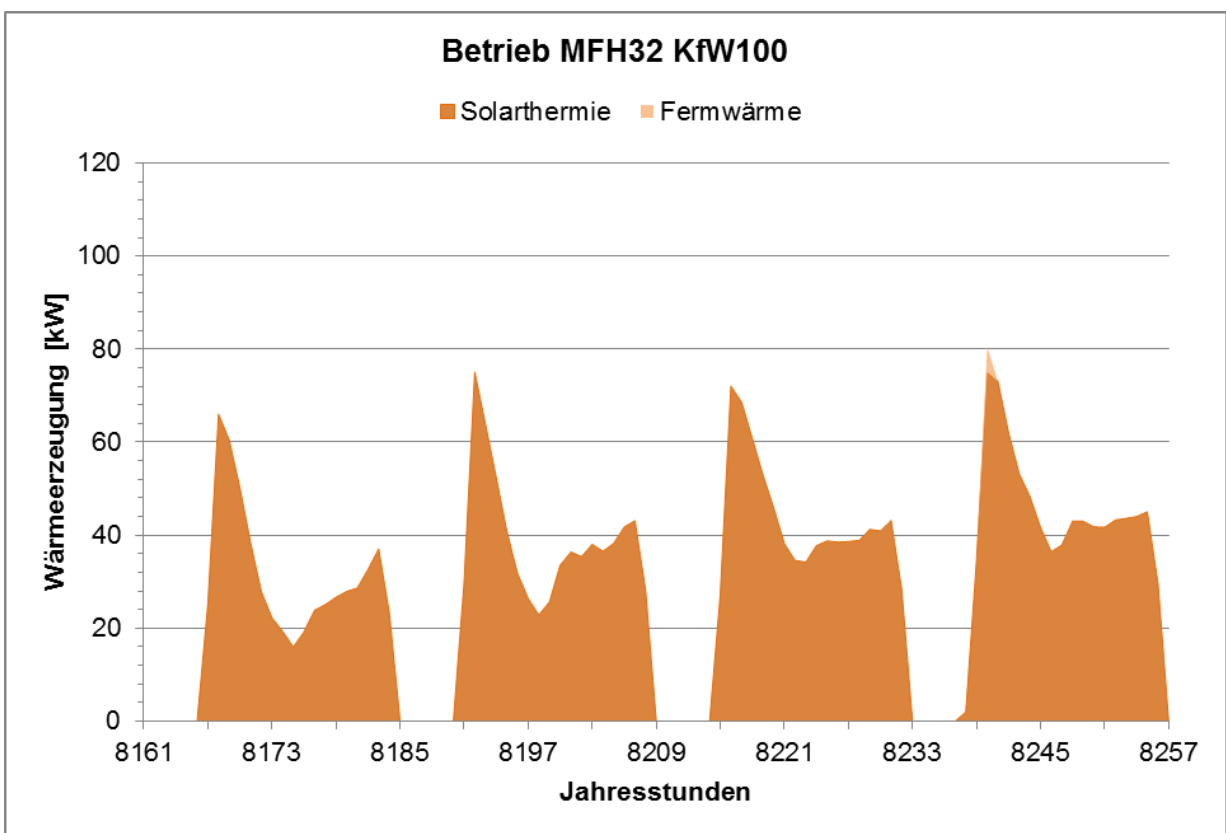


Abbildung 37: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH32 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember

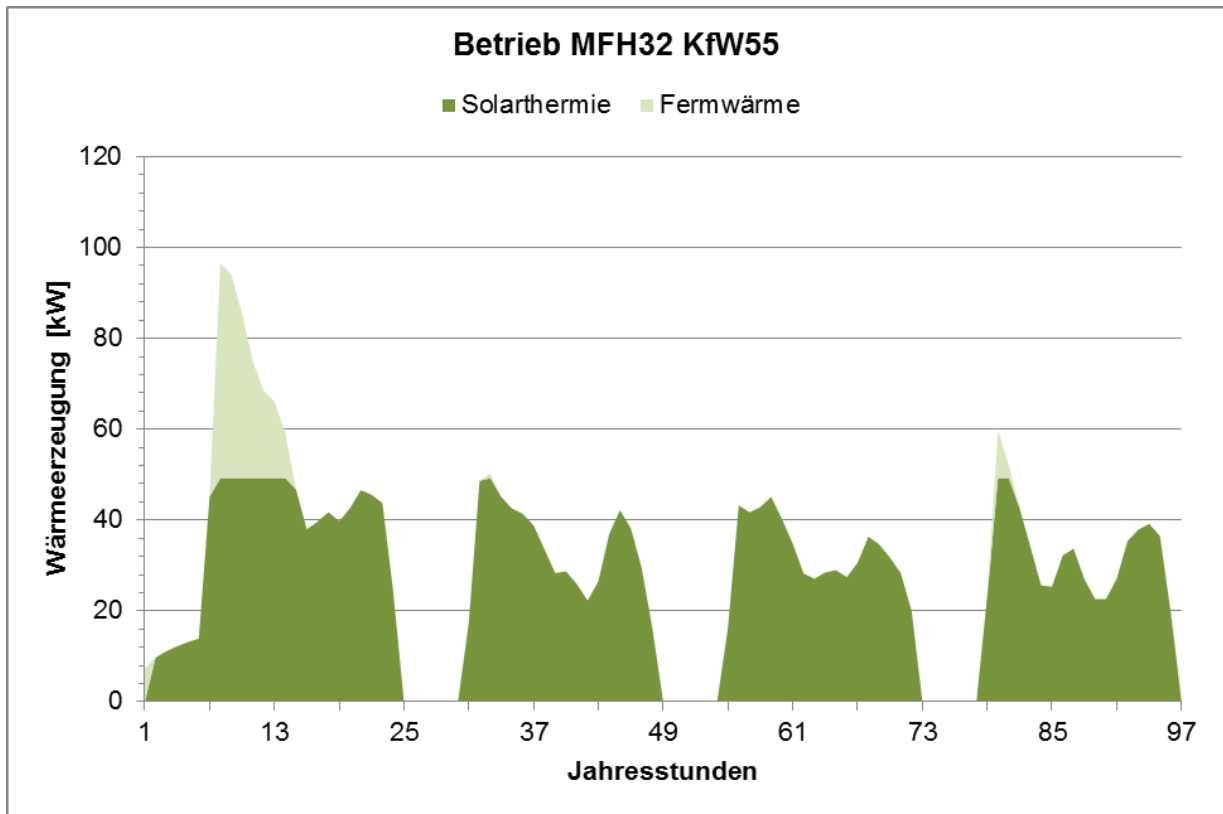


Abbildung 38: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH32 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar

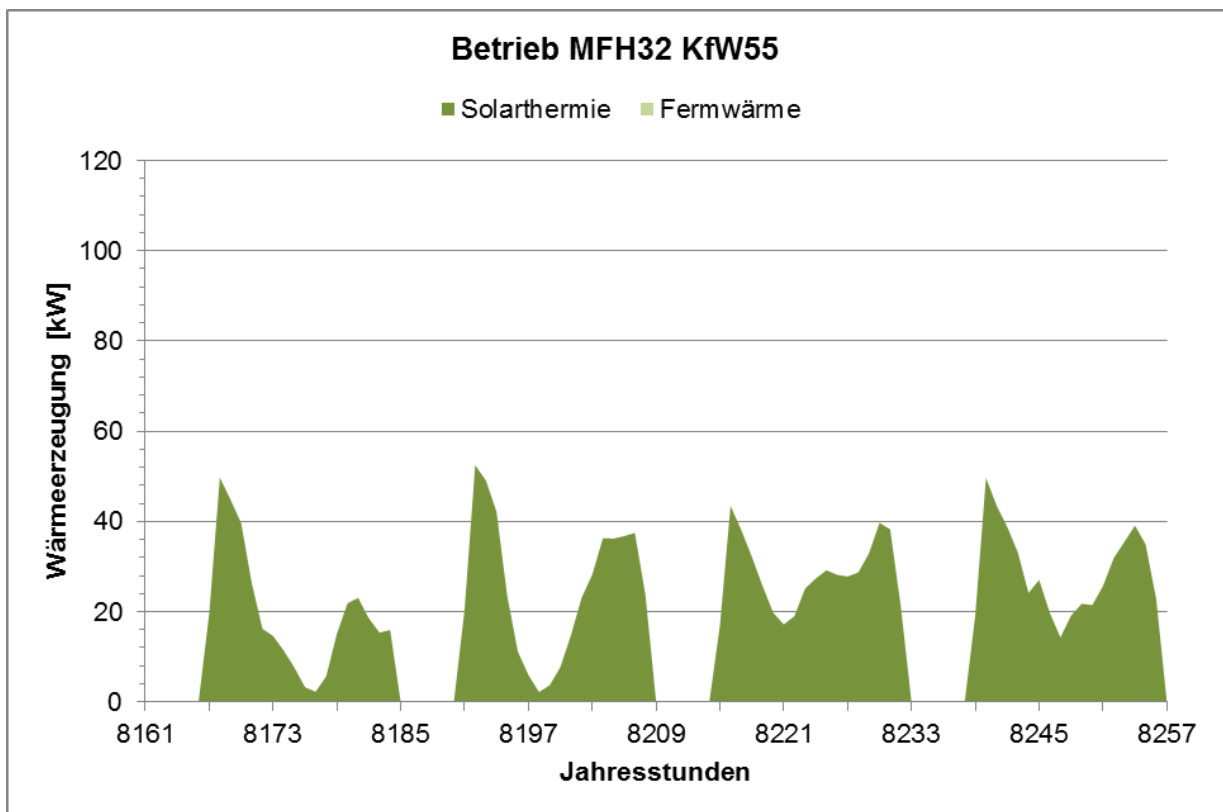


Abbildung 39: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH32 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember

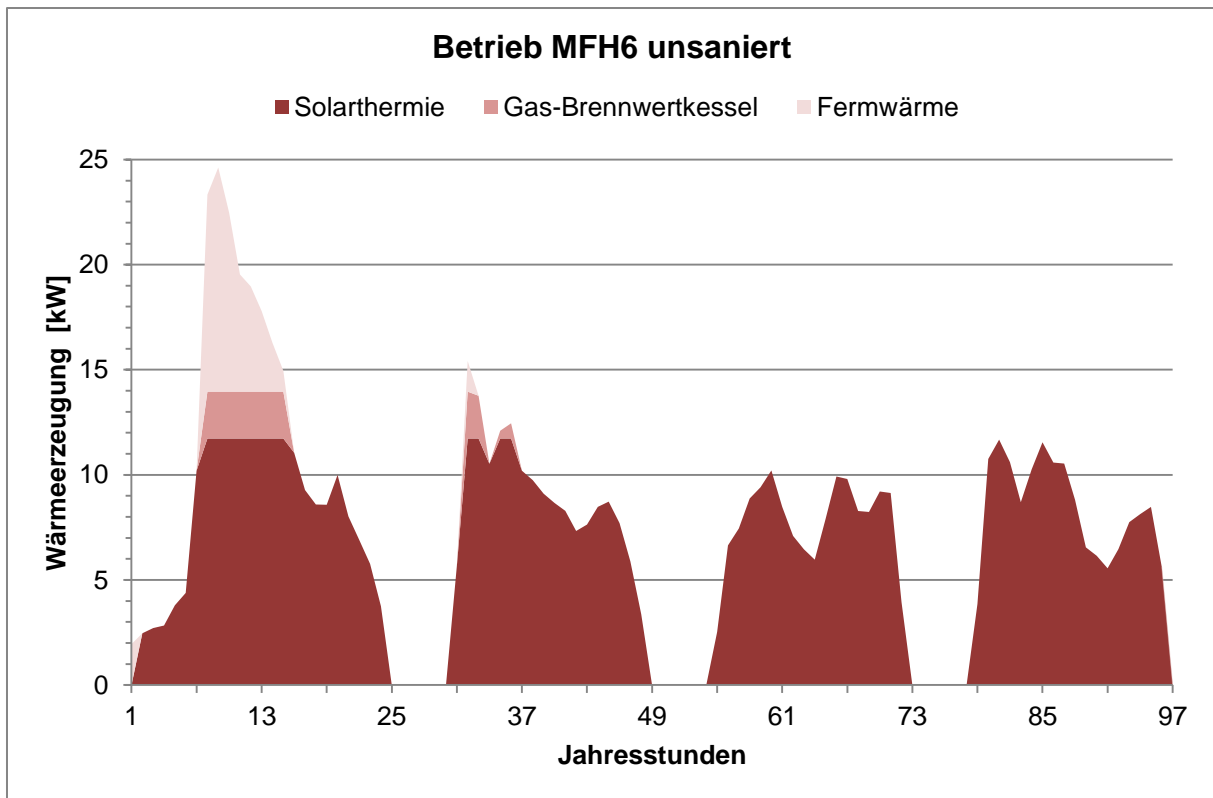


Abbildung 40: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH6 im unsanierten Zustand vom 01. bis 04. Januar

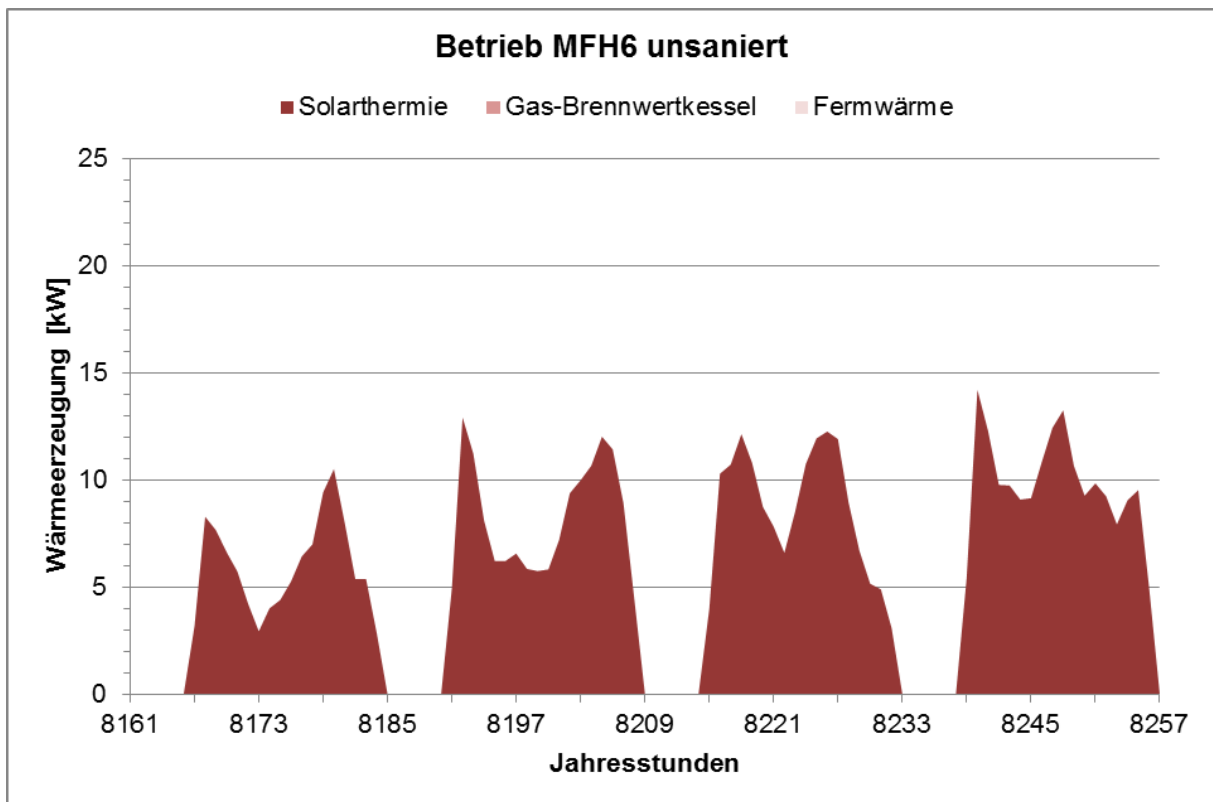


Abbildung 41: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH6 im unsanierten Zustand vom 06. bis 09. Dezember

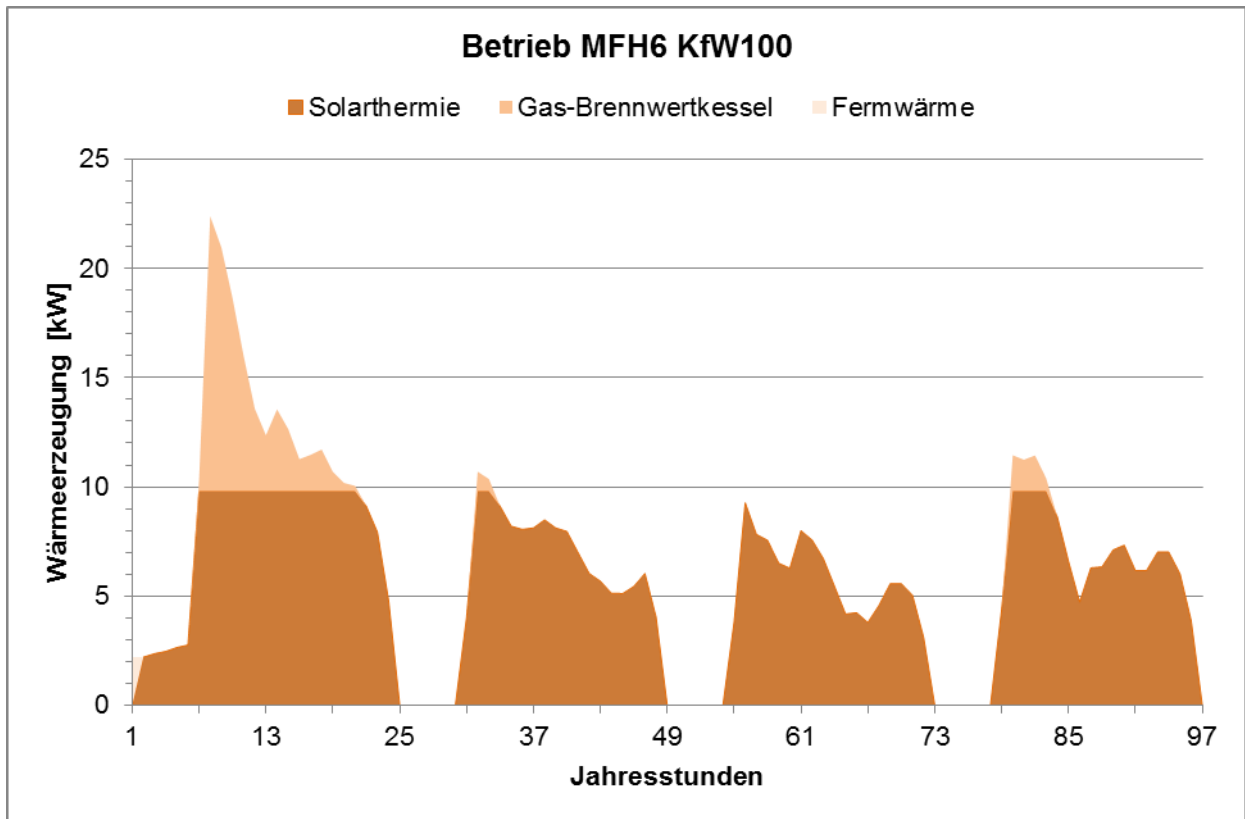


Abbildung 42: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW100-Standard vom 01. bis 04. Januar

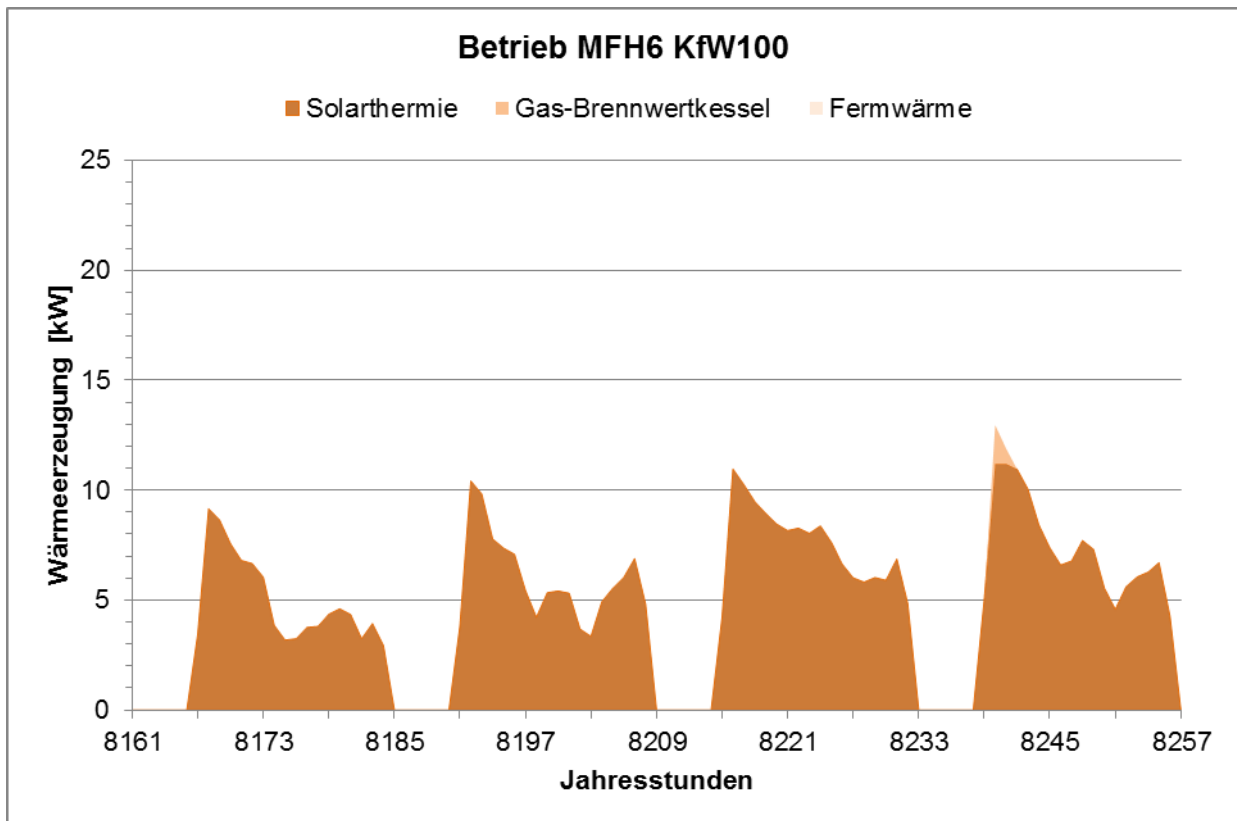


Abbildung 43: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung für MFH6 mit einem KfW100-Standard vom 06. bis 09. Dezember

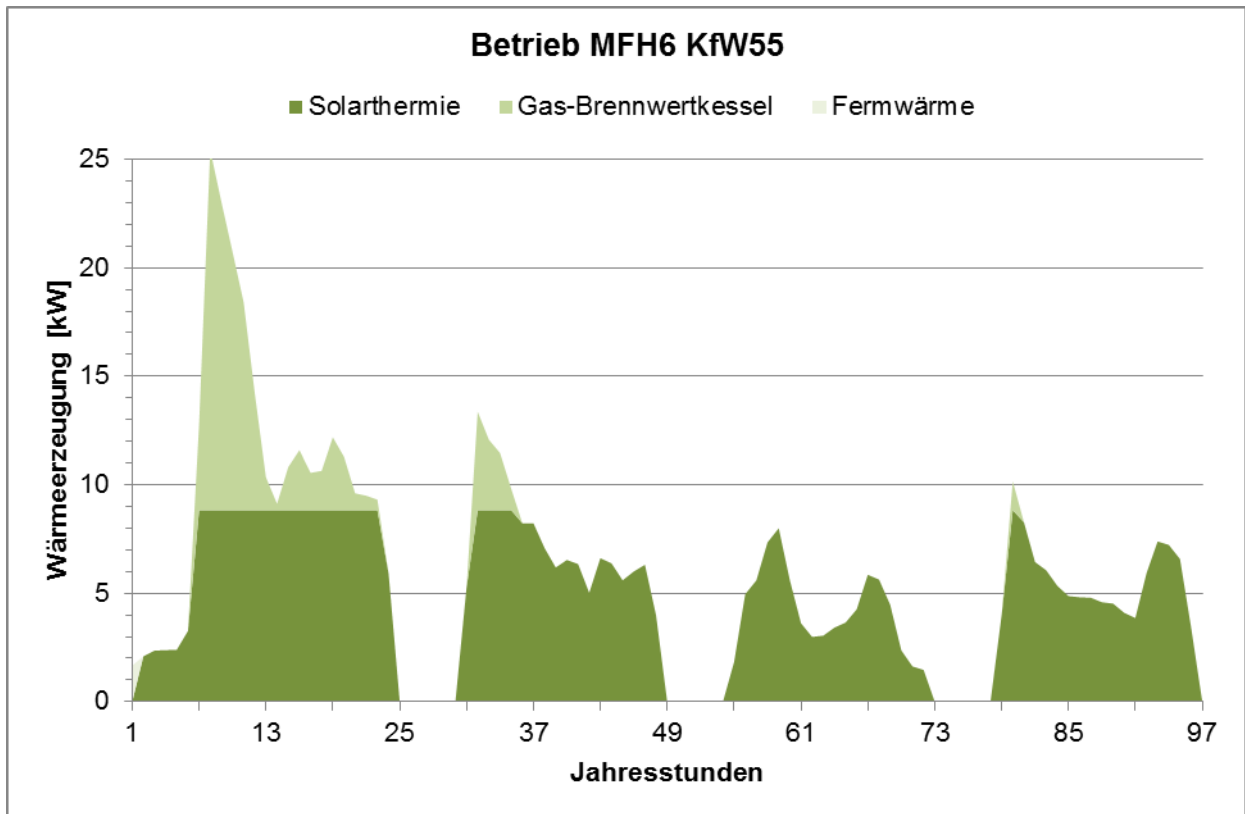


Abbildung 44: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH6 mit einem KfW55-Standard vom 01. bis 04. Januar

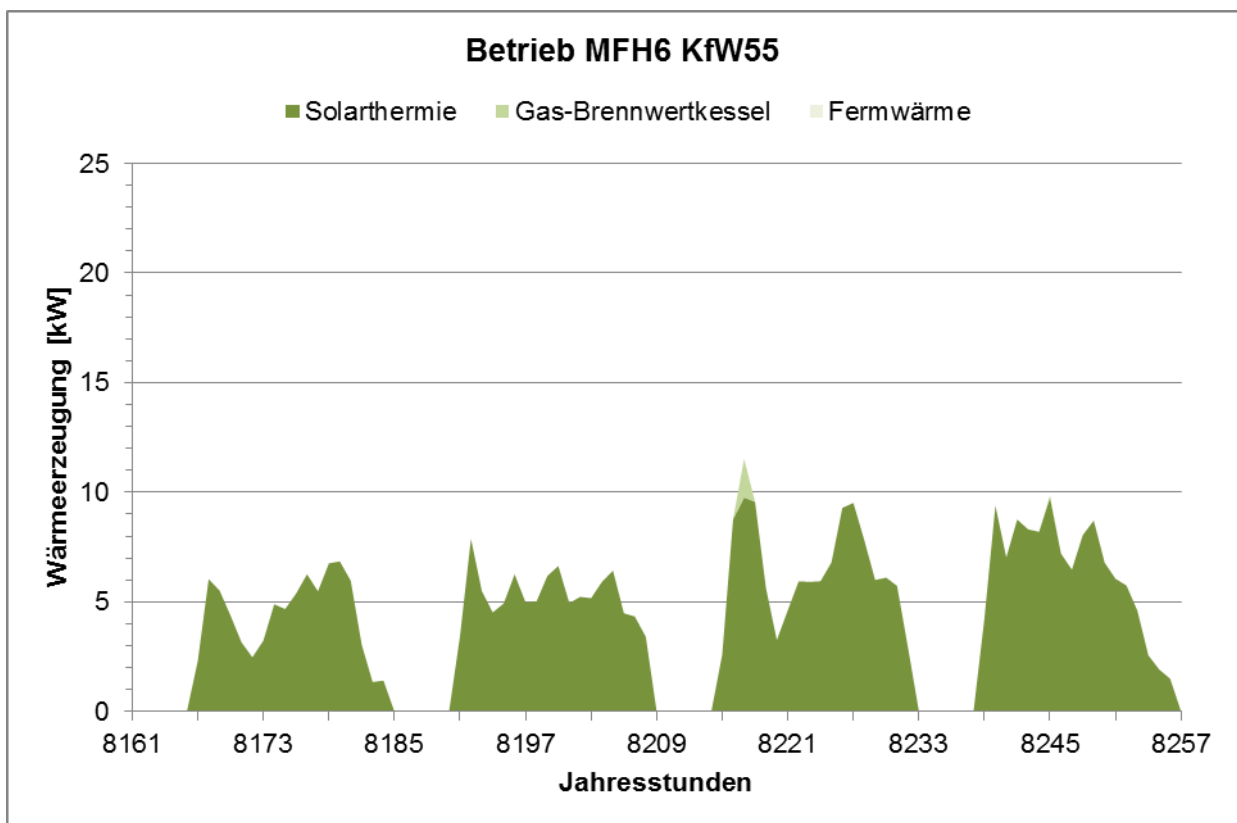


Abbildung 45: Tagesverlauf der Wärmeezeugung für MFH6 mit einem KfW55-Standard vom 06. bis 09. Dezember