

KOSMA



Fraunhofer

ISI



UNTERNEHMENSGRUPPE
NASSAUISCHE HEIMSTÄTTE
WOHNSTADT

EINFLÜSSE UND WECHSELWIRKUNGEN NUTZERABHÄNGIGER UND -UNABHÄNGIGER ASPEKTE AUF ENERGIEBEDARF UND -VERBRAUCH VON WOHNGEBÄUDEN

KOSMA-Werkstattbericht Nr. 4

Verfasser:

Institut Wohnen und Umwelt (IWU):

Michael Grafe

Darmstadt: September 2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Sozial-ökologische Forschung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Förderschwerpunkt „Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA) / Sozial-ökologische Forschung“ unter dem Förderkennzeichen (FKZ 01UT1704) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Impressum

Einflüsse und Wechselwirkungen nutzerabhängiger und -unabhängiger Aspekte auf Energiebedarf und -verbrauch von Wohngebäuden

KOSMA-Werkstattbericht Nr. 4

Erstellt im Rahmen des Projekts

Komponenten der Entstehung und Stabilität von Rebound-Effekten und Maßnahmen für deren Eindämmung (KOSMA)

www.kosma-projekt.de

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) (Koordinator)

Rheinstraße 65
64295 Darmstadt

Projektleitung: Ina Renz, i.renz@iwu.de; Ulrike Hacke, u.hacke@iwu.de

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung

Nieschlagstr. 26
30449 Hannover

Teilprojektleitung: Dr. Silke Kleinhüchelkotten, silke.kleinhuechelkotten@ecolog-institut.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Teilprojektleitung: Dr. Elisabeth Dütschke, elisabeth.duetschke@isi.fraunhofer.de

Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH

Schaumainkai 47
60596 Frankfurt am Main

Teilprojektleitung: Dr. Simone Planinsek, simone.planinsek@naheimst.de

Inhalt

1	Kurzfassung	5
2	Einordnende Betrachtungen zu Wärmetransportvorgängen in Gebäuden.....	9
2.1	Energiebedarf und -verbrauch von Gebäuden – Begriffe, Einzeleinflüsse und Wechselwirkungen	10
2.1.1	Auftreten von Wärmegewinnen und -verlusten und Heizen im Jahresverlauf.....	10
2.1.2	Raumtemperatur vs. Raumsolltemperatur	11
2.1.3	Gebäude-Energiestandards	13
2.1.4	Übergangszeit und Winter	14
2.2	Messung und Zuordnung von Energieverbräuchen	15
2.2.1	Messung von Energieverbräuchen verschiedener Energieträger	15
2.2.2	Wärmeversorgungssysteme, Energiekennwerte und Energieebenen.....	18
2.3	Versuch einer Einordnung des Nutzerverhaltens.....	20
3	Endenergieverbrauch und stationär berechneter Endenergiebedarf – Exemplarische Betrachtung der Einflüsse des Nutzers, der Anlagentechnik und des Lokalklimas.....	24
3.1	Beschreibung der untersuchten Gebäude und der vorhandenen Unterlagen	25
3.2	Varianten des stationär berechneten Endenergiebedarfs zur Gegenüberstellung mit dem Energieverbrauch	27
3.2.1	Berücksichtigung des Einflusses des Lokalklimas.....	28
3.2.2	Variantenbildung für die Parameter Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste.....	33
3.2.3	Gesamtwirkung der variierten Parameter – Untersuchungsjahr 2019.....	38
3.2.4	Gesamtwirkung der variierten Parameter – Untersuchungsjahre 2020 und 2021 ...	40
3.2.5	Gesamtwirkung der variierten Parameter – alle drei Untersuchungsjahre.....	42
3.2.6	Fazit aus den stationären Berechnungen und Ausblick auf die quasi-stationären Berechnungen	43
4	Quasi-stationäre Energiebilanzierung – Einflüsse des Wärmeschutzes, des Anlagenbetriebes und des Nutzers auf die Raumtemperatur	46
4.1	Beispielberechnungen mit einer quasi-stationären Energiebilanzierung	47
4.1.1	Beschreibung des quasi-stationären Energiebilanzierungsverfahrens.....	47
4.1.2	Annahmen und Randbedingungen zum Beispiel-Mehrfamilienhaus und zum Nutzerverhalten.....	48
4.1.3	Raumtemperatur und Raumsolltemperatur.....	49
4.2	Berechnungsergebnisse der quasi-stationären Energiebilanzierung für das Beispiel-Mehrfamilienhaus	50
4.2.1	Nutzerunabhängiger Anstieg der Raumtemperatur über die Raumsolltemperatur..	50
4.2.2	Mittlere Raumtemperatur während der Heizperiode für die Basisvariante.....	52

4.2.3	Mittlere Raumtemperaturen für die weitere Variation der Nutzungsparameter	53
4.2.4	Fazit aus den quasi-stationären Berechnungen.....	55

1 Kurzfassung

Vorgehensweise

In Wohngebäuden ist zu beobachten, dass gemessene Energieverbräuche und – als Erwartungswert des Energieverbrauchs angesehene – berechnete Energiebedarfe voneinander abweichen. In energetisch nicht oder lediglich teilmodernisierten Gebäuden liegt der gemessene Verbrauch oft unter dem berechneten Bedarf. Dieses Phänomen wird dem Nutzer heute als „positives Nutzerverhalten“ zugeordnet und als Prebound-Effekt bezeichnet. In energetisch modernisierten Gebäuden und Neubauten tritt oft ein gegenteiliger Effekt in Erscheinung – der gemessene Verbrauch liegt dort über dem berechneten Bedarf. Auch dies wird dem Nutzerverhalten zugeschrieben und die Abweichung als Rebound-Effekt bezeichnet. Für Prebound- wie Rebound-Effekte wird zur Erklärung die Raumtemperatur herangezogen. Sie liegt in modernisierten Gebäuden und Neubauten deutlich höher und wird mit erhöhten Komfortansprüchen der Nutzer in Verbindung gebracht. Der Werkstattbericht soll zeigen, dass es über die Raumtemperatur hinaus viele weitere, verschiedenartige Einflüsse auf Rebound-Effekte gibt und die festgestellten Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch keineswegs allein dem Nutzer zugeschrieben werden sollten.

Der Werkstattbericht teilt sich in drei Teile. Zunächst wird in Kapitel 2 qualitativ die Vielfalt der Einzeleinflüsse aufgezeigt, die in Gebäuden auf die Höhe des Verbrauchs bzw. Bedarfs wirken können. Damit soll auch die Verschiedenartigkeit des Gebäudebestandes aufgezeigt werden. Daneben werden viele Hinweise auf mögliche Fehler bei der Erhebung von Bedarfen und Verbräuchen gegeben.

In Kapitel 3 schließen Berechnungen für existierende Beispielgebäude an. Dabei werden die vorliegenden Verbräuche den berechneten, als Erwartungswert des Verbrauchs angesehenen Bedarfen gegenübergestellt. Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Lokalklimas zum Abgleich von Bedarf und Verbrauch werden beleuchtet. Daneben werden Varianten des Bedarfs berechnet, in denen nutzerabhängige und nutzerunabhängige Einflussgrößen (Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste) hinsichtlich ihrer Wirkung auf den berechneten Bedarf untersucht werden. Mit diesen Berechnungen soll exemplarisch ein Eindruck vermittelt werden, in welchen Größenordnungen nutzerabhängige und nutzerunabhängige Einzeleinflüsse auf den Erwartungswert des Verbrauchs wirken können. Als Verfahren zur Berechnung der Bedarfe kommt eine stationäre Energiebilanzierung zum Einsatz. Das eingesetzte Verfahren lehnt sich stark an die praktisch geläufigste, insbesondere auch für den öffentlich-rechtlichen Nachweis (früher nach EnEV, aktuell nach GEG) des Energiestandards eines Gebäudes eingesetzte Methodik der Bilanzierung an.

Der Werkstattbericht schließt mit einer Betrachtung der – zur Beschreibung von Rebound-Effekten bisher stark im Fokus stehenden – Raumtemperatur in Kapitel 4. Hier

kommt ein genaueres, quasi-stationäres Energiebilanzierungsverfahren zum Einsatz, das auch die Betrachtung energetischer Effekte im Tagesverlauf erlaubt. Bisher werden die in Gebäuden mit hohen Energiestandards (Neubau bzw. nach vollständiger energetischer Modernisierung) beobachteten höheren Raumtemperaturen als Rebound-Effekt häufig den Nutzern zugeschrieben und mit höheren Komfortansprüchen begründet. In diesem Kapitel des Werkstattberichtes wird ein exemplarisches, fiktives Mehrfamilienhaus in einem nicht modernisierten, geringen Energiestandard und in einem sehr hohen Dämmstandard nach Modernisierung der Gebäudehülle untersucht. Für beide energetischen Zustände werden Nutzertypen untersucht, die als energetisch äquivalent angesehen werden können. Dabei wird insbesondere die Raumsolltemperatur – als Temperaturwunsch des Nutzers – im Tagesverlauf variiert. Die Annahmen der Temperaturen im Tagesverlauf führen in allen Varianten zum gleichen Tagesmittelwert der Raumsolltemperatur. Energetisch verhalten sich die Nutzer damit mit ihren verschiedenen Temperaturwünschen gleich. Die Berechnungen sollen zeigen, dass die Wirkungen weiterer Einflussgrößen in den einzelnen Varianten unabhängig vom Nutzereinfluss zu verschiedenen Raumtemperaturen führen können.

Ergebnisse

Die qualitativen Betrachtungen zu Beginn des Berichtes beschreiben vielfältige Aspekte mit Einfluss auf den Verbrauch bzw. Bedarf. Beide – zur Beschreibung von Rebound-Effekten möglichst genau zu ermittelnden – Größen sind jedoch von vielen Ungenauigkeiten gekennzeichnet. So ist nicht zwingend gegeben, dass Verbräuche vollständig (z.B. bei der Nutzung von Solarenergie) und einfach (z.B. bei der Abgrenzung der Verbräuche von Wärmepumpen, Lüftungsanlagen und Haushaltsstrom) vorliegen. Je nach Energieträger ist die Umrechnung der verbrauchten Mengen in Energieeinheiten mehr oder minder unscharf. Hier wirken Aspekte wie Lagerhaltung, Mengenermittlung und spezifischer Energiegehalt der Energieträger. Schwierigkeiten ergeben sich für viele Wärmeversorgungssysteme auch aus der Abgrenzung von Verbräuchen für Heizung und Warmwasser, die in der Verbrauchsabrechnung anders vorgenommen wird als in der Energiebilanzierung. Beim Vergleich von Verbräuchen verschiedener Gebäude sind auch der Typ des Wärmeversorgungssystems und die Lage des Messpunktes des Verbrauchs von großer Bedeutung. Je nach Typ des Wärmeversorgungssystems treten Verteilverluste in sehr verschiedenen Größenordnungen auf und sind je nach Lage des Messpunktes in den Messungen enthalten oder nicht. Auch der Nutzer hat insbesondere mit der von ihm gewünschten Raumsolltemperatur und durch Art und Umfang der Lüftung Einfluss auf den Verbrauch. Als Zwischenfazit nach der Betrachtung der vielen verschiedenen Einzeleinflüsse wird festgehalten, dass der Nutzereinfluss immer nur einen Anteil an den Rebound-Effekten darstellt. Er kann den Energiebedarf/-verbrauch steigern oder senken. Eine quantitative Zuordnung der relativen oder absoluten Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch zu einem bestimmten Nutzerverhalten ist

aber aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen im Gebäude nicht möglich. Eine alleinige Zuordnung der Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch zum Nutzer wird der Komplexität der Wärmetransportvorgänge im Gebäude nicht gerecht und wird als falsch angesehen.

Die Gegenüberstellung gemessener Verbräuche und berechneter Bedarfe für zwei quasi identische, energetisch nicht modernisierte Gebäude war Inhalt des ersten Teils der rechnerischen Betrachtungen. Sie hat Erkenntnisse zu den Einflüssen von Lokalklima, Raumtemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten auf Bedarf und Verbrauch geliefert. Hierzu wurde eine einfache, stationäre Energiebilanzierung vorgenommen. Der Einfluss des Lokalklimas ist vorzugsweise bei der Berechnung des Bedarfs zu berücksichtigen, der dann dem gemessenen, nicht angepassten Verbrauch gegenübergestellt wird. Das ist zwar aufwendiger, verspricht aber unabhängig vom Energiestandard der untersuchten Gebäude eine bessere Berücksichtigung des Lokalklimas als bei der Gegenüberstellung des mit einem Klimafaktor angepassten Verbrauchs mit dem nach Standardklima Deutschland berechneten Bedarf. Mögliche Einflüsse von Raumtemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten wurden in einer Parameterstudie betrachtet. Die Ausprägungen dieser Parameter wurden entsprechend der für die Beispielgebäude vorliegenden Datenlage in praktisch zu erwartenden Bandbreiten variiert. Die Datenlage zu den Gebäuden war für viele weitere Einflussgrößen (Gebäudegeometrie, Wärmeschutz Gebäudehülle, Art des Wärmeversorgungssystems) außergewöhnlich gut. Diesbezügliche Annahmen konnten unverändert in die Berechnungen eingehen und wurden nicht variiert. Aus der Parameterstudie sind allein durch die Variation von Raumlufttemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten sehr verschiedene Bedarfe hervorgegangen. Sie unterscheiden sich voneinander innerhalb eines Betrachtungsjahres vom Minimum zum Maximum um mehr als Faktor zwei. In der Gegenüberstellung der Varianten des berechneten Bedarfs mit den gemessenen Verbräuchen wurde aber auch klar, dass die Einzeleinflüsse aller untersuchten nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Parameter maßgeblich auf den berechneten Bedarf wirken können. Zwar lassen sich durch Ceteris-paribus-Betrachtungen Einzeleinflüsse quantifizieren. Daraus kann aber kein Rückschluss gezogen werden, in welchen Ausprägungen die einzelnen nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Parameter tatsächlich vorliegen und wie groß ein Einzeleinfluss im Einzelfall auf den Rebound-Effekt ist. Auch hier wurde klar, dass Rebound-Effekte aus dem Zusammenwirken nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Einzeleinflüsse des Nutzers, der Gebäudehülle und der Anlagentechnik ergeben.

Im zweiten Teil der rechnerischen Betrachtungen wurde der Einfluss der Raumtemperatur in zeitlich höher aufgelösten Berechnungen genauer betrachtet. Hier wurden für ein fiktives Beispielgebäude ein energetisch nicht modernisierter und ein modernisierter Zustand mit hohem Dämmstandard der Gebäudehülle untersucht. In den untersuchten

Varianten wurden für beide energetischen Gebäudezustände die gleichen Nutzertypen angesetzt und der Anlagenbetrieb identisch angenommen. Es ergeben sich über die Heizperiode gemittelte Raumtemperaturen, die sich vor und nach energetischer Modernisierung bei jeweils unverändertem Nutzerverhalten um bis zu 3 Grad Kelvin unterscheiden. Die höheren Raumtemperaturen resultieren allein aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle und sind damit nutzerunabhängig. Damit wurde gezeigt, dass die Raumtemperatur keine rein nutzerabhängige Größe ist, im untersuchten Spezialfall (Vergleich zwischen verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäudehülle bei sonst gleichen Randbedingungen) sogar gänzlich nutzerunabhängig. Dadurch wurde die häufig anzutreffende Annahme widerlegt, dass allein erhöhte Komfortansprüche des Nutzers für höhere Raumtemperaturen nach energetischer Modernisierung und die damit verbundenen Rebound-Effekte verantwortlich sind.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in künftigen Studien zu Rebound-Effekten die in Wechselwirkung stehenden Einzeleinflüsse des Nutzers, der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und des -betriebes sowie des Lokalklimas zu betrachten sind. Das gilt für alle möglichen energetischen Zustände der zu untersuchenden Gebäude. Aus dem Zusammenwirken dieser verschiedenartigen Einzeleinflüsse können sich immer noch Prebound- bzw. Rebound-Effekte ergeben. Die hier angestellten Berechnungen haben gezeigt, dass der nutzerabhängige bzw. dem Nutzer zuzuordnende Anteil der Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch nicht quantifizierbar ist. Exemplarisch konnte gezeigt werden, dass Rebound-Effekte auch ganz ohne Nutzereinfluss entstehen können.

2 Einordnende Betrachtungen zu Wärmetransportvorgängen in Gebäuden

In diesem Abschnitt wird versucht, wesentliche Aspekte zu Wärmetransportvorgängen in Gebäuden aus ingenieurmäßiger Sicht möglichst allgemeinverständlich zu beschreiben. Dabei werden einzelne Problemlagen bereits angerissen, die in den energetischen Betrachtungen der nachfolgenden Kapitel untersucht werden.

Im Gebäude eingesetzte Wärme ist kein einfach messbares bzw. berechenbares Gut. Das liegt bereits darin begründet, dass Wärme eine thermodynamische Zustandsgröße darstellt, die im betrachteten System ständigen Änderungen unterworfen ist. Wärme strömt vom höheren zum geringeren Temperaturniveau. Im Gebäude (als thermodynamischem System) finden gleichzeitig mehrere Wärmetransportvorgänge statt, die ihm Wärme zuführen und entziehen. Die wesentlichsten sind Wärmetransmission und -konvektion. Diese Vorgänge treten im täglichen und jährlichen Verlauf in ganz verschiedenen Größenordnungen auf. Durch die Bauteile der Gebäudehülle hindurch wird durch Wärme durch Transmission übertragen. Alle Austauschvorgänge von Luftmassen zwischen Raum- und Umgebungsluft (Fenster, Türen, Undichtigkeiten) geschehen durch Konvektion. Sie werden hier als Lüftung zusammengefasst. Je nachdem, ob die Temperatur innen oder außen höher ist, stellt der jeweilige Wärmetransportvorgang einen Gewinn oder einen Verlust für das Gebäude dar. Weiterhin sind verschiedene Arten von Wärmegewinnen zu verzeichnen. Zunächst sind das die solaren Wärmegewinne durch die Sonneneinstrahlung. Daneben gibt es innere Gewinne durch Personen, Geräte etc. Schließlich tritt auch ein Teil der technischen Verluste des Wärmeversorgungssystems als nutzbarer Gewinn in Erscheinung. Für die sich – als Konsequenz aus dem Zusammenwirken aller Wärmegewinne und -verluste – im Gebäude einstellenden Temperaturen sind zwar auch die Wärmespeichervorgänge in den Gebäudebauteilen und der Einrichtung von Bedeutung. Deren Wirkung insbesondere auf mögliche Energieeinsparungen wird gewöhnlich aber überschätzt.

Für diesen Werkstattbericht steht der Teil des Jahres im Fokus, in dem zumindest zeitweise im Tagesverlauf geheizt werden muss – die Heizzeit. Während der Heizzeit (Übergangszeit und Winter) treten die Transmissions- und Lüftungswärmeströme als Verluste des Gebäudes in Erscheinung. Sie sind dann durch Gewinne und gegebenenfalls durch Heizen auszugleichen, damit die gewünschte Raumtemperatur erreicht werden kann. Hier sind mit „Gewinne“, „Verluste“, „Heizen“ und „Raumtemperatur“ bereits wichtige Begriffe angesprochen worden. Sie sollen nun etwas näher beleuchtet werden um aufzuzeigen, inwiefern Gebäude, Anlagentechnik, Klima und Nutzer interagieren und auszuloten, welchen Einfluss auf den Energieverbrauch der Nutzer durch sein Verhalten ausübt. Das Nutzerverhalten bzw. das Zusammenwirken der verschiedenen Einflüsse unterscheidet sich durchaus nach dem „Gebäude-Energiestandard“ und nach der „Übergangszeit“ und dem „Winter“. Deshalb sollen auch diese Begriffe eingangs betrachtet

werden, um in der anschließenden Auswertung der Berechnungen fokussierter auf die energetischen Konsequenzen der Einzeleinflüsse und auch Eigenheiten der verschiedenen Berechnungsverfahren eingehen zu können.

2.1 Energiebedarf und -verbrauch von Gebäuden – Begriffe, Einzeleinflüsse und Wechselwirkungen

2.1.1 Auftreten von Wärmegewinnen und -verlusten und Heizen im Jahresverlauf

Während des Sommers wird durch solare Einstrahlung und die warme Außenluft viel Wärme ins Gebäude eingetragen. Die Transmissions- und Lüftungswärmeströme ändern – je nachdem, ob es innen (im Gebäude) oder außen wärmer ist – häufiger ihre Richtung. Die aus den Wärmeströmen und den Wärmespeichereffekten resultierenden Temperaturen im Gebäude sind hoch genug, sodass ein zusätzliches Heizen nicht erforderlich ist. An besonders warmen Tagen werden die Abend- und Nachtstunden genutzt, um die tagsüber stattgefundene, über die gewünschte Temperatur hinausgehende Erwärmung des Gebäudes durch Nachtlüftung (Lüftungswärmestrom) wieder abzubauen.

In der Übergangszeit ändern die Transmissions- und Lüftungswärmeströme bedingt durch die niedrigeren Außentemperaturen seltener ihre Richtung. Sie entziehen dem Gebäude dann über die meiste Zeit Wärme (Wärmeverluste). Gleichzeitig werden die solaren Gewinne durch abnehmende Dauer und Intensität der solaren Einstrahlung kleiner. In Zeiten, in denen die Summe aller Gewinne (Solarstrahlung, Personen, Geräte etc.) und die eingespeicherte Wärme groß genug zum Erreichen der gewünschten Raumtemperatur sind, kann weiter auf Heizen verzichtet werden.

An kalten und trüben Tagen der Übergangszeit und des Winters entziehen die Transmissions- und Lüftungswärmeströme dem Gebäude über weite Teile des Tages bzw. ganztags Wärme. Sie sind gegenüber den solaren und inneren Gewinnen groß. Die vor Beginn der Heizzeit im Gebäude eingespeicherte Wärme hilft nur für kurze Zeit (meist einige Tage), den größer werdenden Verlusten entgegenzuwirken und den Beginn der Heizzeit zu verschieben. Ohne weiteres Hinzutun würde die Temperatur im Gebäude in der Heizzeit deutlich unter die gewünschte Temperatur (Raumsolltemperatur) absinken. Um das zu verhindern, muss dem Gebäude durch Heizen Wärme zugeführt werden.

In Gebäuden mit höherem Wärmeschutzstandard wird der Transmissionswärmestrom durch die Gebäudehülle verhältnismäßig klein, das Gebäude kühlt langsamer aus. Dadurch wird die Heizzeit insgesamt kürzer. Die Anzahl der Tage, an denen dauerhaft geheizt wird, nimmt gegenüber solchen, an denen nur zeitweise geheizt wird, ab. Das wird in den detaillierteren Berechnungen in Kapitel 4 exemplarisch dargestellt.

Die hier beschriebenen Vorgänge des Heizens innerhalb der Heizzeit sind als idealtypisch und damit theoretisch anzusehen. Praktisch gelingt die punktgenaue Einhaltung einer gewünschten Temperatur je nach Heizsystem und Wärmeschutzstandard mehr oder minder gut. Beispielsweise ist die Einzelofenheizung von der individuellen Benutzung der Öfen in den Aufenthaltsräumen zur Aufenthaltszeit geprägt. Insbesondere ältere Einzelöfen lassen sich schlecht regeln. Die Nutzung von Einzelöfen wird als räumliche und zeitliche Teilbeheizung bezeichnet. Zu Beginn des Heizens kann es zur Überschreitung der gewünschten Temperatur kommen. Nach dem (aktiven) Heizen des Nutzers (Abbrand der Festbrennstoffe) endet die Heizzeit zwangsläufig und die Räume kühlen allmählich ab. Daraus resultieren – über den Tag gemittelt – niedrige mittlere Raumtemperaturen. Zentralheizungen mit einem Wärmeverteilnetz arbeiten stärker automatisiert. Allein durch die Wärmeeinträge der – nicht zu unterschätzenden – Wärmeverluste des Verteilnetzes steigt die Raumtemperatur. Daneben ist ein Dauerbetrieb der Heizung (ohne Nutzerinteraktion) mit entsprechend höheren Energieverbräuchen möglich. Dann kann von einer räumlichen und zeitlichen Vollbeheizung gesprochen werden. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs stehen dem Betreiber bzw. Nutzer in vielen Anlagen Regelungsmöglichkeiten am Wärmeerzeuger (z.B. Nachabsenkung, meist Betreiber) und der Wärmeübergabe (z.B. Thermostatventile, Nutzer) zur Verfügung, die den Komfortansprüchen und Gewohnheiten entsprechend genutzt werden können. Aus der Praxis sind aber auch Fälle bekannt, in denen auch dauerhaftes Heizen nicht zur gewünschten Temperatur führt, was meist nicht auf überzogene Komfortansprüche sondern häufiger auf unzureichende Heizleistung zurückzuführen ist. Demgegenüber stehen Fälle, in denen die Wärmeeinträge durch das Wärmeverteilsystem und/oder die wärmeren Nachbarwohnungen so groß sind, dass die gewünschte Temperatur ohne aktives Heizen regelmäßig erreicht wird. In solchen Fällen kann der Nutzer den Wärmeverbrauch durch sein Verhalten gar nicht sinnvoll reduzieren. Mit zunehmendem Wärmeschutzstandard nimmt die Raumtemperatur nach Beendigung/Absenkung des Heizungsbetriebes langsamer ab. Der Temperaturverlauf nähert sich unabhängig vom Heizsystem einer räumlichen und zeitlichen Vollbeheizung an. Dadurch werden auch die Möglichkeiten des Nutzers, durch Interaktion am Heizsystem (z.B. Öffnen/Schließen von Thermostatventilen, Programmierung einer Nachtabsenkung) den Energieverbrauch zu verringern, kleiner.

2.1.2 Raumtemperatur vs. Raumsolltemperatur

Es ist zwischen (vorhandener/gemessener) Raumtemperatur und Raumsolltemperatur zu unterscheiden. Als Raumsolltemperatur¹ ist die Temperatur zu verstehen, bis zu deren Erreichen das Heizsystem Wärme liefern muss. Sie entspricht der minimalen

¹ Eine Raumsolltemperatur für den Kühlfall im Sommer und in der Übergangszeit wird in diesem Werkstattbericht nicht thematisiert. Sie würde dem Wunsch des Nutzers nach einer Temperatur entsprechen, die nicht nach oben überschritten werden soll.

Temperatur, die sich der Nutzer zum Aufenthalt in der Wohnung während der Heizzeit wünscht.

Die Raumtemperatur hingegen ist die Temperatur, die sich im Raum aus dem Zusammenwirken von Wärmeverlusten und -gewinnen sowie gegebenenfalls durch Heizen ergibt. Die Raumtemperatur kann die Raumsolltemperatur aus verschiedenen Gründen übersteigen. Einerseits können die inneren und solaren Gewinne größer sein als die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Ein so verursachtes Überschreiten der Raumsolltemperatur wird vom Nutzer gewöhnlich hingenommen, da er sich nicht nur exakt bei Einhalten der gewünschten Mindesttemperatur, sondern auch in einem Temperaturbereich oberhalb davon wohl fühlt. Die Raumtemperatur übersteigt die Raumsolltemperatur weiterhin dann, wenn die Trägheit des Heizsystems zum Tragen kommt. In Systemen mit Heizkörpern sind das eher kurzfristige Überschreitungen, wenn nach dem Erreichen der Raumsolltemperatur und dem Schließen des Heizkörperventils der Heizkörper weiterhin mehr Wärme als erforderlich abgibt. Bei Flächenheizungen kann dieser Effekt deutlicher in Erscheinung treten. Bedingt durch die viel größere Masse der in Fußboden, Wände bzw. Decken eingelassenen Heizflächen kann nach dem Schließen des Heizventils über einen viel größeren Zeitraum Wärme über diese Bauteilheizflächen abgegeben werden. An dieser Stelle ist also bereits festzuhalten, dass es auch innerhalb der Heizzeit Zeiträume gibt, in denen die Raumtemperatur OHNE Einfluss des Nutzers höher liegt als die vom ihm gewünschte Raumsolltemperatur. Das ist bei der Betrachtung von Rebound-Effekten von besonderem Interesse, da dem Nutzer bisher häufig unterstellt wird, dass er nach erfolgter energetischer Modernisierung eine höhere Temperatur wünscht und so ein nutzerbedingter Rebound-Effekt begründet wird. Das wird in Kapitel 4 noch genauer betrachtet.

Im umgekehrten Fall ist auch eine Unterschreitung der Raumsolltemperatur immer dann möglich, wenn die Heizleistung zu gering ist, um die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste auszugleichen. In diesem Werkstattbericht wird das nicht untersucht. In den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Heizleistung immer groß genug zur Deckung der Verluste ist.

Bei Betrachtung der Raumtemperatur wird in diesem Werkstattbericht vereinfachend nicht nach Raumluf-, Oberflächentemperatur und empfundener Temperatur unterschieden. Weiterhin wird hier vereinfachend von einer einheitlichen Raumtemperatur im gesamten Gebäude ausgegangen. Unterschiede zwischen Treppenhäusern und Wohnungen bzw. einzelnen Räumen innerhalb der Wohnung werden nicht thematisiert. Eine etwaige Teilbeheizung von Wohnungen wird vereinfachend über die Wahl der flächengewichteten Raumsolltemperatur des Gebäudes berücksichtigt.

In der Praxis sind jedoch in Gebäuden ohne Wärmedämmung größere Unterschiede zwischen Oberflächen- und Raumluf-temperatur vorhanden. Bei Strahlungsheizungen liegen die Oberflächentemperaturen der Bauteile vergleichsweise höher als bei

Heizkörper-Heizungen. Die vom Nutzer empfundene Temperatur setzt sich aus den Oberflächen- und Raumlufthtemperaturen zusammen. Für Strahlungsheizungen werden also in ungedämmten Gebäuden bereits deutlich geringere Raumlufthtemperaturen als angenehm wahrgenommen, als das bei Heizkörperheizungen der Fall ist. In Gebäuden mit hohem Wärmeschutzstandard entspricht die empfundene Temperatur in guter Näherung der Raumlufthtemperatur. Diese Zusammenhänge sind zu beachten, wenn Raumtemperatur-Messdaten aus Gebäuden mit verschiedenen Wärmeschutzstandards bzw. Heizsystemen betrachtet werden.

2.1.3 Gebäude-Energiestandards

Der energetische Standard eines Gebäudes ist vom Wärmeschutz der Gebäudehülle, dem Vorkommen und dem Wärmeschutz der technischen Systeme und der Art der Wärmeerzeugung abhängig. In den letzten Jahren hat sich der Fokus stark auf die Wärmeerzeugung und die neuen, vielfältigen Möglichkeiten zur Bereitstellung und Nutzung erneuerbarer Energien gerichtet. Praktisch können sich abhängig von den eingesetzten Wärmeerzeugern tatsächlich auch sehr verschiedene Energiekennwerte ergeben. Allerdings sind die Wirkungen der Gebäudehülle und der technischen Systeme im Gebäude ebenso von Bedeutung und dürfen keinesfalls übersehen werden. An dieser Stelle soll ein Blick auf den Einfluss des baulichen Wärmeschutzes auf Gebäude-Energiestandards geworden werden. Eine Betrachtung des ebenfalls sehr relevanten, praktisch aber oft nachlässig behandelten Wärmeschutzes der technischen Systeme ist in Abschnitt 2.2.2 enthalten.

Grundsätzlich ist es möglich, im Bestand bei energetischer Modernisierung die gleichen Wärmeschutzstandards der Gebäudehülle umzusetzen wie im Neubau. Im Bestand ist eine durchgängige Umsetzung des Wärmeschutzes jedoch erschwert, weil vorhandene geometrische und konstruktive Gegebenheiten auch bei sorgfältiger Planung zu Schwierigkeiten führen können. Solche Restriktionen durch Wärmebrückenwirkung führen oft dazu, dass ein – im Vergleich zum Neubau bei gleichen bauteilbezogenen Wärmeschutzmaßnahmen – etwas geringerer Wärmeschutzstandard erreicht wird. Dennoch bleibt festzuhalten, dass durch energetische Modernisierung auch sehr hohe Energiestandards erreicht werden können. Praktisch existieren modernisierte Bestandsgebäude, deren Energiestandard deutlich höher ist als der von Neubauten, die den gesetzlichen Mindeststandard gerade noch erfüllen. Mit immer weiter voranschreitender Modernisierungstätigkeit im Gebäudebestand wird es folglich auch immer dringlicher, von einfachen Kenngrößen zur Beschreibung des Energiestandards eines Einzelgebäudes wie z.B. der Baualtersklasse Abstand zu nehmen, weil sie immer weniger geeignet erscheinen. Auch innerhalb eines gesetzlichen bzw. Förderstandards gibt es Unterschiede, die zu verschiedenen hohen Energieverbräuchen führen können.

Die – zumindest für Bestandsgebäude – vermutlich größte Unsicherheit liegt in der Erfassung der energetischen Wirkung der technischen Systeme. Damit sind insbesondere die Anlagenkomponenten gemeint, die Wärme für Heizung und Warmwasser zum und im Gebäude verteilen, in Wärmespeichern zwischenspeichern und die Heizwärme übergeben. Abschnitt 2.2.2 setzt sich damit auseinander. Zur Einordnung des möglichen Einflusses sei hier aber bereits erwähnt, dass die Verluste der technischen Systeme je nach Vorkommen/Berücksichtigung von Verteilleitungen eines Nah-/Fernwärmenetzes zum Gebäude, dem Vorhandensein von Zirkulationsleitungen, dem Wärmeschutzstandard dieser Komponenten und den Temperaturen, mit denen Heizung und Warmwassersystem betrieben werden durchaus technische Verluste möglich sind, die den eigentlichen Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser eines guten Gebäude-Energiestandards deutlich übersteigen können.

2.1.4 Übergangszeit und Winter

Die Dauer der Übergangszeit und des Winters sind keineswegs gesetzt. Übergangszeit und Winter sollen in diesem Werkstattbericht dadurch unterschieden werden, dass in der Übergangszeit nur geringfügig Energie zum Heizen eingesetzt wird und einzelne Tage vorhanden sind, an denen nicht geheizt werden muss. Es handelt sich also nicht um eine starke physikalische bzw. ingenieurmäßige Definition sondern eher um eine grobe Einordnung von Zeiträumen, die mit unterschiedlichem Nutzerverhalten verbunden sein können.

Die Dauer der Übergangszeit und des Winters ist stark abhängig vom Zusammenwirken aller vorkommenden Wärmegewinne und -verluste. Je besser der Wärmeschutzstandard eines ansonsten unveränderten Gebäudes ist, umso geringer werden die Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle. Mit dem Abnehmen dieser Verluste schrumpft der Zeitraum, in dem geheizt werden muss. In Kapitel 4 wird gezeigt, dass sich dadurch Beginn und Ende der Heizzeit und auch die Anzahl der Heiztage deutlich verschieben können.

In Bestandsgebäuden können aber auch die technischen Verluste zu einer (scheinbaren) Verkürzung der Heizzeit führen. So ist ein Teil der Wärmeverluste der Heizungs- und Warmwasser-Verteilleitungen in den Wohnungen nutzbar. Solange diese Wärmegewinne groß genug zur Erreichung der Raumsolltemperatur sind, muss – im Sinne des Betriebs der Heizkörper – nicht geheizt werden. Gleichzeitig ist augenscheinlich klar, dass die von den Verteilsystemen abgegebene Energie letztlich Teil der im Gebäude verbrauchten Energie ist und vom Nutzer zu zahlen ist.

Bei der Betrachtung von Rebound-Effekten nach energetischer Modernisierung ist die Berücksichtigung des energetischen Standards sowohl der Gebäudehülle als auch der technischen Systeme wichtig. Im Falle nur mäßig modernisierter technischer Systeme wird zwar eine Verkürzung der Heizzeit feststellbar sein, allerdings werden auch die

anhaltend hohen technischen Verluste zu hohen Energieverbräuchen führen. Da praktisch oft weder der Zustand und Betrieb der technischen Systeme hinreichend bekannt sind und die Größe der technischen Verluste nicht trennscharf gemessen werden können, besteht hier also regelmäßig die Gefahr, dass die mehr oder minder hohen technischen Verluste vorschnell dem Nutzer mit einem vermuteten „geänderten Nutzerverhalten“ zugeordnet werden und damit eine Ursache für die vermuteten Rebound-Effekte liefern. Einen Eindruck, in welchen Größenordnungen technische Verluste vorliegen können, vermittelt Kapitel 3.

2.2 Messung und Zuordnung von Energieverbräuchen

Zur Beschreibung von Rebound-Effekten durch Nutzer in energetisch modernisierten Gebäuden sind zunächst Energiebedarf und Energieverbrauch des Gebäudes treffsicher zu beschreiben. Es gilt also, sowohl einen theoretischen, als Energiebedarf – unter Berücksichtigung eines gewöhnlichen/durchschnittlichen Nutzerverhaltens – berechneten Erwartungswert (des Energieverbrauchs) als auch einen korrekt gemessenen und zugeordneten Energieverbrauch zu ermitteln. Einen Überblick über diesbezüglich wichtige Aspekte liefert [dena 2016]. In dieser Studie wurden energetisch modernisierte Gebäude untersucht, deren – in einer Datenbank vorliegende – Energiebedarfe und -verbräuche zunächst schlecht übereinstimmten. Auf der Suche nach den Ursachen wurden sowohl der berechnete Bedarf als auch der gemessene Verbrauch kritisch untersucht. Dabei wurden alle auch in diesem Werkstattbericht thematisierten Einflussgrößen (Gebäudehülle, Anlagentechnik, Klima, Nutzer) betrachtet. Der dort angewandte Umgang mit Verbrauchsangaben geht in diesen Abschnitt ein und wird ergänzt.

Die Probleme bei der korrekten Zuordnung von Energieverbräuchen unterscheiden sich im Wesentlichen nach Energieträger resp. der Art der Verbrauchsmessung und nach dem Wärmeversorgungssystem. Bei fehlerhafter Zuordnung können Bedarf und Verbrauch um Größenordnungen voneinander abweichen.

2.2.1 Messung von Energieverbräuchen verschiedener Energieträger

Energieträger

Die Messung des Verbrauchs aller Energieträger soll sorgfältig geschehen, da verschiedene Aspekte schnell dazu führen können, dass Verbräuche mit Fehlern behaftet sind bis hin dazu, dass sie in falschen Größenordnungen angegeben werden.

Für lagerfähige Energieträger (z.B. Stückholz, Pellets, Öl, Flüssiggas) stellt sich immer die Frage nach den Lagerbeständen. Die Zeitpunkte der Energieträger-Lieferungen decken sich nicht mit den Abrechnungs- bzw. Betrachtungszeiträumen, die häufig Kalenderjahre umfassen. Hier stellt sich also regelmäßig die Frage, wie genau Lagerbestände

und Liefermengen betrachtet und den betrachteten Zeiträumen zugeordnet wurden. Wenn lagerfähige Energieträger in ergänzenden Heizungssystemen (Einzelöfen, Kamine) eingesetzt werden, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass die verbrauchten Mengen nicht mehr aus Liefermengen und Lagerbeständen ermittelt, sondern lediglich abgeschätzt werden. Mitunter werden sie (unabhängig vom Anteil an der Wärmebereitstellung im Gebäude) auch ganz vergessen bzw. vernachlässigt. Zur Bestimmung des Energieverbrauchs müssen die verbrauchten Mengen lagerfähiger Energieträger in Energieeinheiten umgerechnet werden. Während für Pellets, Öl und Flüssiggas recht genaue Umrechnungsfaktoren angegeben werden können, ergeben sich für Holz (Scheitholz, Hackschnitzel) abhängig von Holzart, Holzfeuchte und der Mengenangabe (Masse, Fest-, Raummeter etc.) größere Unschärfen.

Der Verbrauch von Erdgas aus einem Gasnetz wird praktisch auf Basis einer jährlichen Ablesung ermittelt. Diese Ablesung findet näherungsweise zum gleichen Zeitpunkt im Jahr statt, was zunächst für eine recht genaue Ermittlung des Jahresverbrauchs spricht. Die Aufteilung des Gesamtverbrauchs erfolgt dann aufgrund eines normierten Ansatzes, indem der zwischen den Ablesezeitpunkten angefallene Verbrauch nach normativ festgelegten Anteilen auf Kalendermonate aufgeteilt wird. Die Heizperiode eines Abrechnungsjahres verteilt sich gewöhnlich auf zwei Kalenderjahre. Je nach Lokalklima kann bei Betrachtung eines Einzeljahres ein deutlicher Zuordnungsfehler zustande kommen. Werden mehrere Jahre betrachtet, wird der Einfluss dieses Fehlers geringer.

Die durch Nutzung von Solarenergie gewonnene Wärme wird gewöhnlich nicht gemessen. Das gilt sowohl für Wärme aus Solarthermie als auch für direkt in Wärme umgewandelten Photovoltaik-Strom. Zur Nachbildung dieses Einflusses auf dem Energieverbrauch sind mit einfachen Mitteln nur noch (recht ungenaue) Abschätzungen möglich. In wissenschaftlichen Betrachtungen ist die Simulation möglich, wenngleich aufwendig.

Die Messung des Verbrauchs von elektrischer Energie zur Bereitstellung von Wärme ist dann schwierig, wenn Zähler fehlen bzw. Verbrauchern nicht zugeordnet werden können. So ist die Abgrenzung zwischen Haushaltsstrom, Wärmepumpe, Durchlauferhitzer in der Warmwasserbereitung, Hilfsenergien (Lüftungsanlagen, Umwälzpumpen, Steuerung) und Photovoltaik (Erzeugung, Eigenverbrauch, Einspeisung) schwierig. Je mehr dieser Komponenten im Gebäude gleichzeitig vorkommen, umso wahrscheinlicher werden Fehler.

In manchen Systemen werden Verbräuche durch Wärmezähler gemessen. Diese Messungen sind zwar genau und lassen sich prinzipiell auch gut Betrachtungsräumen zuordnen. Sie sind aber immer unvollständig. Je nach Lage des Wärmezählers (s.u. Messpunkte) fehlen mehr oder minder große Teile der eingesetzten Energien, die vorgelagert (vor dem Messpunkt) als Wärmeerzeuger- bzw. Verteilverluste verloren gegangen sind.

Messpunkte

Für die Gegenüberstellung von Energiebedarf und -verbrauch ist wichtig, dass die Angaben einfach und vollständig vorliegen. Zur Beschreibung von Rebound-Effekten sind im Kern nur die zur Heizung eingesetzten Energien von Interesse. Praktisch sind Heizungs- und Warmwassersystem aber sehr oft miteinander verbunden. Dann macht sich eine Betrachtung und das Herausrechnen des Warmwasserbedarfs/-verbrauchs erforderlich. Die üblichen Herangehensweisen unterscheiden sich dabei zwischen Bedarf und Verbrauch.

In der Bedarfsberechnung werden die eigentlichen Wärmebedarfe (Nutzwärme) und die zusätzlichen technischen Verluste separat für Heizung und Warmwasser bestimmt. Auch den gemeinsam genutzten Anlagenkomponenten (z.B. Kessel) werden Verluste separat zugeordnet. Durch die verwendeten strukturiert-normierten Verfahren kann für die berechneten Bedarfswerte regelmäßig davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse einfach und vollständig vorliegen und dass die Bedarfe für Heizung und Warmwasser separat angegeben werden können.

Die Messung der Verbräuche gestaltet deutlich vielfältiger. Anzahl und Lage der Messpunkte unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Wärmeversorgungssystemen (s. dazu auch im folgenden Abschnitt 2.2.2). Von der Lage der Messpunkte hängt ab, in welchem Umfang Verluste des Wärmeerzeugers und des Verteilsystems im abgebildeten Energieverbrauch enthalten sind. In Gebäuden mit Mietwohnungen werden neben der Messung des Gesamtenergieverbrauchs nach den Vorgaben der Heizkostenverordnung auch separate Messungen des Wärmeverbrauchs für Heizung und Warmwasser vorgenommen. Die Messpunkte dieser Messungen liegen näher an den Wärmeübergabestellen, enthalten also weniger technische Verluste als die Punkte zur Messung des Gesamtenergieverbrauchs.

Der Messpunkt für den Energieverbrauch zentraler Warmwassersysteme liegt außerhalb der Wohnungen² und erfasst neben dem Warmwasser-Nutzwärmeverbrauch einen Teil der Verluste des Warmwasser-Verteilsystems. Die Verluste des vor dem Messpunkt liegenden Verteilsystems und des Wärmeerzeugers sind in der Messung nicht enthalten. Für diese Systeme wird also nach Heizkostenverordnung beim Herausrechnen des gemessenen Warmwasserverbrauchs automatisch ein Teil der Verluste des Warmwassersystems und die Verluste des gemeinsam genutzten Wärmeerzeugers³ dem Heizsystem zugeschlagen. Das führt zu systematisch zu hohen Verbrauchsangaben für Heizung. Bei

² Er liegt vor dem zentralen Warmwasser-Wärmespeicher.

³ Das ist der vollständige Wärmeerzeugerverlust auch außerhalb der Heizzeit, wenn der Wärmeerzeuger nur zur Warmwasserbereitung betrieben wird.

dezentralen⁴ Systemen (z.B. Gas-Etagenheizung) werden alle in der Wohnung auftretenden Verluste der Heizung und des Warmwassersystems gemeinsam erfasst und können nicht differenziert werden. Es bleibt also eine Unschärfe zurück, welche Anteile der eingesetzten Energie tatsächlich für Heizung bzw. Warmwasser eingesetzt wurden.

Die Messung des Heizwärmeverbrauchs von Mietwohnungen wird über einen Wärmehzähler in der Wohnung oder (näherungsweise) über Heizkostenverteiler an den Heizkörpern der Wohnung vorgenommen. In beiden Fällen werden im Wesentlichen⁵ die Nutzwärmeverbräuche für Heizung gemessen. Da diese Messwerte kaum bzw. keine technischen Verluste enthalten, führt ihre versehentliche Gegenüberstellung mit berechneten Endenergiebedarfen für Heizung zu systematisch zu kleinen Verbräuchen. Die Abweichungen werden umso größer, je größer die tatsächlichen technischen Verluste sind.

Die Verschiedenartigkeit der praktisch vorkommenden Systeme führt also dazu, dass es keinesfalls trivial ist, Verbrauchsangaben einfach und vollständig zu erheben. Eine sorgfältige Betrachtung vorliegender Verbrauchsangaben nach Lage der Messpunkte ist unbedingt erforderlich. Anderenfalls ist es leicht möglich, systematisch zu hohe oder zu geringe Heizenergieverbräuche abzuleiten und Bedarfswerten gegenüberzustellen.

2.2.2 Wärmeversorgungssysteme, Energiekennwerte und Energieebenen

Einige, die Eigenheiten verschiedener Wärmeversorgungssysteme betreffende Aspekte sind in den vorangegangenen Betrachtungen bereits punktuell in Erscheinung getreten. An dieser Stelle sollen nun dezidiert der Einfluss von Verteilverlusten auf die Größe von Energiekennwerten sowie die Eignung verschiedener Energieebenen zur Beschreibung von Energietransportvorgängen im Gebäude betrachtet werden.

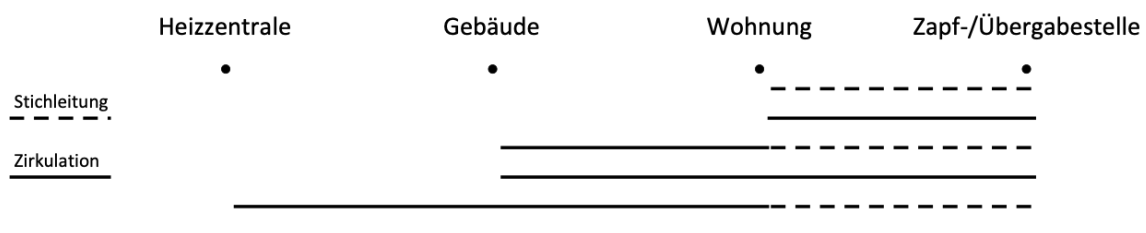


Abbildung 1: Schematische Darstellung verschiedener Ausdehnung von Warmwasser-Verteilnetzen

Die energetische Wirkung von Verteilsystemen auf den Energieverbrauch ist vermutlich bei Betrachtung praktisch vorhandener Systeme der am schlechtesten zu beschreibende Aspekt. Da Verteilverluste in ganz verschiedenen Größenordnungen auftreten und in Gebäuden mit geringem Heizenergieverbrauch sogar den Nutzwärmeverbrauch

⁴ Daneben gibt es noch dezentrale Systeme (z.B. Durchlauferhitzer), in denen der Warmwasser-Energieverbrauch nicht separat gemessen wird, sondern als Teil des Haushaltsstromverbrauchs in unbestimmter Größe vorliegt.

⁵ Im Falle des Wärmehzählers in der Wohnung sind die Heiz-Verteilverluste innerhalb der Wohnung mit enthalten.

übersteigen können, ist es notwendig, die bestimmenden Faktoren auf die Größe der Verteilverluste zu kennen und so zumindest eine grobe Einordnung der Einflussgrößen vornehmen zu können. Anderenfalls besteht die Gefahr, bei der Gegenüberstellung der Endenergieverbräuche verschiedener Wärmeversorgungssysteme zu Fehlinterpretationen bezüglich des Nutzer-Rebound-Effektes zu gelangen.

Die Größe des Verteilverlustes ist von der Anzahl der Leitungen (1-, 2-, 3- bzw. 4-Leiter-System), der Dimensionierung und dem Dämmstandard der Leitungen, den Systemtemperaturen und der Länge der Leitungen abhängig. Abbildung 1 zeigt schematisch verschieden ausgedehnte Warmwasser-Verteilnetze. In ähnlicher Weise nur ohne die Stichleitungen können auch Heiz-Verteilnetze verschieden ausgedehnt sein. Die Länge solcher Systeme kann von unter 10 bis über 100 m variieren⁶. Je nach Dimensionierung und Dämmstandard kann der Wärmedurchgangskoeffizient einer Leitung in einer Bandbreite von 0,1 W/mK (klein, gut gedämmt) und 3 W/mK (groß, ungedämmt) liegen. Je nach den Systemtemperaturen, mit denen Verteilnetze betrieben werden, können sich unter Berücksichtigung aller genannten Parameter Verteilverluste⁷ von weniger als 10 kWh/m²a bis über 100 kWh/m²a ergeben. Ein Teil der innerhalb der Wohnung auftretenden Verteilverluste kann während der Heizzeit genutzt werden. Der Anteil nutzbarer Verteilverluste kann nicht pauschal angegeben werden. Er ist von der Dauer der Heizzeit (Wärmeschutzstandard des Gebäudes) und vom Anteil der in der Wohnung liegenden Verteilnetze abhängig.

Für die Betrachtung von Rebound-Effekten ist auch von Belang, ob die mehr oder minder umfangreichen Verteilverluste im Kennwert des Energieverbrauchs enthalten sind. In Abschnitt 2.2.1 wurden mögliche Messpunkte ja bereits thematisiert. Hier sollen markante Unterschiede der Kennwerte in praktisch häufig vorkommenden Wärmeversorgungsanlagen kurz aufgezeigt werden. Befindet sich der Wärmeerzeuger direkt in der Wohnung (z.B. Gas-Etagenheizung), dann – so kann Abbildung 1 entnommen werden – ist das Verteilsystem kurz. Es liegen geringe Verteilverluste vor, im Verbrauchskennwert sind Verteilverluste und die Verluste des Wärmeerzeugers enthalten. Steht der Kessel einer Zentralheizung im Keller, gibt es zusätzliche Verteilleitungen im Gebäude außerhalb der Wohnungen. Das Verteilnetz wird länger, teilweise größer dimensioniert. Die Verteilverluste nehmen zu, der außerhalb der Wohnungen liegende Teil kann nicht genutzt werden. Auch hier sind die Verteil- und Erzeugerverluste im abgerechneten Verbrauch enthalten. Gibt es zur Wärmeversorgung unweit des Gebäudes eine Heizzentrale (Blockheizung, Nahwärme), nimmt die Länge der Verteilnetze nochmals zu, weitere nicht nutzbare Verteilverluste entstehen. Sie sind im Verbrauch enthalten. Wird Wärme für

⁶ Die angegebenen Längen gelten für Zentralheizungen und Blockheizungen mehrerer Gebäude. In Fernwärmenetzen sind auch Längen bis weit über 10 km möglich.

⁷ Verteilverluste bezogen auf die normierte Gebäudenutzfläche A_N . Diese synthetisch nach GEG (Gebäudeenergiegesetz) definierte Fläche ist in vielen Gebäuden größer als die Wohnfläche, führt also zu vergleichsweise kleineren Kennwerten.

Heizung und Warmwasser in gemeinsamen Leitungen zum Gebäude transportiert (2-Leiter-System), muss wegen der Warmwasserbereitung die Verteilung zum Gebäude hin ganzjährig betrieben werden. Damit entstehen außerhalb der Heizzeit überhöhte Verteilverluste. Obwohl diese Verluste durch das Warmwassersystem verursacht werden, sind sie in Abrechnungen nach Heizkostenverordnung als Teil des Heizenergieverbrauchs enthalten. Das ist kommt dann besonders zum Tragen, wenn nach energetischer Modernisierung die zum Heizen benötigte Wärme viel geringer und auch die Heizzeit kürzer ist. Als System mit dem ausgedehntesten Verteilsystem mit deutlich größerer Dimensionierung des Fernwärmenetzes tritt die Fernwärme in Erscheinung. Abweichend von allen zuvor erwähnten Systemen, ist hier der Verteilverlust außerhalb des Gebäudes nicht im Verbrauch enthalten, da der Wärmeverbrauch an der Gebäudegrenze (Wärmeübergabestation) gemessen wird. Bei sonst gleichen Randbedingungen (Gebäude-Energiestandard, Nutzereinfluss etc.) ist der gemessene Fernwärmeverbrauch also geringer als bei Heizzentralen und Zentralheizungen. Im Fernwärmeverbrauch ist weiterhin der Verlust des Wärmeerzeugers nicht enthalten. Auch das kann gegenüber den anderen erwähnten Systemen zu vergleichsweise deutlich kleineren Verbrauchskennwerten führen.

Nachdem nun die Unterschiede verschiedene Wärmeversorgungssysteme beleuchtet wurden, stellt sich die Frage, ob es eine Kenngröße gibt, die sich als Vergleichsgröße zur Betrachtung von Nutzer-Rebound-Effekten eignet. Je weiter der Messpunkt des Heizwärmeverbrauchs von der Wohnung entfernt ist, desto stärker ist der zugehörige Messwert von den – außerhalb der Wohnung und des Nutzereinflusses liegenden – Problemen mit den technischen Verlusten behaftet. Wünschenswert ist also ein Messpunkt der Heizwärmeübergabe an der Wohnungsgrenze, der diese Probleme eliminiert. Die inzwischen in Mietwohnungen geforderten Wärmezähler haben diesbezüglich gegenüber den bisherigen Heizkostenverteilern unbestrittene Vorteile. Aber auch für diesen Fall bleibt die Beschreibung und Berücksichtigung der in der Wohnung stattfindenden Wärmetransportvorgänge (Wärmegewinne aus innenliegenden Verteilverlusten, Wärmetransport zwischen verschiedenen Wohnungen über Bauteile, Erfassung von direkten Wärmeeinträgen/-verbräuchen wie z.B. Einzelöfen) schwierig. In praktischen Erhebungen wird die Vielfalt der Wärmeversorgungssysteme und damit die Bandbreite der schwer beschreibbaren technischen Verluste innerhalb und außerhalb der Wohnungen oft so groß sein, dass eine Clusterung der Nutzergruppen nach Wärmeversorgungssystemen erforderlich erscheint.

2.3 Versuch einer Einordnung des Nutzerverhaltens

In den vorangegangenen Abschnitten wurden verschiedenartige Aspekte beleuchtet, die zu kleineren oder größeren Werten der gemessenen Energieverbräuche bzw. berechneten Energiebedarfe führen können. Einige dieser Aspekte können den Bedarf bzw.

Verbrauch um eine ganze Größenordnung ändern. Dabei wurde auch klar, dass auch bei großer Sorgfalt bei der Bestimmung dieser Größen, nicht vernachlässigbare Unschärfen verbleiben. Insbesondere in Gebäuden mit umfangreichen technischen Verlusten oder auch beim Vergleich von Wärmeversorgungssystemen mit verschiedenen Energieträgern ist bereits die Ermittlung des Verbrauchs und des Bedarfs praktisch so problembehaftet, dass aus ihrer Gegenüberstellung keine allzu scharf formulierten, auf den Nutzer bezogenen Aussagen abgeleitet werden sollten.

Natürlich hat auch das Nutzerverhalten Einfluss auf den gemessenen Verbrauch. Es kann bei der Berechnung des Energiebedarfs abhängig vom eingesetzten Rechenwerkzeug mehr oder minder gut berücksichtigt werden. Die augenscheinlichsten Aspekte des Nutzerverhaltens sind dabei:

- der Temperaturwunsch des Nutzers während der Aufenthaltszeit
- die Art und Dauer der Lüftung
- die Inbetriebnahme bzw. Abschaltung der Heizung im täglichen und saisonalen Verlauf.

Diese Aspekte des Nutzerverhaltens sind nicht einfach zu beschreiben. Ebenso rufen die Wechselwirkungen der Nutzeraspekte mit den baulichen und anlagentechnischen Einflüssen Schwierigkeiten bei der Interpretation ermittelter Bedarfs- und Verbrauchsdaten hervor.

Temperaturwunsch des Nutzers

Die Frage, inwiefern der Temperaturwunsch des Nutzers mit den gemessenen Temperaturen in Einklang steht, wurde bereits in Abschnitt 2.1 thematisiert und ist auch Teil der anschließenden rechnerischen Betrachtungen der Kapitel 3 und 4. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen Nutzer, Wärmeschutz und Anlagentechnik sichtbar. Die Höhe der sich im Gebäude einstellenden bzw. praktisch gemessenen Raumtemperatur ist nur zum Teil vom Nutzer abhängig und kann nicht vollständig von ihm bestimmt werden.

Art und Dauer der Lüftung

Art und Dauer der Lüftung sind durch Messeinrichtungen an Fenstern zwar noch klassifizierbar. Man kann also nach Kipp- und Stoßlüftung unterscheiden und Fensteröffnungszeiten ermitteln. Wie groß aber der daraus resultierende energetische Luftwechsel ist, kann mit gewöhnlichen ingenieurmäßigen Betrachtungen nicht befriedigend beantwortet werden. Im Übrigen findet ein Luftaustausch zwischen Wohnung und Umgebung auch ohne Fensteröffnung statt. Eine Differenzierung nach gewünschter oder – durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle – aufgezwungener Lüftung und damit die Zuordnung der Lüftung zum Verhalten des Nutzers oder zur Beschaffenheit des Gebäudes ist praktisch allenfalls qualitativ abschätzend möglich. Beim Betrieb von Lüftungsanlagen

stellen sich einige zusätzliche Fragen bezüglich der Zuordnung des Nutzerverhaltens zur gemessenen bzw. angenommenen Luftwechselrate, von denen hier nur zwei illustrierend erwähnt werden: Inwiefern kann der Nutzer die Dauer und Intensität des Anlagenluftwechsels beeinflussen? Wie wirken Undichtigkeiten der Gebäudehülle auf den Luftwechsel beim Betrieb von Abluftanlagen? Um zu einer quantitativen Zuordnung der energetischen Wirkung der durch Nutzer, Undichtigkeiten und Lüftungsanlagen hervorgerufenen Lüftungsvorgänge zu gelangen, können nur aufwendige Simulationsmodelle Abhilfe verschaffen, die alle relevanten Einflüsse wie z.B.:

- Wind
- Exposition der Fenster der Wohnung (in einer bzw. mehreren verschieden orientierten Fassaden)
- Durchströmung der Einzelzimmer und der Wohnung sowohl mit (Lüftung durch Nutzer) als auch ohne (Undichtigkeiten) geöffnete Fenster
- Wirkung von Lüftungsanlagen (Volumenstrom Abluftanlagen vs. Zu- und Abluftanlagen)
- die Einspeicherung bzw. den Entzug von Wärme in bzw. aus oberflächennahen Bauteilschichten und Mobiliar als energetische Konsequenz aus Lüftungsvorgängen

adäquat berücksichtigen. Solche Modelle kommen aufgrund ihrer Komplexität für praktische Erhebungen nicht in Frage. In den nachfolgenden Untersuchungen dieses Werkstattberichtes werden Varianten mit einer praktisch erwarteten Bandbreite von Gesamt-Luftwechselraten untersucht, ohne dass dabei nach Undichtigkeit, Nutzer und Lüftungsanlage differenziert werden kann.

Inbetriebnahme bzw. Abschaltung der Heizung

Ob und wann eine Heizung durch den Nutzer in Betrieb genommen bzw. abgeschaltet wird, hängt mit dem Temperaturwunsch des Nutzers zusammen, ist also vom Nutzerverhalten abhängig. Aber auch hier sind Wechselwirkungen mit der Gebäudehülle und der Anlagentechnik vorhanden. Einige Wechselwirkungen, wie beispielsweise die Wirksamkeit/Sinnfälligkeit der Nachtabsenkung bei verschiedenen Wärmeschutzstandards, werden in Kapitel 4 behandelt. Daneben gibt es weitere Nutzerverhaltensaspekte, die auf den Wärmetransport zwischen verschiedenen Räumen und Wohnungen abzielen, die mit dem dort verwendeten Modell nicht untersucht werden können, da es eine einheitliche Temperatur für das Gesamtgebäude vorsieht. An dieser Stelle soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass alle Effekte aus zeitlicher und räumlicher Teilbeheizung von Wechselwirkungen zwischen Nutzerverhalten, Gebäudehülle und Anlagentechnik geprägt sind. Dementsprechend wird jede – vom einem angenommenen „Norm-Nutzerverhalten“ abweichende, nutzerintendierte – Inbetriebnahme/Abschaltung der Heizung zu einer Änderung des Energiebedarfs/-verbrauchs führen, die aber auch abhängig vom

Wärmeschutz und der Anlagentechnik ist. Aus den Wechselwirkungen ergeben sich fallweise unterschiedlich hohe relative bzw. absolute Änderungen der Energiekennwerte.

Zwischenfazit

Auch wenn der hier vermittelte Eindruck von den Auswirkungen der Einzeleinflüsse und ihrer Wechselwirkungen auf den Energiebedarf bzw. -verbrauch im Gebäude rudimentär und unvollständig bleibt, kann dennoch festgehalten werden, dass der Nutzereinfluss immer nur einen Anteil an den Rebound-Effekten unter den vielfältigen Einflüssen darstellt. Er kann den Energiebedarf/-verbrauch steigern oder senken. Eine quantitative Zuordnung der relativen oder absoluten Änderung von Energiekennwerten zu einem bestimmten Nutzerverhalten ist aber aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen im Gebäude nicht möglich. Eine alleinige Zuordnung der Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch zum Nutzer wird der Komplexität der Wärmetransportvorgänge im Gebäude nicht gerecht und wird als falsch angesehen.

3 Endenergieverbrauch und stationär berechneter Endenergiebedarf – Exemplarische Betrachtung der Einflüsse des Nutzers, der Anlagentechnik und des Lokalklimas

In diesem Kapitel werden vorliegende, **gemessene** Endenergieverbräuche und stationär **berechnete** Endenergiebedarfe von Wohngebäuden gegenübergestellt. Die Genauigkeit stationärer Berechnungsverfahren eignet sich zur größenordnungsmäßigen Einordnung einiger relevanter Einflüsse des Nutzers, der Anlagentechnik und des Lokalklimas auf den Endenergiebedarf. Demgegenüber erfordern Wechselwirkungen zwischen nutzerabhängigen Aspekten und den Einflüssen aus Wärmeschutz und Anlagentechnik, die im täglichen Verlauf auftreten, eine höhere zeitliche Auflösung bei der rechnerischen Betrachtung der Vorgänge (zumindest quasi-stationäre oder aber instationäre Verfahren). Einen diesbezüglichen Einblick verschafft das anschließende Kapitel 4.

Ziel der Betrachtung hier ist – neben dem Gewinn der Erkenntnis, dass es nicht „den“ Energiebedarf gibt – eine Sensibilisierung für künftige Studien zu Rebound-Effekten bezüglich der Vielfalt von Einflussgrößen und ihrer Auswirkungen auf berechnete Energiebedarfe. Dazu sollen exemplarische Betrachtungen an zwei nahezu identischen Mehrfamilienhäusern dienen, deren Energieverbräuche vorliegen und berechneten Energiebedarfen gegenübergestellt werden können. Ausgangspunkt der hier angestellten Betrachtung ist ein normnah berechneter Energiebedarf (s. Abschnitt 3.2), der weitgehend dem im Energiebedarfsausweis (öffentlich-rechtlicher Nachweis nach EnEV bzw. GEG) enthaltenen Bedarf⁸ entspricht. Dieser Energiebedarf steht für den praktisch am häufigsten vorliegenden, durch Energiebilanzierung ermittelten Bedarf⁹. Anschließend werden Annahmen und Randbedingungen zur Berechnung möglicher, wirklichkeitsnaher Energiebedarfe angepasst. Diesen Energiebedarfen werden die gemessenen Verbräuche gegenübergestellt und so eine Einordnung der Einflüsse verschiedener Parameter vorgenommen. Zur Berechnung der Energiebedarfe kommt das Bilanzierungswerkzeug „EnEV-XL“ des Instituts Wohnen und Umwelt Darmstadt (IWU) [IWU 2015] zum Einsatz. Die lokalen Klimadaten entstammen einer Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Sie können dem Excel-Tool „Gradtagszahlen in Deutschland“ (Gradtagszahlen-Tool) des IWU [IWU 2022] in der für die Bilanzierung aufbereiteten Form entnommen werden.

⁸ Die Berechnung erfolgt nach DIN V 4108/4701.

⁹ Dennoch ist zu beachten, dass für Bestandsgebäude viel häufiger Energieverbrauchsausweise vorkommen, für deren Erstellung keine Energiebilanzierung vorgenommen wird, sondern auf vorhandene Verbrauchsangaben zugegriffen wird.

Anmerkung zur Eignung von Energiebedarfs- und -verbrauchsausweisen zur Beschreibung von Rebound-Effekten:

Praktisch liegt für ein Gebäude entweder ein Energiebedarfs- oder ein Energieverbrauchsausweis im Sinne des öffentlich-rechtlichen Nachweises (EnEV bzw. GEG) vor. Aufgrund normierter Randbedingungen eignet sich der Bedarfsausweis nur bedingt zur Einordnung des Nutzerverhaltens. Es soll aber auch nicht unerwähnt bleiben, dass Bedarfsausweise eigentlich einen ganz anderen Zweck erfüllen. Sie sollen den Energiestandard von Gebäuden – eben gerade unabhängig von Einflüssen des Lokalklimas und des Nutzers – mit Blick auf die Einhaltung gesetzlicher energetischer Mindestanforderungen (früher nach EnEV, heute nach GEG) vergleichbar machen. Der Verbrauchsausweis eignet sich nicht zur Beschreibung von Rebound-Effekten. Es fehlen Angaben zum Energiestandard des Gebäudes. Damit kann keine Aussage zum Erwartungswert des Energieverbrauchs bei „normalem“ bzw. durchschnittlichem Nutzerverhalten getroffen werden.

Alle nachfolgend betrachteten Varianten des Energiebedarfs unter Verwendung individueller Annahmen dienen der Annäherung an einen wirklichkeitsnah berechneten Energiebedarf. Dabei sollen einige energetisch relevante Aspekte in praktisch möglichen Bandbreiten variiert werden, um die verschiedenartigen Einzeleinflüsse auf den Energiebedarf zu verdeutlichen.

3.1 Beschreibung der untersuchten Gebäude und der vorhandenen Unterlagen

Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich um Wohngebäude der 1930er Jahre. Es sind zwei Gebäude¹⁰ mit zwei Vollgeschossen, ausgebautem Dachgeschoss und ohne Keller. Die Baukörper sind relativ kompakt mit rechteckigem Grundriss, der eine deutlich größere Breite als Tiefe aufweist, einer Lochfassade mit einem baualterstypischen, eher kleinen Fensterflächenanteil und nach oben hin abgeschlossen durch ein Walmdach mit einigen Dachgauben. Bis auf die Anzahl der Dachgauben ist die Geometrie beider Gebäude nahezu identisch, sodass beide Gebäude durch das gleiche Modell für die Energiebilanzierung abgebildet werden können. Alle Energiebedarfe müssen folglich nur einmal berechnet werden und können den Verbräuchen beider Gebäude gegenübergestellt werden. Die Wohnfläche beider Gebäude beträgt in Summe 1140 m². Sie verteilt sich auf insgesamt 20 Wohnungen. Baulich befinden sich die Gebäude weitgehend im ursprünglichen Zustand. Lediglich die Fenster wurden erneuert, seinerzeit jedoch noch mit Zweischeiben-Isolierverglasung. Damit gelten sie nach heutigen Maßstäben als energetisch nicht modernisiert. Die Wärmeversorgung erfolgt über eine

¹⁰ Jedes dieser Gebäude besteht aus zwei Doppelhaushälften mit separaten Eingängen, über die jeweils fünf Wohnungen erschlossen werden.

Blockheizung, das heißt durch die gemeinsame Nutzung eines Gaskessels für beide Gebäude zur Heizung und zur Warmwasserbereitung. Die Wärme wird durch ein im Erdreich verlegtes Leitungssystem von einem Gebäude zum zweiten transportiert.

Die energetisch relevanten Angaben zur Gebäudehülle und zur Anlagentechnik liegen in einer für Bestandsgebäude ungewöhnlich guten Qualität vor. Die Gebäude sind in einer Energieprofil-Datenbank [IWU 2009] hinterlegt. Für alle Bauteile der Gebäudehülle liegen Flächen nach einem – in der Datenbank integrierten – Flächenschätzverfahren vor. Zur Beschreibung der energetischen Qualität der Bauteile werden baualtersspezifische U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizienten) genutzt. Flächen und U-Werte zur Beschreibung der Gebäudehülle werden für die Berechnungen dieses Werkstattberichtes damit zwar nicht gemessen bzw. berechnet. Die genutzten Verfahren erlauben aber dennoch die Aussage, dass Flächen und U-Werte in hinreichend guter Näherung vorliegen. In der Datenbank sind weiterhin alle zur Abbildung des Wärmeversorgungssystems notwendigen Angaben enthalten. Somit sind alle zur Erstellung von Energiebilanzen innerhalb dieses Werkstattberichtes erforderlichen Angaben vorhanden.

Es liegen Verbrauchsdaten für Erdgas aus drei aufeinander folgenden Jahren von 2019 bis 2021 vor. In dieser Zeit waren alle Wohnungen vermietet¹¹. Die Wärmebereitstellung für Heizung und Warmwasser erfolgt ausschließlich mit Erdgas. Es kann davon ausgegangen werden, dass – eingeschränkt auf Erdgas – der Verbrauch einfach vorliegt und vollständig erfasst wurde. Der Verbrauch elektrischer Energie als Hilfsenergie zum Betrieb der Anlagentechnik liegt nicht vor. Damit kann der gemessene Gasverbrauch dem berechneten Endenergiebedarf Gas¹² gegenübergestellt werden.

Die Daten zur Beschaffenheit des Gebäudes wurden durch den Praxispartner im KOSMA-Projekt, die Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH, bereitgestellt. Die Verbrauchsdaten zu den Gebäuden wurden uns in aggregierter Form von der MET Hessen zur Verfügung gestellt. Beiden sei an dieser Stelle für die aufgeschlossene, hilfsbereite und schnelle Bereitstellung der zur Bearbeitung dieses Projektes wertvollen Daten ausdrücklich gedankt!

¹¹ Es treten marginale Leerstände auf, die hier aber vernachlässigt werden können.

¹² Bei der Betrachtung des berechneten Endenergiebedarfes wird analog zu den vorliegenden Verbrauchsangaben der Hilfsenergiebedarf (elektrischer Strom) nicht in den Vergleich aufgenommen. Das Weglassen der elektrischen Hilfsenergie ist für diesen punktuellen Einblick – insbesondere mit der Intention, zunächst einen Eindruck von den Einzeleinflüssen verschiedener Parameter auf den Rebound-Effekt zu gewinnen – sicher legitim. Mit Blick auf die praktisch sehr große Vielfalt von Wärmeversorgungslösungen kann für künftige Studien zu Rebound-Effekten jedoch nicht oft genug darauf hingewiesen werden, Verbräuche einfach und vollständig für alle Energieträger zu erheben und dann Bedarfen gegenüberzustellen.

3.2 Varianten des stationär berechneten Endenergiebedarfs zur Gegenüberstellung mit dem Energieverbrauch

In diesem Abschnitt werden nun einige Aspekte mit Einfluss auf den Energiebedarf bzw. -verbrauch untersucht, was auch zum besseren Verständnis von Rebound-Effekten beitragen soll. Zu Beginn werden der Einfluss des Lokalklimas auf Bedarf und Verbrauch und die diesbezüglichen Möglichkeiten zum Abgleich zwischen Bedarf und Verbrauch dargestellt. In den weiteren Varianten zur Untersuchung der Einflüsse von Raumtemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten werden dann die unter Verwendung des Lokalklimas berechneten Energiebedarfe den gemessenen Verbräuchen gegenübergestellt. Während Raumtemperatur und Luftwechselrate in praktisch erwarteten Bandbreiten variiert werden, die das erwartete Verhalten der meisten Nutzer widerspiegeln sollen, werden die technischen Verteilverluste nur innerhalb einer Bandbreite variiert, die den erwarteten Einfluss des in den Beispielgebäuden vorliegenden Verteilsystems beschreibt. Die – außerhalb dieser Untersuchung – im gesamten Gebäudebestand mögliche Bandbreite technischer Verteilverluste ist also für die Vielfalt der Verteilsysteme deutlich größer¹³. Die weiteren Geometrie- und Wärmeschutzangaben werden unverändert aus den Gebäudeunterlagen übernommen und nicht variiert. Die berechneten Endenergiebedarfe der so gebildeten Varianten dürfen als die erwartete Bandbreite des Energieverbrauchs der untersuchten Gebäude in ihrem derzeitigen Zustand¹⁴ angesehen werden. Für die Gegenüberstellung von Bedarf und Verbrauch liegt der günstige Fall vor, dass der Energieverbrauch Gas einfach und vollständig vorliegt. An dieser Stelle sei mit Blick auf weitere Untersuchungen zu Rebound-Effekten nochmals darauf hingewiesen, dass das nicht immer der Fall sein muss (s. auch Abschnitt 2.2). Und auch weitere technische Aspekte (Nutzbarkeit Brennwerteffekt etc.) können sowohl auf berechnete Bedarfe als auch auf gemessene Verbräuche noch in ähnlichen Größenordnungen wirken wie die hier ausgewählten, nun nachfolgend dargestellten Aspekte.

Zur Betrachtung des Einflusses des Lokalklimas soll die Gegenüberstellung von Bedarf und Verbrauch auf zweierlei Weise vorgenommen werden – durch Anpassung von Verbräuchen (Anwendung von Klimafaktoren), die dem Standard-Energiebedarf gegenübergestellt werden und durch gebäudeindividuell, unter Verwendung der lokalen Klimadaten berechnete Bedarfe, die den gemessenen, nicht angepassten Verbräuchen gegenübergestellt werden. Die daran anschließenden Betrachtungen zum Nutzereinfluss und zum Einfluss der Verteilverluste werden exemplarisch für das Jahr 2019 durch Gegenüberstellung von Bedarfen unter Verwendung des Lokalklimas und der gemessenen

¹³ Es sind sowohl deutlich kleinere als auch deutlich größere Verteilverluste denkbar. (Wegfall von Warmwasser-Zirkulation, abweichende Systemtemperaturen, Leitungsdämmung und Ausdehnung des Netzes)

¹⁴ Solche Ergebnisse sind gebäudeindividuell. Sie gelten für die untersuchten Gebäude, sind nicht auf den Gebäudebestand übertragbar.

Verbräuche vorgenommen. Zum Abschluss wird die Bandbreite der Einflüsse im Gesamtüberblick für alle drei Jahre diskutiert.

3.2.1 Berücksichtigung des Einflusses des Lokalklimas

Im Zentrum Deutschlands, in etwa 25 km Entfernung von den hier untersuchten Gebäuden wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) eine Wetterstation betrieben. Sie liegt etwa auf dem gleichen Höhenniveau wie die Gebäude. Durch die geringe Entfernung und die ähnliche Höhe erscheinen die in der Wetterstation gemessenen Temperaturen und Strahlungsdaten zur Gegenüberstellung der Bedarfe und Verbräuche als geeignet.

Die Verbräuche jedes Jahres unterscheiden sich zwischen den Gebäuden, wobei immer im gleichen Gebäude der höhere Verbrauch vorliegt (Gebäude 2). Die Ursachen wurden nicht ergründet. Aber auch hier darf davon ausgegangen werden, dass es viele Ursachen für die Abweichungen trotz der quasi identischen Gebäude gibt (Verbrauchserfassung, Standort des Kessels, Ausdehnung, Zustand und Betrieb der technischen Systeme, Nutzerverhalten). Für die drei Jahre liegen gemessene Verbräuche von 158 bis 232 kWh/m²a und ein für das Standardklima berechneter Bedarf von 246 kWh/m²a (jeweils bezogen auf A_N) vor (s. Tabelle 1). Bezogen auf den Bedarf nach Standardklima Deutschland liegen die Abweichungen der gemessenen (nicht angepassten) Verbräuche bei -6%...-36% bzw. -14...-89 kWh/m²a. Alle gemessenen Verbräuche liegen unter dem Bedarf – Die untersuchten Gebäude zeichnen damit das für Bestandsgebäude mit (sehr) hohem Energiebedarf typischerweise vorzufindende Bild nach (Verbrauch geringer als Bedarf).

Anpassung von Verbräuchen

Bei der Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen wird in wissenschaftlichen Studien und in der Praxis (z.B. energetisches Portfoliomanagement) häufiger von der Anpassung von Verbräuchen an das Standardklima unter Verwendung von Klimafaktoren Gebrauch gemacht. Das liegt daran, dass die benötigten Klimafaktoren flächendeckend über einen großen Zeitraum vorliegen, fortlaufend aktualisiert werden und auch die Anpassung einfach ist. Allerdings ist dieses Vorgehen in der Fachwelt insbesondere bei höheren Gebäude-Energiestandards nicht unumstritten. Das liegt daran, dass nur die lokalen Außentemperaturen in den Faktor eingehen. Weitere maßgebliche Größen wie z.B. die Solarstrahlung, der Dämmstandard und die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes bleiben unberücksichtigt.

Dem Gradtagszahlen-Tool [IWU 2022] können für die Jahre 2019, 2020 und 2021 Faktoren zur Anpassung der unter dem Einfluss des Lokalklimas gemessenen

Endenergieverbrauchskennwerte Heizung an das Standardklima¹⁵ von 1,07, 1,12 und 0,98 entnommen werden (s. auch Tabelle 1). Das verhältnismäßig¹⁶ kälteste der drei Jahre ist hier 2021, das wärmste 2020. Die Verbrauchsdaten beider Gebäude werden mit dem Klimafaktor des entsprechenden Jahres multipliziert und so der Verbrauch¹⁷ angepasst. Abbildung 2 zeigt die Auswirkungen der Anpassung. Die Verbräuche und der Standard-Bedarf sind über dem Klimafaktor aufgetragen. Die gemessenen (nicht angepassten) Verbräuche sind als Punkte über dem Klimafaktor von 1 aufgetragen, zu Vergleichszwecken ebenso der für das Standardklima Deutschland berechnete Energiebedarf. Die angepassten Verbräuche weichen vom Bedarf nach Standardklima Deutschland um -8%...-28% bzw. -19...-70 kWh/m²a ab. In Abbildung 2 sind die Abweichungen der angepassten Verbräuche für das Jahr 2019 (gelbe Kreisringe) gegenüber dem Bedarf nach Standardklima (grüner, gefüllter Kreis) durch Pfeile dargestellt.

Durch die Anwendung der Klimafaktoren ergeben sich angepasste Verbrauchskennwerte, die – für die untersuchten Jahre – deutlich dichter beieinander liegen und auch deutlich kleinere Abweichungen gegenüber dem Bedarf nach Standardklima aufweisen. Die Unterschiede zwischen den zwei quasi identischen Gebäuden bleiben erhalten und auch das typische Bild von Verbräuchen energetisch nicht modernisierter Gebäude, die unter den Bedarfswerten liegen. Es verbleiben also nach dieser einfachen Anpassung der Verbrauchswerte noch nennenswerte Abweichungen¹⁸, deren Größe im Einzelfall etwa dem Gesamtverbrauch eines energieeffizienten Wohngebäudes für Heizung und Warmwasser in Summe entspricht. Zur Untersuchung der Ursachen der verbliebenen Abweichungen bietet diese einfache Methodik aber keine weiteren Möglichkeiten.

¹⁵ Gradtagszahlen mit der Einheit Kd (Kelvintage) geben für eine festgelegte Heizgrenztemperatur an, wie umfänglich die Unterschreitung dieser Grenztemperatur ist. Je größer die Gradtagszahl, desto kälter das betrachtete Klima des Jahres. Auch für das Standardklima des öffentlich-rechtlichen Nachweises (ein mittleres Klima für Deutschland) kann eine Gradtagszahl bestimmt werden. Setzt man die Gradtagszahl des Standardklimas ins Verhältnis zur Gradtagszahl des lokalen Klimas im Betrachtungsjahr, ergibt sich der Faktor zur Normierung von Energieverbrauchskennwerten auf das Standardklima. Faktoren größer als 1 bedeuten also wärmere Jahre als nach Standardklima, Faktoren kleiner als 1 entsprechend kältere Jahre.

¹⁶ Die untersuchten Lokalklimata stehen nicht für ein repräsentatives Abbild „kalter“ und „warmer“ Jahre in Deutschland sondern sind punktuelle Beispiele dreier aufeinander folgender, verschieden warmer Jahre des Untersuchungsstandortes.

¹⁷ Die Verbräuche für Heizung und Warmwasser können im vorliegenden Fall nicht separiert werden. Weiterhin wird der Gesamtverbrauch vom Verbrauch für Heizung dominiert. Es erscheint also vertretbar den Gesamtverbrauch anzupassen und damit auch die kleine Unschärfe – Anpassung auch des Warmwasserverbrauchs – zuzulassen.

¹⁸ Der kleinste der angepassten Verbrauchswerte weicht bezogen auf den größten Wert um -22% bzw. -51 kWh/m²a ab.

Tabelle 1: Gemessene und angepasste Endenergieverbräuche der zwei quasi identischen Gebäude, nach Standard- und Lokalklima berechnete Endenergiebedarfe des Modellgebäudes sowie Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch

Klima Gebäude	Standard	Lokal 2019		Lokal 2020		Lokal 2021	
		1	2	1	2	1	2
gemessener Endenergieverbrauch Gas in kWh/m2a (A_N)	–	177	202	158	174	206	232
Faktor zur Anpassung an das Standardklima (Gradtagszahlen-Tool)	–	1,07		1,12		0,98	
an das Standardklima angepasster Endenergieverbrauch Gas in kWh/m2a (A_N)	–	189	216	177	194	202	227
normnah berechneter Endenergiebedarf Gas in kWh/m2a (A_N)	246	227		215		250	
Umkehrfaktor, der gebäudeindividuell das Verhältnis des Bedarfs mit Standardklima bezogen auf das Lokalklima beschreibt	–	1,09		1,15		0,98	
relative Abweichung zwischen angepasstem Verbrauch und Bedarf mit Standardklima	–	-23%	-12%	-28%	-21%	-18%	-8%
absolute Abweichung zwischen angepasstem Verbrauch und Bedarf mit Standardklima*	–	-57	-30	-70	-52	-45	-19
relative Abweichung zwischen gemessenem Verbrauch und Bedarf mit Lokalklima	–	-22%	-11%	-27%	-19%	-18%	-7%
absolute Abweichung zwischen gemessenem Verbrauch und Bedarf mit Lokalklima*	–	-50	-25	-57	-41	-45	-19

* in kWh/m2a (A_N)

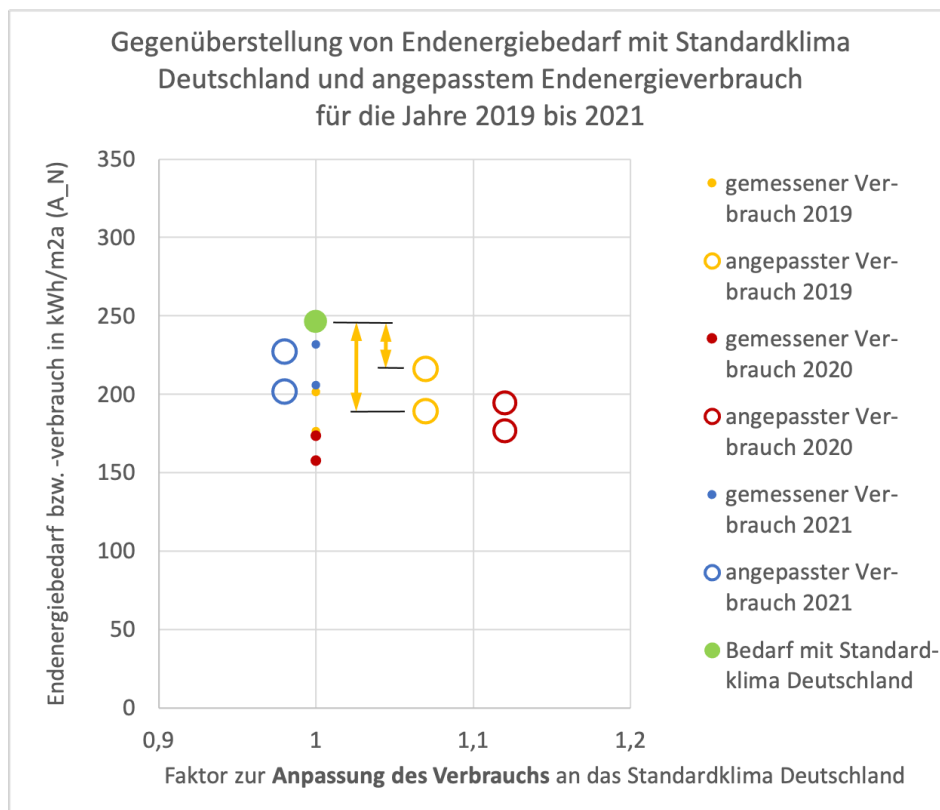


Abbildung 2: Anpassung des gemessenen Endenergieverbrauchs an das Standardklima Deutschland

Bedarfe mit Lokalklima

Die zweite Methode zur Berücksichtigung des Einflusses des Lokalklimas besteht darin, die lokalen Temperatur- und Strahlungsdaten in die Bedarfsberechnung einfließen zu lassen und den gemessenen Verbräuchen (die den Einfluss des Lokalklimas ja bereits enthalten) gegenüberzustellen. Eine solche Bedarfsberechnung ist aufwendig und wird in der Praxis gewöhnlich nicht angewandt. Für wissenschaftliche Untersuchungen insbesondere zu Rebound-Effekten erscheint sie aber geboten. Denn neben der Eliminierung des Einflusses des Lokalklimas können so einige weitere Schwierigkeiten zur Findung eines geeigneten Erwartungswertes des Verbrauchs und damit der Bestimmung der Größe des Rebound-Effektes überwunden werden. Das wird in diesem und in den folgenden Abschnitten verdeutlicht. Beginnend mit der Gegenüberstellung von normnah berechneten Bedarfen unter Verwendung des Lokalklimas mit den gemessenen Verbräuchen werden in den kommenden Abschnitten dann weitere Parameter variiert und so die Bedeutung verschiedener Einzeleinflüsse auf den Erwartungswert des Verbrauchs resp. Rebound-Effekt untersucht.

Das Vorgehen zur Berücksichtigung des Lokalklimas kehrt sich bei der Betrachtung von „Bedarfen mit Lokalklima“ gegenüber dem der „Anpassung von Verbräuchen“ um. Dort waren unter Verwendung der Klimafaktoren des Gradtagszahl-Tools die Verbräuche angepasst worden. Hier werden neben dem Bedarf mit Standardklima auch Bedarfe mit Lokalklima berechnet. Anschließend wird der Standardbedarf in Verhältnis gesetzt zu den Bedarfen mit Lokalklima und so für jedes Untersuchungs-jahr ein Umkehrfaktor als Pendant zum Klimafaktor aus „Anpassung von Verbräuchen“ gebildet.

Die für das Modellgebäude berechneten Bedarfe mit Lokalklima liegen für die drei untersuchten Jahre bei 227, 215 und 250 kWh/m²a. Im Vergleich mit dem Bedarf nach Standardklima Deutschland ergeben sich Umkehrfaktoren von 1,09, 1,15 und 0,98 (s. Tabelle 1). Diese Faktoren liegen sehr nahe an den oben und ebenfalls in Tabelle 1 angegebenen Klimafaktoren. Das kann so interpretiert werden, dass im vorliegenden Fall auch die Klimafaktoren gut geeignet sind, den Einfluss des Lokalklimas für die untersuchten Gebäude zu beschreiben. Hier führen der kleine Fensterflächenanteil und der ungedämmte Zustand der Außenbauteile dazu, dass die Wärmetransportvorgänge in der Heizzeit vom Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle dominiert werden und solare Wärmegewinne eine untergeordnete Bedeutung haben. Dennoch soll an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen werden, dass die Anpassung des Verbrauchs mit – lediglich von der Außentemperatur abhängigen – Klimafaktoren insbesondere in Gebäuden mit hohem Dämmstandard und auch abhängig von weiteren Gebäudeparametern als kritisch angesehen werden kann. Das liegt an den in diesen Gebäuden geänderten

Größenordnungen der solaren Wärmegewinne und des Transmissionswärmeverlustes sowie an der steigenden Bedeutung des Wärmespeichervermögens¹⁹ des Gebäudes.

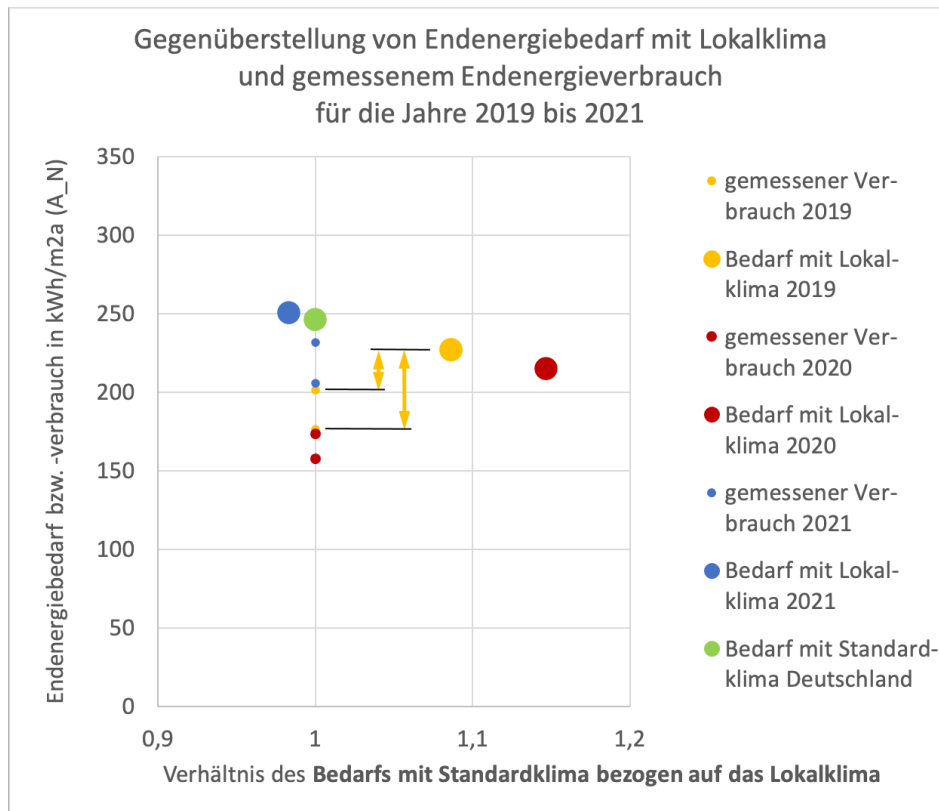


Abbildung 3: Gemessene Endenergieverbräuche und normnah, jedoch mit Lokalklima berechnete Endenergiebedarfe

Die gemessenen Verbräuche weichen gegenüber den Bedarfen mit Lokalklima des jeweiligen Betrachtungsjahres um -7%...-27% bzw. -19...-57 kWh/m²a ab. In Abbildung 3 sind die Abweichungen der gemessenen Verbräuche für das Jahr 2019 (gelbe Punkte) gegenüber dem Bedarf mit Lokalklima des Betrachtungsjahres (gelb gefüllter Kreis) durch Pfeile dargestellt. Auch hier ergeben sich nennenswerte Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch in ähnlichen Größen wie oben bei der „Anpassung des Verbrauchs“. Allerdings bietet die Methode der Gegenüberstellung von gemessenem Verbrauch und individuell berechneten Bedarfen nun Möglichkeiten, weitere Einflussgrößen in der Bedarfsberechnung zu variieren und so einen Eindruck von deren Einflüssen auf die Höhe des Bedarfs resp. des erwarteten Verbrauchs zu gewinnen. Dies soll nun für drei dieser Parameter – die Raumtemperatur, die Luftwechselrate und die technischen Verteilverluste – geschehen.

¹⁹ Das Wärmespeichervermögen eines Gebäudes ist hauptsächlich von der Masse (Bauwerk und Einrichtung) abhängig und ist deshalb in Gebäuden mit hohem Dämmstandard per se nicht höher. Durch die viel geringeren Transmissionswärmeverluste kann aber die gleiche eingespeicherte Wärme über einen längeren Zeitraum zur Einhaltung ausreichend hohen Temperaturen im Gebäude dienen als im ungedämmten Bestand. So nimmt die Bedeutung des Wärmespeichervermögens in gedämmten Gebäuden zu.

3.2.2 Variantenbildung für die Parameter Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste

In den Varianten sind die hier untersuchten Parameter Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste jeweils in drei verschiedenen Ausprägungen berücksichtigt worden. Damit ergeben sich für ein Untersuchungsjahr 27 Varianten des Energiebedarfs. Die Ergebnisse sind für das Jahr 2019 in Tabelle 2 zusammengefasst. Die angesetzten Bandbreiten der Parameter und die daraus resultierenden Einzeleinflüsse auf den Energiebedarf werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert.

Tabelle 2: Endenergiebedarfe mit Lokalklima für das Jahr 2019 bei Variation von Raumtemperatur, Luftwechselrate sowie technischen Verteilverlusten

Untersuchungsjahr 2019

Raumsolltemperatur		Luftwechselrate		
		gering	Norm	hoch
gering	tVv gering	146	166	178
	tVv mittel	170	190	202
	tVv hoch	174	194	206
mittel	tVv gering	179	203	217
	tVv mittel	202	227	241
	tVv hoch	207	231	245
hoch	tVv gering	211	240	257
	tVv mittel	232	260	277
	tVv hoch	252	281	298

tVv - technische Verteilverluste

Ceteris-paribus-Betrachtung der Bedarfe bei Änderung der Raumtemperatur, Luftwechselrate bzw. technischen Verteilverluste

Raumtemperatur mittel – gering: 33 ... 39 kWh/m²a

Raumtemperatur hoch – gering: 62 ... 92 kWh/m²a

Luftwechselrate mittel – gering: 20 ... 28 kWh/m²a

Luftwechselrate hoch – gering: 32 ... 45 kWh/m²a

techn. Verteilverluste mittel – gering: 21 ... 24 kWh/m²a

techn. Verteilverluste hoch – gering: 28 ... 41 kWh/m²a

Raumtemperatur

In den Bedarfsberechnungen werden drei verschiedene Raumtemperaturen untersucht:

- 17°C – geringe Temperatur
- 19°C – mittlere Temperatur
- 21°C – hohe Temperatur

Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Raumsolltemperatur tagsüber. Da in dieser Art Bilanzierung immer nur eine Raumtemperatur angegeben werden kann, ist sie als räumlich gewichtete Temperatur zu verstehen. Das heißt im einfachsten Fall, dass für alle innerhalb der thermischen Hülle liegenden Räume (auch Treppenhäuser) eine solche Temperatur angenommen wird. Praktisch wird es oft vorkommen, dass die Treppenhäuser und auch einzelne Räume in Wohnungen nicht oder geringer beheizt werden. Dann können sich in energetisch nicht modernisierten Gebäuden die Temperaturen zwischen den einzelnen Räumen um einige Grad Kelvin unterscheiden. Für solche Gebäude mit nennenswerter räumlicher Teilbeheizung erscheint die angenommene geringe Temperatur mit 17°C (als räumliches Mittel für das Gesamtgebäude) durchaus geeignet zur Abbildung gewöhnlicher Temperaturen in den Aufenthaltsräumen der Wohnungen bei gleichzeitig geringeren Temperaturen in Treppenhäusern und weiteren Räumen der Wohnungen. Bei höheren Wärmeschutzstandards der Gebäudehülle werden die Temperaturunterschiede zwischen beheizten und unbeheizten Räumen immer kleiner, weil der Wärmetransport zwischen den Räumen gegenüber dem Wärmeverlust an die Umgebung²⁰ an Bedeutung immer mehr zunimmt²¹. Schließlich wird in den Varianten mit hoher mittlerer Raumtemperatur ein Wert von 21°C angesetzt. Unter Berücksichtigung von Treppenhäusern und weiteren nicht/gering beheizten Räumen kann sich praktisch eine solche Temperatur in energetisch nicht modernisierten Gebäuden nur einstellen, wenn in den beheizten Räumen Temperaturen vorherrschen, die deutlich größer als 21°C sind. Für die hier untersuchten Gebäude darf vermutet werden, dass die praktisch auftretende mittlere Raumtemperatur insbesondere wegen des nicht modernisierten Zustandes der Gebäudehülle deutlich geringer ist.

Für die drei hier untersuchten Parameter zeigt die Raumtemperatur in der variierten Bandbreite den größten Einfluss auf den Energiebedarf. Interessant dabei ist, dass die (zwischen 17°C und 19°C) um 2 Kelvin voneinander abweichenden Temperaturen der Ausprägungen „gering“ und „mittel“ (bei sonst gleichen Randbedingungen) zu Abweichungen der Kennwerte von 33 ... 39 kWh/m²a führen, während beim Vergleich von „hoch“ und „gering“ beim doppelten Temperaturunterschied (4 Kelvin) die Abweichungen mit 62 ... 92 kWh/m²a oft mehr als doppelt so groß sind. Mit steigender mittlerer Raumtemperatur steigen die berechneten Bedarfe also leicht überproportional an.

²⁰ nach außen sowie in Richtung unbeheizter Dachboden, Keller etc.

²¹ Dies und die in Kapitel 4 beleuchtete Tatsache, dass Gebäude mit hohem Wärmeschutzstandard nachts langsamer auskühlen, bieten Anlass zu der Überlegung, bei der Untersuchung von Gebäuden mit hohen Wärmeschutzstandards eine räumliche Teilbeheizung durch eine – gegenüber den Temperaturen der Aufenthaltsräume – weniger abgesenkte, räumlich gemittelte Raumtemperatur zu berücksichtigen.

Luftwechselrate

Für die Luftwechselrate²² werden drei markante Annahmen getroffen:

- 0,2 h⁻¹ – geringe Luftwechselrate
- 0,7 h⁻¹ – mittlere bzw. etwas erhöhte Luftwechselrate und gleichzeitig Annahme im öffentlich-rechtlichen Nachweis nach DIN V 4108/4701 (Norm)
- 1,0 h⁻¹ – hohe Luftwechselrate

Praktisch setzt sich eine Luftwechselrate immer durch einen vom Nutzer nicht beeinflussbaren Infiltrationsluftwechsel (Fugen, Undichtigkeiten) und den durch Lüftungsmaßnahmen (Nutzer, Lüftungsanlagen) hervorgerufenen Luftwechsel zusammen. In diesem Werkstattbericht werden Gebäude untersucht, in denen keine Lüftungsanlagen vorkommen. Für diese Gebäude ist der Anteil an der Luftwechselrate durch Lüftungsmaßnahmen also rein nutzerabhängig. Die Infiltrationsluftwechselrate wurde nicht bestimmt. Praktisch darf sie hier im Bereich $>0 \dots <0,2 \text{ h}^{-1}$ erwartet werden.

Eine mit 0,2 h⁻¹ angenommene „geringe“ Luftwechselrate²³ kann als typisch für Nutzer angesehen werden, die zumindest in einigen Räumen kurz Stoßlüften²⁴ oder aber auch für sehr undichte Gebäude, in denen der Nutzer neben fühlbaren Zugerscheinungen nur ganz sporadisch lüftet. Die Luftwechselrate von 0,7 h⁻¹ mag als übliche Annahme für eine „mittlere“ Luftwechselrate oder aber auch als leicht erhöht angesehen werden. Zur Vermeidung zu vieler Parameterausprägungen²⁵ wurde hier die Annahme des öffentlich-rechtlichen Nachweises nach DIN V 4108/4701 ohne mechanische Lüftung mit 0,7 h⁻¹ in die Variantenbildung übernommen. Die Annahme von 1,0 h⁻¹ für die „hohe“ Luftwechselrate schließt die theoretisch mögliche Bandbreite nach oben hin noch nicht ab. So hohe und höhere Luftwechselraten sind während der Heizperiode allerdings eher selten (einzelne Wohnungen) anzutreffen, sodass die Annahme von 1,0 h⁻¹ letztlich im Fall der hier angestellten Betrachtung ganzer Gebäude als brauchbar für eine praktisch zu erwartende, hohe Luftwechselrate erscheint.

Die berechneten Bedarfe nehmen ausgehend von einer „geringen“ Luftwechselrate hin zu der Annahme „mittel“ bei sonst gleichen Randbedingungen um 20 ... 28 kWh/m²a zu,

²² Die Luftwechselrate gibt an, wie häufig das Raumluftvolumen pro Stunde durch Lüftung energetisch ausgetauscht wird. So wird beispielsweise bei einer Luftwechselrate von 1,0 h⁻¹ die (warme) Raumluf energetisch einmal pro Stunde vollständig durch (kalte) Außenluft ersetzt.

²³ Zum Vergleich: Eine ähnlich geringe „energetische“ Luftwechselrate ergibt sich auch beim Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die tatsächliche Luftwechselrate ist auch in diesem Fall ähnlich hoch wie für Fensterlüftung. Durch die Wärmerückgewinnung reduziert sich der Wert aber rechnerisch auf eine energetisch relevante Luftwechselrate in der Größenordnung von etwa 0,2 h⁻¹.

²⁴ Beim Stoßlüften werden Fenster eines oder mehrerer Zimmer zeitgleich nicht nur angekippt, sondern ganz geöffnet. Dadurch wird ggf. mehrmals täglich für wenige Minuten für einen intensiven Luftaustausch gesorgt.

²⁵ Ohne Berücksichtigung des öffentlich-rechtlichen Nachweises erscheint die Annahme im Bereich 0,5...0,6 h⁻¹ für die mittlere Luftwechselrate als geeigneter.

von „gering“ zu „hoch“ um 32 ... 45 kWh/m²a. Der Einfluss über die gesamte hier angenommene Bandbreite der praktisch erwarteten Luftwechselraten ist damit etwa so groß wie der Einfluss aus 2 Kelvin Temperaturänderung. Diese Aussage gilt für die untersuchten Gebäude. Für weitere Gebäude, insbesondere abhängig vom Dämmstandard der Gebäudehülle (aber auch von weiteren Größen), ändern sich die Verhältnisse.

Technische Verteilverluste

In Abschnitt 2.2.2 sind bereits die vielen Einzeleinflüsse benannt worden, die zu Wärmeverlusten in Verteilsystemen innerhalb und außerhalb von Gebäuden in ganz verschiedenen Größenordnungen führen können. Dort sind auch Schwierigkeiten bei der treffsicheren Ermittlung der Größe von technischen Verteilverlusten im Einzelgebäude und der unzureichende Kenntnisstand bezüglich einer Bandbreite möglicher Verlustkennwerte im Gebäudebestand thematisiert worden. Die hier getroffenen Annahmen zur Ermittlung eines geringen, mittleren und hohen Verteilverlustes sollen nicht als repräsentative, die gesamte Bandbreite der im Gebäudebestand möglichen Verteilverluste²⁶ abdeckende Annahmen verstanden werden. Vielmehr stehen die Annahmen für mögliche Zustände der Verteilsysteme in den untersuchten Einzelgebäuden unter Berücksichtigung der vorliegenden Gebäudeunterlagen.

Anmerkung zur Berechnung von Verteilverlusten: Die nachfolgende Beschreibung der Annahmen gibt einen Einblick in die Art und Weise, nach der Verteilverluste mit heute üblichen stationären Verfahren (öffentlich-rechtlicher Nachweis und daran angelehnte Werkzeuge) bestimmt werden. Zur Berechnung ist ein Tabellenverfahren vorhanden. Die Parameterausprägungen der Verteilsysteme werden also nicht detailliert anhand der vorhandenen Ausprägungen (z.B. gemessene Länge des Verteilnetzes) erhoben. Stattdessen werden klassifizierte Angaben zu Typ und Baualter des Verteilsystems, der Lage der Verteilleitungen und der Angabe typischer Systemtemperaturen gemacht (s. Tabelle 3). Daneben gehen weitere, vom Verteilsystem unabhängige Größen ein (z.B. Wärmebedarf Heizung, Gebäudegeometrie). Im normativen Algorithmus (Tabellenverfahren) des Bilanzierungsprogrammes werden tabellierte Werte entsprechend den gewählten (Verteilsystem) und weiteren, im Gebäude vorhandenen (Wärmebedarf Heizung etc.) Ausprägungen rechnerisch verarbeitet, um letztlich die Höhe der Verteilverluste zu berechnen. Die Verteilverluste werden also nicht „metrisch“ berechnet, sondern mit jeder Änderung einer Parameterausprägung ändert sich die „Klasse des Verteilverlustes“ mehr oder minder stark sprunghaft. Die Sprünge ergeben sich aus dem Zusammenwirken aller in das Berechnungsverfahren eingehenden Parameter und sind nicht immer ähnlich groß. Das wird für die hier untersuchten Gebäude in den Ergebnissen der

²⁶ Hierfür hätten auch Annahmen getroffen werden müssen, die zu deutlich höheren Verlusten (Heizzentralen, Nahwärmesysteme) führen und solche, die zu deutlich geringeren Verlusten (neubauartige Dämmstandards und Systemtemperaturen, Wegfall von Zirkulationsleitungen im Warmwassersystem) führen.

Verteilverluste der Ausprägungen „mittel“ und „hoch“ deutlich. Die genaue Ursache der deutlich verschiedenen Sprünge wurde nicht erforscht. Vermutlich liegt sie in der Abstufung der in den Tabellen des normativen Algorithmus für die verschiedenen Wärmebedarfe Heizung hinterlegten Größen begründet.

Tabelle 3: Annahmen zur Berechnung der technischen Verteilverluste der untersuchten Gebäude

Verteilverluste		gering	mittel	hoch
Wärmeerzeuger für Heizwärme und Warmwasser		Erdgas-Niedertemperaturkessel 70/55°C, außerhalb der thermischen Hülle, Baualtersklasse 1987-1994 für Heizwärme und Warmwasser, keine Wärmespeicher		
Heizwärme	Verteilsystem	horizontale Verteilung außerhalb der thermischen Hülle, vertikale Verteilung innen, 70/55°C, unregelmäßige Pumpe		horizontale Verteilung außerhalb der thermischen Hülle, vertikale Verteilung außen, 70/55°C, unregelmäßige Pumpe
	Baualtersklasse des Verteilsystems	80er und 90er Jahre	50er bis 70er Jahre, nachträglich gedämmt	50er bis 70er Jahre
	Betriebsweise	typischer Betrieb (erhöhte Heizkurve, ohne hydraulischen Abgleich)		
	Übergabe	Thermostatventile, Proportionalbereich 2K		
Warmwasser	Verteilsystem	mit Zirkulation, horizontale Verteilung innerhalb der thermischen Hülle, Stichleitungen je Raum		mit Zirkulation, horizontale Verteilung außerhalb der thermischen Hülle, Stichleitungen je Raum
	Baualtersklasse des Verteilsystems	80er und 90er Jahre	50er bis 70er Jahre, nachträglich gedämmt	50er bis 70er Jahre

Auch wenn an dieser Stelle nur eine Variation der Parameter der technischen Verteilsysteme vorgesehen ist, sind dennoch in Tabelle 3 die in den Berechnungen angesetzten Ausprägungen zum Wärmeerzeuger, zur Betriebsweise und zur Heizungs-Wärmeübergabe angegeben. Damit soll auf weitere variierbare technische Einflussgrößen²⁷, die sich auf die berechneten Bedarfe der untersuchten Gebäude auswirken, zumindest hingewiesen werden.

Zur Abbildung geringer, mittlerer bzw. hoher Verteilverluste werden nun das Alter der Verteilsysteme und die Lage variiert. In der Variante mit geringen Verteilverlusten wird als Alter der Verteilsysteme für Heizung und Warmwasser „80er und 90er Jahre“ angesetzt und damit ein vergleichsweise hoher Dämmstandard der Verteilleitungen gewählt. Für die Lage der vertikalen Verteilleitungen wird „innen“ angenommen, für die Lage der horizontalen Verteilleitungen für Heizung „außen“ und für Warmwasser²⁸ „innen“. Zur Berechnung „mittlerer“ Verteilverluste werden die Dämmstandards beider Verteilsysteme um eine, im Bilanzierungsprogramm wählbare, Stufe verschlechtert. Diese Dämmstandards werden durch die ältere Baualtersklasse „50er bis 70er Jahre mit

²⁷ Für weitere Untersuchungen zu Rebound-Effekten sind beim Vergleich verschiedener Wärmeversorgungs- und Gebäudetypen auch die Wirkungen zusätzlicher Wärmeerzeuger (z.B. Holzeinzelöfen), von Umweltwärme (z.B. Solarthermie) und Lüftungsanlagen auf den Wärmebedarf zu beachten. Solche Systeme kommen in den hier untersuchten Gebäuden jedoch nicht vor.

²⁸ Die Annahme „außen“ für die horizontalen Verteilleitungen steht für die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung der gemeinsamen Heizzentrale im Keller eines der beiden Gebäude. Für das Warmwassersystem wird abweichend „innen“ angesetzt, um die Bandbreite zwischen „geringen“ und „hohen“ Verteilverlusten etwas zu vergrößern. Für „hohe“ Verteilverluste wird die Lage dann auch mit „außen“ angenommen.

nachträglicher Dämmung“ abgebildet. Eine weitere Stufe der Verschlechterung der Dämmstandards führt dann zu „hohen“ Verteilverlusten. Dort wird gegenüber „mittleren“ Verteilverlusten noch auf die nachträgliche Dämmung verzichtet. Erst für „hohe“ Verteilverluste wird auch für das Warmwasser-Verteilsystem – wirklichkeitsnah – ein „außen“ liegendes horizontales Verteilsystem angenommen. Dadurch soll die Bandbreite zwischen „geringen“ und „hohen“ Verteilverlusten etwas vergrößert werden. Die Annahme kann auch als Versuch der Berücksichtigung der Länge²⁹ des Verteilsystems verstanden werden. Sie kann im Tabellenverfahren nicht variiert werden und ist für die untersuchten Gebäude auch nicht bekannt.

Bei sonst gleichen Randbedingungen ergeben sich gegenüber Berechnungsvarianten mit „geringen“ Verteilverlusten zusätzlich 21...24 kWh/m²a für die Varianten mit „mittleren“ Verteilverlusten und 28...41 kWh/m²a für die Varianten mit „hohen“ Verteilverlusten. Abweichungen der technischen Verteilverluste sind gänzlich vom Nutzer unabhängig. Sie entsprechen etwa der Größe, die für die Abweichungen durch die verschiedenen Luftwechselraten ermittelt wurden.

Für den heutigen energetisch (teil-)modernisierten Gesamt-Gebäudebestand darf vermutet werden, dass die Dämmstandards der Gebäudehülle und die Dämmstandards der Verteilsysteme schlecht korrelieren. Technische Verteilverluste können auch in Gebäuden mit hohem Dämmstandard der Gebäudehülle in den hier ermittelten Größen bzw. auch darüber liegenden Kennwerten auftreten, wenn bei der energetischen Modernisierung des Gebäudes die Verteilsysteme (noch) nicht modernisiert wurden. Die Datenlage hierzu ist unbefriedigend. Der Einfluss ist aber für Studien zu Rebound-Effekten relevant.

3.2.3 Gesamtwirkung der variierten Parameter – Untersuchungsjahr 2019

In Abbildung 4 sind nun alle 27 Varianten des Endenergiebedarfs für das Jahr 2019 dargestellt, deren Kennwerte in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Jede Variante wird dort durch zwei Marker dargestellt – einen Querstrich für die Luftwechselrate und einen Kreis für die Verteilverluste. Die in Abschnitt 3.2.1 als normnah unter Verwendung des Lokalklimas berechnete Variante (grün gefüllter Kreis) ist hier mit einem Endenergiekennwert von 227 kWh/m²a enthalten. Die drei Parameter sind hierbei als „mittel“ (Raumsolltemperatur, technische Verteilverluste) bzw. „Norm“ (Luftwechselrate) angesetzt. Die Bandbreite der Kennwerte aller für 2019 berechneten Varianten reicht von 146 bis 298 kWh/m²a. Diesen Varianten gegenübergestellt sind der normnah mit Standardklima berechnete Bedarf und die gemessenen, nicht angepasste Verbräuche. Da die Raumtemperaturen nicht bekannt sind, unter denen die Verbräuche zustande gekommen sind, sind die Verbrauchsmesswerte hier als gepunktete Linien eingezeichnet.

²⁹ Die Länge der Verteilsysteme ist ein wichtiger Parameter mit Einfluss auf Bedarf und Verbrauch und so auch in Untersuchungen zu Rebound-Effekten zu berücksichtigen.

Für das Jahr 2019 liegen alle Berechnungsergebnisse der Bedarfe für die hohe Raumsolltemperatur von 21°C über beiden Messwerten des Energieverbrauchs. Davon ausgehend, dass alle weiteren variierten bzw. fest angenommenen Parameter zutreffend wären, könnte geschlussfolgert werden, dass die Raumsolltemperatur in den Gebäuden wohl eher im Bereich 17 bis 19°C liegen dürfte. Die besten Übereinstimmungen zwischen Bedarfen und Verbräuchen ergeben sich hier für Varianten mit geringer Raumsolltemperatur und mittleren bis hohen Luftwechselraten und Verteilverlusten und für Varianten mit mittlerer Raumsolltemperatur mit geringen (bis mittleren³⁰) Luftwechselraten und Verteilverlusten.

Zwei wesentliche Aspekte sollen zur Einordnung der Erkenntnisse dieser Gegenüberstellung erwähnt werden. Im Beispiel können gute Übereinstimmungen zwischen Bedarf und Verbrauch erzielt werden in Fällen, in denen das Nutzerverhalten eher positiv bis durchschnittlich angesehen wird (dann mit mittleren technischen Verteilverlusten). Daraus sollte jedoch nicht voreilig der Schluss gezogen werden, dass das auch so ist. Die Berechnungen wurden unter einer ganzen Reihe von weiteren Annahmen durchgeführt, die für alle Varianten unverändert zum Ansatz gekommen sind. Insbesondere die Annahmen zum Wärmeschutz und den Bauteilflächen der Gebäudehülle wirken sich auf die Höhe der berechneten Energiekennwerte aus. Eine nutzerunabhängige Verschiebung aller Ergebnisse nach oben oder nach unten ist also denkbar, wenn diese weiteren Annahmen nicht exakt zutreffen. Dann würde sich das Feld mit einer guten Übereinstimmung zwischen Bedarfen und Verbräuchen in einen anderen Bereich verschieben. Der zweite Aspekt thematisiert das Untersuchungszeitraum. Hier zeigt die anschließende Betrachtung der anderen beiden Untersuchungsjahre, dass bei sonst gleichen Annahmen Unterschiede auch allein durch das Untersuchungsjahr möglich sind.

³⁰ In einem der beiden Gebäude wird eine gute Übereinstimmung bei mittlerer Raumsolltemperatur nur für eine geringe Luftwechselrate und geringe Verteilverluste erzielt.

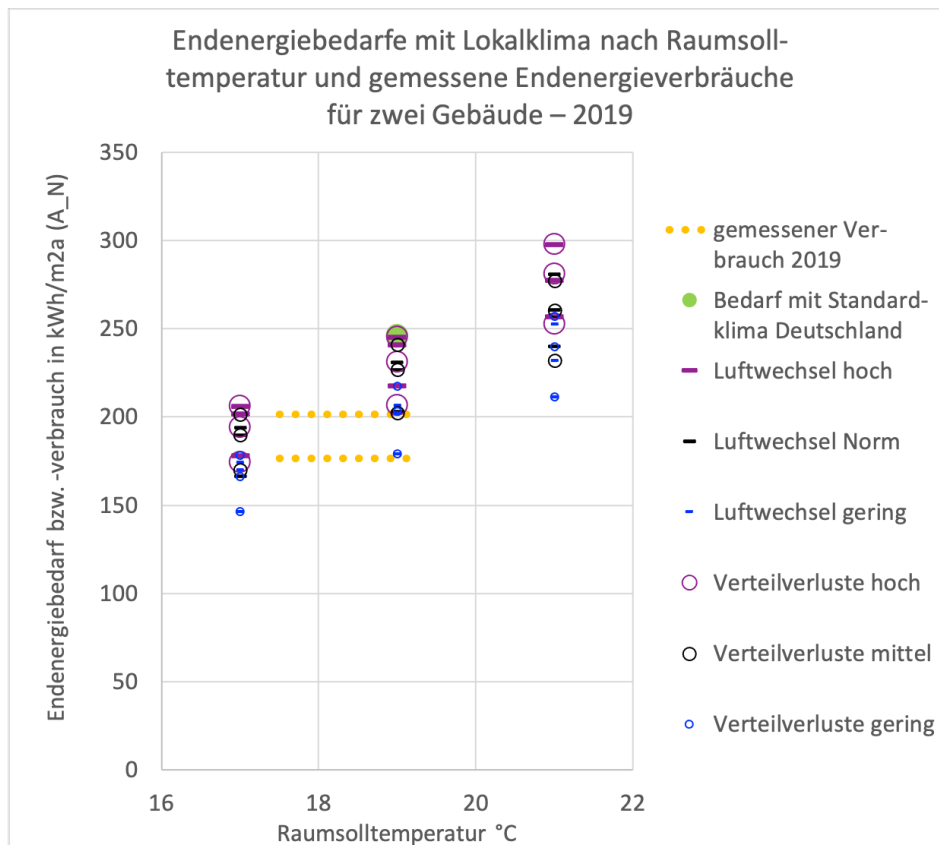


Abbildung 4: Gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe für das Jahr 2019

3.2.4 Gesamtwirkung der variierten Parameter – Untersuchungsjahre 2020 und 2021

In Tabelle 4 sind nun die Berechnungsergebnisse für die weiteren Untersuchungsjahre zusammengestellt. Ausgehend von dem „mittleren“ Untersuchungsjahr 2019 ist 2020 das vergleichsweise „wärmste“ der drei Jahre. Die berechneten Endenergiekennwerte sind 9...13 kWh/m²a kleiner als für 2019 berechnet. Demgegenüber ist das Jahr 2021 das vergleichsweise „kälteste“ Jahr. Die berechneten Kennwerte sind 21...29 kWh/m²a größer als für 2019 berechnet.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse innerhalb des jeweiligen Untersuchungsjahres bei Variation eines Parameters unter sonst gleichen Randbedingungen führt zu ganz ähnlichen Ergebnissen wie für das Jahr 2019. Erwähnenswert erscheint hier lediglich, dass im kalten Jahr 2021 der Einfluss der Luftwechselrate größer ist und damit die Bedeutung gegenüber den technischen Verteilverlusten etwas höher einzuordnen ist.

Tabelle 4: Endenergiebedarfe mit Lokalklima für die Jahre 2020 und 2021 und Variation von Raumtemperatur, Luftwechselrate sowie technischen Verteilverlusten**Untersuchungsjahr 2020**

Raumsolltemperatur		Luftwechselrate		
		gering	Norm	hoch
gering	tVv gering	137	155	166
	tVv mittel	160	179	190
	tVv hoch	165	183	194
mittel	tVv gering	168	191	205
	tVv mittel	192	215	228
	tVv hoch	196	219	233
hoch	tVv gering	202	230	247
	tVv mittel	223	251	268
	tVv hoch	243	271	288

tVv - technische Verteilverluste

Ceteris-paribus-Betrachtung der Bedarfe bei Änderung der Raumtemperatur, Luftwechselrate bzw. technischen Verteilverluste

Raumtemperatur mittel – gering: 31 ... 39 kWh/m²aRaumtemperatur hoch – gering: 62 ... 94 kWh/m²aLuftwechselrate mittel – gering: 18 ... 28 kWh/m²aLuftwechselrate hoch – gering: 30 ... 45 kWh/m²atechn. Verteilverluste mittel – gering: 21 ... 24 kWh/m²atechn. Verteilverluste hoch – gering: 28 ... 41 kWh/m²a**Untersuchungsjahr 2021**

Raumsolltemperatur		Luftwechselrate		
		gering	Norm	hoch
gering	tVv gering	168	191	204
	tVv mittel	192	214	227
	tVv hoch	196	218	232
mittel	tVv gering	200	227	243
	tVv mittel	224	250	266
	tVv hoch	228	255	271
hoch	tVv gering	235	267	286
	tVv mittel	256	287	306
	tVv hoch	276	308	327

tVv - technische Verteilverluste

Ceteris-paribus-Betrachtung der Bedarfe bei Änderung der Raumtemperatur, Luftwechselrate bzw. technischen Verteilverluste

Raumtemperatur mittel – gering: 32 ... 39 kWh/m²aRaumtemperatur hoch – gering: 64 ... 95 kWh/m²aLuftwechselrate mittel – gering: 22 ... 32 kWh/m²aLuftwechselrate hoch – gering: 35 ... 51 kWh/m²atechn. Verteilverluste mittel – gering: 21 ... 24 kWh/m²atechn. Verteilverluste hoch – gering: 28 ... 41 kWh/m²a

In Abbildung 5 sind wiederum die berechneten Bedarfe den gemessenen Verbräuchen gegenübergestellt, nun für die Jahre 2020 und 2021. Für 2021 ergibt sich qualitativ ein ganz ähnliches Bild wie zuvor für 2019. Bedarfe und Verbräuche liegen – dem kälteren Jahr entsprechend – etwas höher. Für das Jahr 2020 gestaltet sich die Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen allerdings etwas anders. Zwar sind die berechneten Bedarfe in diesem wärmeren Jahr erwartungsgemäß etwas geringer als für 2019. Jedoch sind die gemessenen Verbräuche deutlich geringer. Alle Bedarfsvarianten mit der hohen und fast alle Varianten mit der mittleren Raumsolltemperatur liefern Kennwerte, die höher sind als die gemessenen Verbräuche. Lediglich für ein Gebäude liefert die eine Variante mit geringer Luftwechselrate und geringen technischen Verteilverlusten bei mittlerer Raumsolltemperatur einen Bedarfskennwert, der in Bereich des gemessenen Verbrauchs liegt. Würden nur für dieses eine Jahr Verbrauchswerte vorliegen, könnte man geneigt sein, die Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen dahingehend zu interpretieren, das Nutzerverhalten positiv einzuordnen, da die beste Übereinstimmung für Varianten mit geringer Raumsolltemperatur und eher mittlerer Luftwechselrate gefunden wird. Es gilt aber weiterhin das oben bereits erwähnte: Bei Variation weiterer, nutzerunabhängiger Parameter könnte sich das Feld der guten Übereinstimmung zwischen Bedarfen und Verbräuchen nach oben oder unten verschieben.

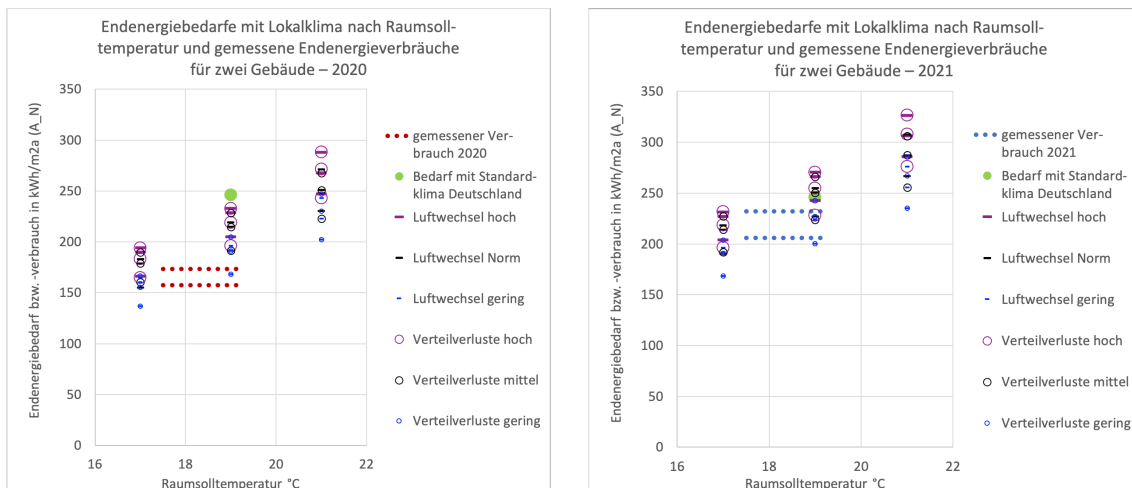


Abbildung 5: Gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe für die Jahre 2020 und 2021

3.2.5 Gesamtwirkung der variierten Parameter – alle drei Untersuchungsjahre

Wenn nun in Abbildung 6 die Bedarfe und Verbräuche aller drei Untersuchungsjahre in einer Grafik dargestellt werden, sind keine bahnbrechend neuen Erkenntnisse mehr zu erwarten. Die Grafik veranschaulicht aber gut, dass es vielfältige nutzerabhängige wie nutzerunabhängige Einflüsse gibt, die auf die Größe sowohl des berechneten Energiebedarfes als auch des gemessenen Energieverbrauches wirken. Die gemessenen, vom Lokalklima abhängigen Verbrauchskennwerte der zwei nahezu identischen Gebäude liegen im Bereich 158...232 kWh/m²a. Die Bandbreite der berechneten Bedarfe ist mit 137...327 kWh/m²a deutlich größer. In der Bedarfsberechnung ist der Nutzereinfluss variiert worden, für die Verbräuche liegen keine Informationen zum Nutzerverhalten vor. Es ist also denkbar und möglich, dass die Abweichungen allein durch das Lokalklima und technische Parameter der Gebäude, also vollständig nutzerunabhängig zustande gekommen sind.

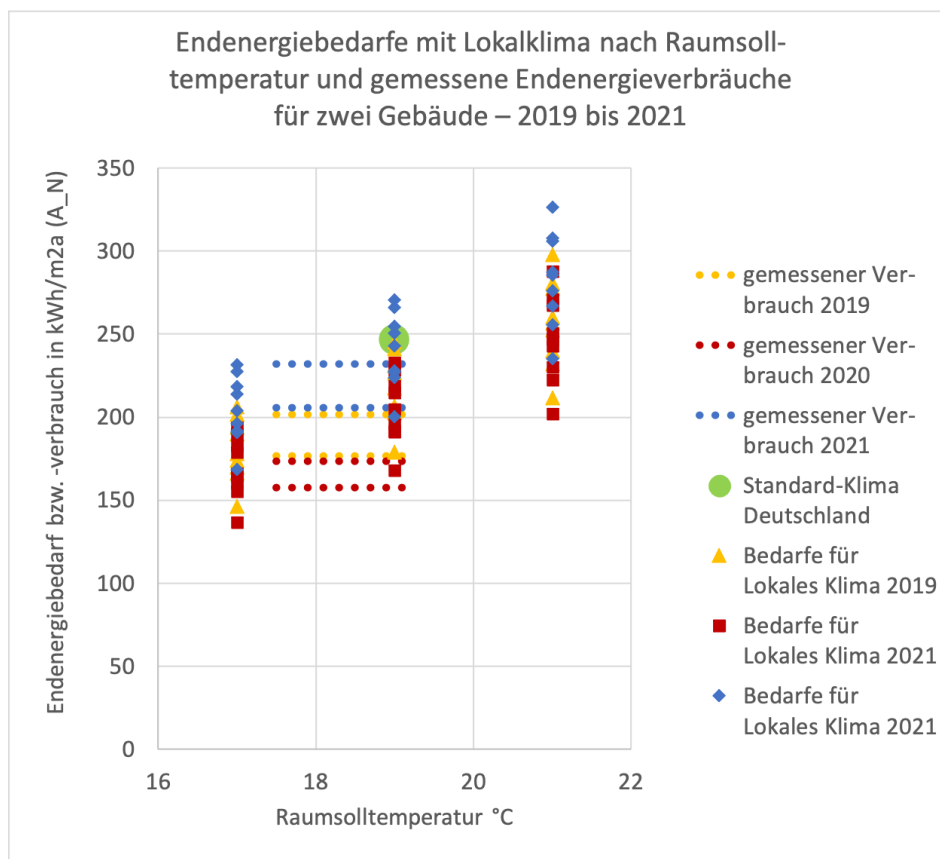


Abbildung 6: Gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe für die Jahre 2019, 2020 und 2021

3.2.6 Fazit aus den stationären Berechnungen und Ausblick auf die quasi-stationären Berechnungen

Fazit

In Kapitel 3 sind für zwei nahezu identische, energetisch nicht modernisierte Beispielgebäude gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe betrachtet worden. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich schlaglichtartig wie folgt zusammenfassen:

- Die Anpassung gemessener Verbräuche an den Bedarf nach Standardklima (öffentlich-rechtlicher Nachweis nach EnEV bzw. GEG) unter Verwendung von Klimafaktoren berücksichtigt zwar das Lokalklima als einzigen Einflussfaktor auf den Verbrauch. Ob diese Faktoren zur Anpassung für alle energetischen Gebäudestandards als zielführend angesehen werden können, bleibt offen. Die nach Anpassung verbleibende Lücke zwischen Bedarf und Verbrauch beinhaltet sowohl nutzerabhängige als auch nutzerunabhängige Einflüsse. Wie stark welche Einflüsse wirken, kann mit dieser Methode nicht weiter untersucht werden. Eine Fokussierung auf den nutzerabhängigen Anteil und damit auf Rebound-Effekte ist nicht möglich.

- Für die Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen zur Betrachtung von Rebound-Effekten ist eine Bedarfsberechnung unter Verwendung des Lokalklimas ein erster notwendiger Schritt. Der so berechnete Bedarf wird dem gemessenen, nicht angepassten Verbrauch gegenübergestellt. Die weiteren Einflussgrößen können anhand vorliegender Daten in der Bedarfsberechnung angepasst und dementsprechend der Versuch einer schrittweisen Annäherung an einen wirklichkeitsnahen Bedarf vorgenommen werden.
- Die Variation nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Parameter in der Bandbreite praktischer möglicher Ausprägungen liefert Hinweise zum möglichen Einzeleinfluss eines jeden Parameters auf den berechneten Bedarf. Die so bestimmten Einflüsse sind gebäudeindividuell und damit nicht allgemein übertragbar. Im untersuchten Beispiel wurde neben den nutzerabhängigen Parametern Raumtemperatur und Luftwechselrate auch die technischen Verteilverluste als nutzerunabhängiger Parameter variiert. Auf die Variation des Wärmeschutzes der Gebäudehülle und des Wärmeerzeugers konnte wegen der (praktisch außergewöhnlich) hinreichend guten Datenlage verzichtet werden. Alle untersuchten nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Parameter beeinflussen den berechneten Bedarf deutlich. Außerhalb des Beispiels würden auch die weiteren wesentlichen nutzerunabhängigen Parameter (Wärmeschutz und Flächen der Gebäudehülle, Wärmeerzeugung) ähnlich deutlich wirken. Es gibt also vielfältige, gebäudeindividuelle Einflüsse auf die Höhe des berechneten Energiebedarfes. Am Beispiel konnte gezeigt werden, dass für die meisten dieser Einflüsse zu wenige Informationen vorliegen, um die Bandbreite möglicher Ausprägungen eng zu halten. Das erschwert die Trennung nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Einflüsse und damit die Beschreibung bzw. gar die Quantifizierung von Rebound-Effekten.
- Die Verbräuche der zwei untersuchten, quasi identischen Gebäude sind verschieden. Ob diese Unterschiede nutzerabhängig und/oder nutzerunabhängig zustande gekommen sind, kann mit den vorliegenden Daten nicht geklärt werden. Die unterschiedlichen Verbräuche zeigen aber auch, dass es nicht angebracht erscheint, aus der für einzelne Varianten ablesbaren, guten Übereinstimmung zwischen Bedarf und Verbrauch ableiten zu wollen, dass die dort getroffenen Annahmen zu Raumtemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten „zutreffend“ wären. Der Versuch solcher Rückschlüsse würde zwischen den beiden Gebäuden zu verschiedenen, als „zutreffend“ angesehen Annahmen führen. Je nach Untersuchungsjahr ergäben sich für beide Gebäude wieder andere, als „zutreffend“ angesehene Annahmen.
- Obwohl die stationäre Energiebilanzierung zur Bereitstellung eines Erwartungswertes des Energieverbrauchs (berechneter Energiebedarf) bereits eine aufwendige Methode darstellt, verbleiben Unsicherheiten in der Nachbildung der

energetischen Zusammenhänge im Gebäude. Art, Umfang und Qualität der praktisch vorliegenden Daten lassen mit dieser Methode nicht zu, die nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Einzeleinflüsse auf den Rebound-Effekt zu quantifizieren.

Ausblick

In Kapitel 3 wurden mit der Raumsolltemperatur und der Luftwechselrate zwei wesentliche nutzerabhängige Parameter hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Endenergiebedarf untersucht. Daneben gibt es natürlich noch weitere nutzerabhängige Parameter – etwa die Verschattung und die Anwesenheitsdauer in der Wohnung. Deren Wirkungen wurden nur über die normativen Standardannahmen berücksichtigt und nicht variiert.

Die Methode der stationären Energiebilanzierung lässt nur an allen Tagen gleichbleibende Annahmen zu. Die Bedürfnisse des Nutzers stehen hingegen in Wechselwirkung mit der Umgebung. Das Lüftungsverhalten ist beispielsweise außentemperaturabhängig und so mindestens saisonal, oft jedoch auch täglich, verschieden. Aber auch die Raumtemperatur, die in den vorangegangenen Betrachtungen (der Methode geschuldet) als synonym zur Raumsolltemperatur angesehen werden musste, ist keine rein vom Nutzer abhängige Größe. Die starken Wechselwirkungen zwischen Wärmeschutz, Anlagenbetrieb und Nutzer und deren Auswirkungen auf die Raumtemperatur sollen im folgenden Kapitel beleuchtet werden. So soll auch für künftige Studien zu Rebound-Effekten sensibilisiert werden, Temperaturmesswerte³¹ – insbesondere höhere Raumtemperaturen in Gebäuden mit höheren Energiestandards – nicht automatisch und vollständig dem Nutzer zuzuordnen. An dieser Stelle darf vorweggenommen werden, dass es nach energetischer Modernisierung auch bei identischem Nutzerverhalten zu mitunter deutlich höheren Temperaturen kommen kann.

³¹ Auf die vielfältigen Schwierigkeiten der Temperaturmessung kann hier nicht eingegangen werden. Klar ist aber, dass es von zeitlich und örtlich punktuellen Messungen über Nutzerbefragungen zur „üblichen“ Temperatur, dauerhafte Messungen an Messpunkten mit und ohne direkte Sonneneinstrahlung, bis hin zu Betriebsmesstechnik sehr verschiedene Messungen mit unterschiedlicher Zielsetzung und Aussagekraft gibt.

4 Quasi-stationäre Energiebilanzierung – Einflüsse des Wärmeschutzes, des Anlagenbetriebes und des Nutzers auf die Raumtemperatur

Die für dieses Kapitel gewählte Methode einer quasi-stationären Energiebilanzierung eignet sich zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Wärmeschutz, Anlagentechnik und Nutzer und deren Auswirkungen auf die Raumtemperatur. Die Betrachtung soll dem besseren Verständnis der Bedeutung nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Einflüsse auf die Raumtemperatur dienen. Bereits in Kapitel 3 wurde die Raumtemperatur als ein sehr stark auf den Energiebedarf – und praktisch auch auf den -verbrauch – wirkender Parameter identifiziert. Bisher wird die Raumtemperatur in Studien zu Rebound-Effekten als allein nutzerabhängig angesehen und höhere Temperaturen nach energetischer Modernisierung als höherer Komfortanspruch und damit als nutzerbedingter Rebound-Effekt beschrieben. Dabei ist augenscheinlich klar, dass – auch bei identischem Verhalten des Nutzers und unverändertem Anlagenbetrieb – allein durch den verbesserten baulichen Wärmeschutz einer energetischen Modernisierung die Temperaturen im Gebäude – z.B. bei Abschaltung der Heizung über die Nachtstunden – langsamer absinken als vor der Modernisierung. Die über lange Zeiträume (Heizperiode) gemessenen und zu Mittelwerten zusammengefassten Raumtemperaturen werden bereits aus diesem nutzerunabhängigen Grund nach energetischer Modernisierung ansteigen.

Als Ausgangspunkt für die Raumtemperaturen in Wohnräumen kann zunächst der Nutzer angesehen werden, der für die Aufenthaltszeit einen Temperaturwunsch hat, eine Wohlfühltemperatur, die mindestens einzuhalten ist. Zur Erreichung dieser Temperatur dient das Heizsystem, das – abhängig von den sonstigen aktuellen Wärmegewinnen und -verlusten des Gebäudes – Heizwärme bereitstellt. Die letztlich gemessenen Raumtemperaturen hängen neben dem Temperaturwunsch des Nutzers und dem Wärmeeintrag durch das Heizsystem auch von den weiteren Wärmeeinträgen und den Wärmeverlusten über die Gebäudehülle ab. Der Nutzer stellt also immer nur eine Einflussgröße dar.

In der exemplarischen Betrachtung dieses Kapitels wird das Heizsystem insofern idealisiert abgebildet, als dass immer nur so viel Heizwärme eingesetzt wird, um gerade³² die vom Nutzer gewünschte Temperatur zu erreichen. Diese, vom Nutzer gewünschte und durch den idealisiert angenommenen Heizungsbetrieb gerade erreichte Temperatur wird als Raumsolltemperatur³³ bezeichnet. An wärmeren Tagen der Heizperiode werden an

³² Praktisch wird die Temperatur abhängig von der Regelbarkeit und der Trägheit (insb. Wärmespeicherfähigkeit der Heizkörper bzw. der Bauteile der Fußboden-, Decken-, Wandheizung) des Heizsystems über einen mehr oder minder ausgedehnten Zeitraum mehr oder minder stark überschritten. Je träger die Wärmeübergabe des Heizsystems und je besser der Wärmeschutz der Gebäudehülle, desto stärker wird die gewünschte Temperatur überschritten.

³³ Einige der nachfolgenden Berechnungsbeispiele enthalten Tagesabschnitte mit unterschiedlichen Raumsolltemperaturen (Tag- bzw. Nachtabenkung der Heizung).

solche idealisierten Heizvorgänge auch Zeiträume ohne Heizbetrieb anschließen, in denen weitere Wärmeeinträge insbesondere aus Solarstrahlung größer sind als die momentanen Verluste des Gebäudes. Solche vom Heizungssystem unabhängigen und die momentanen Wärmeverluste des Gebäudes übersteigenden Wärmeeinträge führen dann zu Raumtemperaturen oberhalb Raumsolltemperatur, die ebenfalls vom Nutzer unabhängig sind.

In der Konsequenz sind im Gebäude gemessene Temperaturen neben dem Nutzer weiterhin also auch vom Wärmeschutz der Gebäudehülle und vom Anlagenbetrieb abhängig. Das heißt auch, dass ein Temperaturanstieg nach energetischer Modernisierung eines Gebäudes verschiedene Ursachen hat und sogar vom Nutzerverhalten³⁴ unabhängig sein kann. In den nachfolgenden Betrachtungen werden verschiedene Varianten des Nutzerverhaltens vor und nach energetischer Modernisierung in unveränderter Weise abgebildet. Durch diese Annahmen und die idealisierten Heizvorgänge soll ein Eindruck gewonnen werden, wie stark im Einzelfall Raumtemperaturen nutzerunabhängig ansteigen können. Das ist bei der Beschreibung von Rebound-Effekten von besonderem Interesse.

4.1 Beispielberechnungen mit einer quasi-stationären Energiebilanzierung

4.1.1 Beschreibung des quasi-stationären Energiebilanzierungsverfahrens

Die hier vorgestellten Berechnungen wurden mit einem am IWU Darmstadt entwickelten, modular aufgebauten und in MATLAB® umgesetzten Rechenwerkzeug durchgeführt. Es enthält das Verfahren der Energiebilanzierung nach DIN EN ISO 13790 [Norm 2008]. Es handelt sich um ein quasi-stationäres Stundenverfahren³⁵ als Einzonenmodell³⁶, mit dem Wärmeströme und Temperaturen in Gebäuden im Tagesverlauf betrachtet werden können. Die im Zusammenhang mit dem Nutzer wichtigen Parameter Raumsolltemperatur, Luftwechselrate und Angaben zur Verschattung können im Werkzeug frei gewählt

³⁴ Als Nutzerverhalten werden hier der Temperaturwunsch des Nutzers bzw. die Raumsolltemperatur und die Luftwechselrate verstanden. Der in die Luftwechselrate eingehende, nutzerunabhängige Anteil des Luftwechsels – der Infiltrationsluftwechsel über Undichtigkeiten der Gebäudehülle – besitzt zwar auch eine energetische Wirkung, wird hier aber nicht gesondert thematisiert.

³⁵ In der ingenieurtechnischen Modellbildung werden Betrachtungszeiträume je nach Untersuchungsziel in sehr verschiedenen lange Zeitschritte unterteilt. In energetischen Betrachtungen von Gebäuden werden zur Ermittlung von jährlichen Gesamtenergiebedarfen/-verbräuchen in vielen Fällen stationäre Verfahren benutzt, deren Zeitschritte üblicherweise eine ganze Heizperiode oder Monate umfassen (siehe Kapitel 3). Quasi-stationäre Verfahren haben oft Viertelstunden- oder Stundenzeitschritte, die die Betrachtung von energetischen Aspekten im Tagesverlauf zulassen. Noch feiner aufgeteilte Zeitschritte mit Minuten- bzw. Sekundenzeitschritten in der dynamischen Simulation dienen dann vornehmlich der wissenschaftlich-technischen Betrachtung von Einzelkomponenten von Anlagen und des Gebäudes.

³⁶ Einzonenmodell heißt, dass das gesamte Gebäude im Modell als ein großer Raum angesehen wird, der gleichartig genutzt (beheizt, belüftet, verschattet etc.) wird und mit der Umgebung Wärme austauscht.

werden, ebenso Wärmeeinträge (z.B. aus technischen Verteilverlusten und durch Personen). Näheres zur Umsetzung des Werkzeuges findet sich in [IWU 2017]. Die lokalen Klimarandbedingungen stammen aus Messungen des Deutschen Wetterdienstes. Durch die freie Parametrisierung und die ausreichend hohe zeitliche Auflösung eignet sich das Werkzeug zur Beschreibung von Einzeleinflüssen aus Wärmeschutzstandard der Gebäudehülle, Anlagenbetrieb und Nutzer auf den täglichen Verlauf der Raumtemperatur.

Anmerkung: Es mag wünschenswert erscheinen, hier ein Modell zu verwenden, das eine raumweise Betrachtung anstelle des Einzonenmodells ermöglicht. Denn das Nutzerverhalten bezieht sich auf den Raum, in dem er sich aufhält. In diesem Kapitel des Werkstattberichtes geht es aber darum, ein grundsätzliches Verständnis der Einflüsse auf die Raumtemperatur zu gewinnen. Dafür erscheint es als hinnehmbar, auf die – bei raumweiser Betrachtung in einem Mehrzonenmodell mögliche – Betrachtung der Wärmeströme zwischen den Räumen zu verzichten. Das würde zu einer weiteren Ausdifferenzierung der Ergebnisse führen. Letztlich gehen aber auch aus Betrachtungen mit Mehrzonenmodellen folgende grundsätzliche Aussagen hervor, die an dieser Stelle noch als Eingangsthese formuliert werden:

- Die Zeiträume innerhalb der Heizperiode, in denen die Raumtemperatur über der unveränderten Raumsolltemperatur liegt, nehmen nach energetischer Modernisierung der Gebäudehülle zu.
- Der Wärmeschutzstandard, der Anlagenbetrieb und der Nutzer stehen in Wechselwirkung und haben gemeinsam Einfluss auf die Raumtemperatur.

4.1.2 Annahmen und Randbedingungen zum Beispiel-Mehrfamilienhaus und zum Nutzerverhalten

Bei dem untersuchten Beispielgebäude handelt es sich – abweichend³⁷ von Kapitel 3 – um ein synthetisch gebildetes Mehrfamilienhaus mit drei Vollgeschossen und einer Wohnfläche von $504 \text{ m}^2_{\text{Wohn}}$. Dachgeschoss und Keller sind nicht beheizt. Der Fensterflächenanteil aller vier Fassadenorientierungen beträgt 12%. Das Warmwassersystem bleibt unberücksichtigt. Innere Wärmegewinne werden pauschal mit $2 \text{ W/m}^2_{\text{Wohn}}$ angenommen. Die Heizverteilverluste werden für die Betriebszeiträume der Heizung – und wegen der Vergleichbarkeit der Berechnungsvarianten – unabhängig von der Heizleistung mit $5 \text{ W/m}^2_{\text{Wohn}}$ angesetzt. Die Außentemperatur- und Solarstrahlungsdaten (Stundenwerte) für Görlitz aus dem Jahr 2014. Diese Annahmen zum Gebäude und zum Lokalklima sind den in [IWU 2017] enthaltenen und dokumentierten Berechnungen entnommen.

³⁷ Die quasi-stationären Berechnungen dieses Kapitels wurden bereits zu Beginn des KOSMA-Projektes durchgeführt, als noch nicht klar war, für welche Gebäude Messdaten zur Verfügung gestellt werden können. Das hier untersuchte Gebäude ist etwas kleiner als das in Kapitel 3. Die Gebäudehülle ist in einem energetisch nicht modernisierten Zustand und ist vergleichbar mit der Gebäudehülle der Gebäude in Kapitel 3. Abweichend verfügt es nicht über Wohnungen im Dachgeschoss.

Für den energetischen Zustand der Gebäudehülle vor der Modernisierung werden ungedämmte Hüllbauteile und 2-Scheiben-Isolierglasfenster angenommen. Daraus ergibt sich ein spezifischer Transmissionswärmeverlust H'_T von $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ bezogen auf die Fläche der Gebäudehülle. Das entspricht nach heutiger Auffassung einem energetisch nicht modernisierten Zustand. Nach der Modernisierung wird von einem sehr hohen Dämmstandard der Hüllbauteile und 3-Scheiben-Wärmeschutzfenstern ausgegangen, was dem Standard eines KfW-Effizienzhauses 40 entspricht. Hier ergibt sich für das Beispiel ein H'_T von $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der Einfluss des Nutzerverhaltens soll durch unterschiedliche Annahmen zum Temperaturwunsch und zur Luftwechselrate berücksichtigt werden. Dabei soll der Temperaturwunsch des Nutzers in drei Varianten untersucht werden, die zur gleichen über den Tag gemittelten Raumsolltemperatur führen und damit – rein energetisch-technisch betrachtet – als äquivalent angesehen werden können. Die Luftwechselrate wird in zwei Varianten untersucht.

Für das Nutzerverhalten werden in der Basisvariante ganztags eine Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ und eine Raumsolltemperatur von tagsüber $20 \text{ }^\circ\text{C}$, nachts über den Zeitraum von 6 Stunden $16 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Über den Tag gemittelt ergibt sich eine Raumsolltemperatur von $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Zur Bildung der weiteren Varianten des Nutzerverhaltens werden hinsichtlich der Raumsolltemperatur zwei weitere tägliche Verläufe angenommen, die wiederum zu gemittelten Raumsolltemperaturen von $19 \text{ }^\circ\text{C}$ führen. Zum einen ist das die Annahme einer ganztags konstanten Raumsolltemperatur von $19 \text{ }^\circ\text{C}$, zum anderen ein Tagesverlauf, an dem morgens für drei Stunden und abends für fünf Stunden eine Raumsolltemperatur von $23 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen wird. Dazwischen wird die Temperatur tagsüber und nachts jeweils für acht Stunden auf $17 \text{ }^\circ\text{C}$ abgesenkt. Zur Variation der Luftwechselrate wird anstelle $0,5 \text{ h}^{-1}$ eine Rate von $0,2 \text{ h}^{-1}$ angenommen. Damit ergeben sich 6 Varianten des Nutzerverhaltens.

4.1.3 Raumtemperatur und Raumsolltemperatur

Die Effekte aus dem Zusammenwirken von Wärmeschutz, Anlagenbetrieb und Nutzer werden für das betrachtete Beispielgebäude durch Angabe von Temperaturen, nicht aber durch Angabe von Energiekennwerten quantifiziert. Für eine Gegenüberstellung von Bedarf und Verbrauch fehlen für das synthetische Gebäude ohnehin die Verbrauchswerte vor und nach der energetischen Modernisierung. Aber auch die Angabe absoluter bzw. relativer Energieeinsparungen auf Basis berechneter Energiekennwerte wäre nur bedingt hilfreich, da sie zunächst nur für das untersuchte Einzelgebäude mit den individuell gewählten Ausprägungen der weiteren Parameter (Kubatur, Wärmeschutz und Wärmespeicherfähigkeit des Baukörpers, Anlagentechnik und Lokalklima) gelten. Mit der sich jeweils einstellenden mittleren Raumtemperatur der Heizperiode vor und nach

energetischer Modernisierung liegt dennoch eine wertvolle Größe vor, die zur Einordnung von Rebound-Effekten dienlich ist.

Der Fokus der Betrachtung liegt auf der als Eingangsparameter vorgegebenen, dem Temperaturwunsch des Nutzers entsprechenden Raumsolltemperatur und der sich – abhängig von den weiteren Parametern – rechnerisch ergebenden Raumtemperatur. Es gilt zu beachten, dass die mit dem Nutzer bzw. dem Nutzerverhalten in bisherigen Studien besonders stark in Verbindung gebrachte Raumtemperatur erst als Ergebnis aus der Berechnung hervorgeht. Das unterscheidet die hier angestellte Betrachtung von der üblichen Vorgehensweise bei der Erklärung von Rebound-Effekten im Rahmen von Bedarfs-Verbrauchs-Abgleichen, bei der Raumsolltemperatur und Raumtemperatur (stillschweigend) synonym verwendet werden. Das Missverständnis entsteht in bisherigen Studien zu Rebound-Effekten an der Stelle, an der die Raumtemperatur als allein nutzerabhängiger Parameter³⁸ in die Betrachtungen eingeht. Die nachfolgenden Berechnungsergebnisse für ein Mehrfamilienhaus werden zeigen, dass die Raumtemperatur nach energetischer Modernisierung durchaus ansteigt. Gezeigt wird aber eben auch, dass sich wegen des Anstiegs der Raumtemperatur Rebound-Effekte nach energetischer Modernisierung auch dann einstellen, wenn das Nutzerverhalten (Temperaturwunsch und Luftwechselrate) exakt wie vor der Modernisierung angenommen wird.

4.2 Berechnungsergebnisse der quasi-stationären Energiebilanzierung für das Beispiel-Mehrfamilienhaus

4.2.1 Nutzerunabhängiger Anstieg der Raumtemperatur über die Raumsolltemperatur

Die energetische Modernisierung des Beispielgebäudes dieser Betrachtung besteht allein aus der Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle (s. Abschnitt 4.1.2). Gleichzeitig bleiben die Anlagenkomponenten einschließlich Steuerung und Regelung und auch das Nutzerverhalten in den jeweiligen Varianten für beide Zustände des Wärmeschutzes der Gebäudehülle vor und nach energetischer Modernisierung unverändert. Betrachtet wird zunächst die Basisvariante mit einem Temperaturwunsch tagsüber von 20 °C und nachts einer sechsständigen Temperaturabsenkung auf 16 °C (mittlere Raumsolltemperatur 19 °C). Die Luftwechselrate wird mit 0,5 h⁻¹ angenommen.

³⁸ Die Verwendung der Raumtemperatur in der stationären Energiebilanzierung zur Erklärung der Höhe des Energiebedarfs ist an sich richtig. Die Raumtemperatur als allein nutzerabhängig anzusehen, ist jedoch falsch.

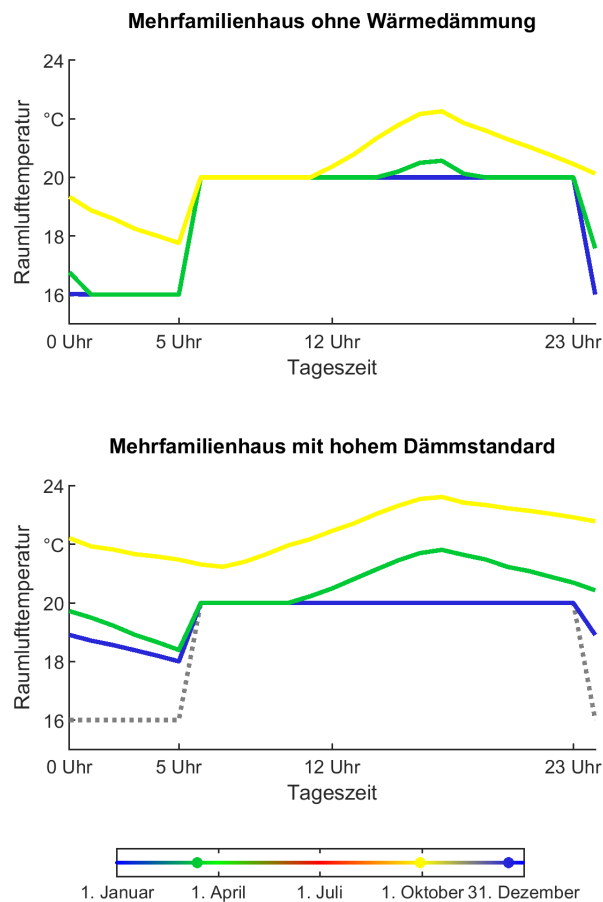


Abbildung 7: Raum- und Raumsolltemperatur vor und nach Modernisierung im täglichen Verlauf

Abbildung 7 zeigt die täglichen Verläufe der Raumsolltemperatur und der Raumtemperaturen für drei markante Tage der Heizperiode vor und nach energetischer Modernisierung. Es ist unmittelbar zu erkennen, dass die Raumtemperatur nach Modernisierung bei hohem Dämmstandard gegenüber der Raumsolltemperatur generell deutlich ansteigt. Drei Effekte führen zur Erhöhung der mittleren Raumtemperaturen, die jeweils nutzerunabhängig sind und allein durch die Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle (Dämmstandard) begründet sind:

- **Die Raumtemperatur sinkt bei hohem Dämmstandard wegen des geringeren Transmissionswärmeverlustes** über die Gebäudehülle **deutlich langsamer ab**. Das ist in Abbildung 7 für alle abgebildeten Tage für den hohen Dämmstandard an den flacher abfallenden Temperaturverläufen zu erkennen. Selbst an kalten Tagen liegt die Raumtemperatur nachts bei Nachtabsenkung der Heizung oberhalb der Raumsolltemperatur des Absenkbetriebes (siehe blauer Temperaturverlauf in Abbildung 7 unten für einen kalten Wintertag). Vor der Modernisierung liefert das Heizsystem an kalten Wintertagen über lange Zeiträume

genau soviel Wärme, dass die Raumsolltemperatur gerade erreicht wird³⁹ (siehe blauer Verlauf in Abbildung 7 oben).

- **Innere und solare Wärmegewinne übersteigen bei hohem Dämmstandard die momentanen Wärmeverluste des Gebäudes an Winter- und Übergangstagen viel häufiger. In diesen Zeiträumen steigt die Raumtemperatur dann tagsüber über die Raumsolltemperatur, ohne dass Heizwärme zugeführt wird.** Solche Zeiträume mit steigenden Raumtemperaturen oberhalb der Raumsolltemperatur sind in Abbildung 7 gut ablesbar anhand des grünen Temperaturverlaufs für einen Tag am Frühlingsbeginn sowie anhand des gelben Verlaufs für den Herbstbeginn.
- **Die Dauer der Heizperiode wird durch die energetische Modernisierung der Gebäudehülle verkürzt.** An Tagen, an denen vor Modernisierung geheizt werden musste, wird nach energetischer Modernisierung (bei hohem Dämmstandard) nicht mehr geheizt (gelber Temperaturverlauf – nach Modernisierung ganztags Raumtemperatur höher als Raumsolltemperatur). Die Temperatur sinkt nachts dann so langsam ab, dass morgens am Ende der Nachtabsenkung noch ein „Temperaturpuffer“ vorhanden ist. Kurze Zeit später sind im abgebildeten Beispieltag die Gewinne größer als die Verluste, die Temperatur steigt weiter an.

4.2.2 Mittlere Raumtemperatur während der Heizperiode für die Basisvariante

Im untersuchten Beispiel wird immer von einer mittleren Raumsolltemperatur von 19 °C ausgegangen, die sich in der Basisvariante im Tagesmittel aus tagsüber 20 °C und nachts (6 Stunden) 16 °C ergibt. Um die Temperaturangaben vergleichbar zu halten, wird die Dauer der Heizperiode hier für die Basisvariante des Nutzerverhaltens und später auch für alle weiteren Varianten festgelegt auf 185 Tage (grauer Bereich in Abbildung 8). Für jeden Tag der Heizperiode wird die mittlere Raumtemperatur als Mittelwert aus den berechneten Stundenwerten der Raumtemperatur des Tages gebildet. Die mittlere Raumtemperatur während der Heizperiode ergibt sich aus den Tagesmittelwerten der Raumtemperatur der 185 Tage der Heizperiode.

³⁹ gemäß der Annahme des idealisierten Heizbetriebes (s. Beginn von Kapitel 4)

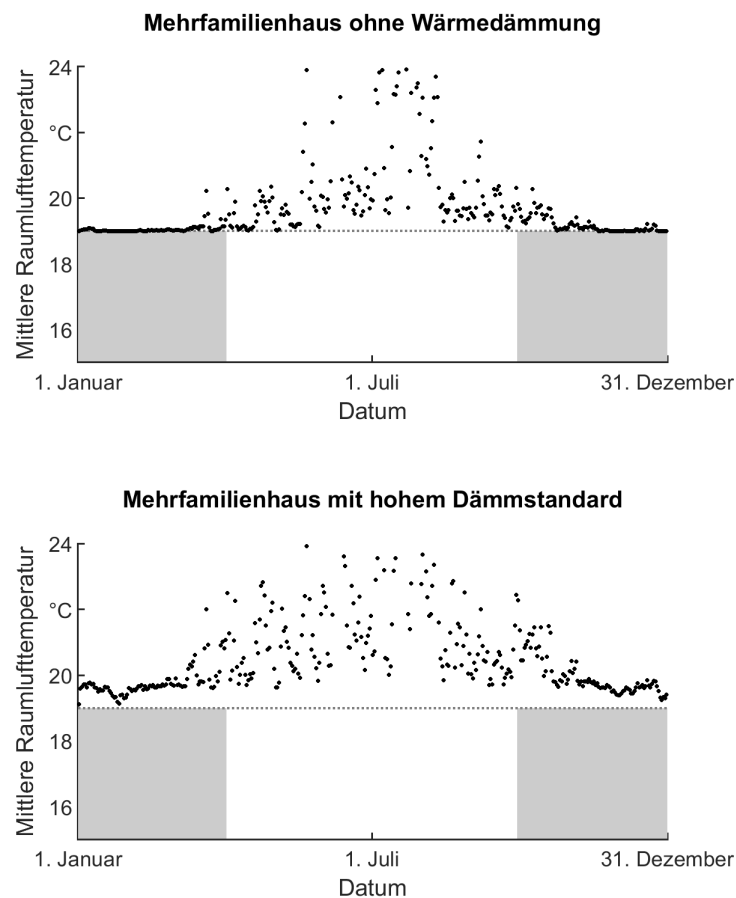


Abbildung 8: Tagesmittelwerte der Raumtemperatur vor und nach Modernisierung im Jahresverlauf

Während vor Modernisierung (Abbildung 8 oben) die mittlere Raumtemperatur nur an einigen Tagen der Übergangszeit etwas höher liegt als die mittlere Raumsolltemperatur von 19 °C, übersteigt sie nach Modernisierung (Abbildung 8 unten) an fast allen Tagen deutlich diesen Wert. Über die gesamte Heizperiode gemittelt steigt Raumtemperatur in der Basisvariante – wohlgermerkt bei identischem Nutzerverhalten – von 19,1 °C auf 19,9 °C an.

4.2.3 Mittlere Raumtemperaturen für die weitere Variation der Nutzungsparameter

Raumsolltemperatur im Tagesverlauf

Während in der Basisvariante ein typischer Fall für die Nachabsenkung der Heizung abgebildet wird, soll nun betrachtet werden, welche Auswirkungen eine konstante Raumsolltemperatur von 19 °C bzw. ein Tagesgang mit Tag- und Nachabsenkung haben, für den sich im Mittel ebenfalls 19 °C ergeben.

Den Fall mit der über den gesamten Tag konstanten Temperatur von 19 °C kann man als typisch ansehen für Nutzer, die tagsüber die Raumtemperatur bewusst gering halten

bzw. keine hohen Temperaturanforderungen haben und gleichzeitig nachts indifferent gegenüber möglichen Energieeinsparungen sind und ihre Heizung nicht absenken.

Im Fall des Tagesganges mit Tag- und Nachtabenkung wird morgens von 6 bis 9 Uhr und abends von 17 bis 22 Uhr von einer Raumsolltemperatur von 23 °C und in den Zeiträumen dazwischen (Absenkbetrieb) von jeweils 17 °C ausgegangen. Damit wird ein typischer Fall für tagsüber abwesende Nutzer mit dem Wunsch nach einer hohen Temperatur während der Aufenthaltszeit und gleichzeitig bewusst umgesetztem Einsparverhalten abgebildet. In den drei Varianten finden sich also drei verschiedene Nutzertypen wieder, deren Temperaturwünsche – bei allen Unterschieden bzgl. Temperaturhöhe und täglichem Verlauf – im Tagesmittel als energetisch äquivalent angesehen werden können.

Tabelle 5: Mittlere Raumtemperaturen über die Heizperiode für verschiedene Wärmeschutzstandards der Gebäudehülle und Nutzungsparameter

Mittler Raumsolltemperatur (24-h-Mittel)	Mittlere Raumtemperatur über eine Heizperiode von 185 d			
	Luftwechselrate 0,5 1/h		Luftwechselrate 0,2 1/h	
	vor Mod.	nach Mod.	vor Mod.	nach Mod.
ganztags 19°C	19,0°C	19,3°C	19,1°C	19,7°C
tagsüber 20°C, 6 h Nachtabenkung auf 16°C	19,1°C (Basisvariante)	19,9°C (Basisvariante)	19,2°C	20,4°C
morgens und abends 23°C, je 8 h Tag- und Nachtabenkung auf 17°C	19,4°C	21,5°C	19,5°C	22,4°C

Im Fall der ganztags konstanten Raumsolltemperatur fällt gegenüber der Basisvariante der Effekt aus dem Absinken der Raumtemperatur auf die nächtliche Raumsolltemperatur weg. Vor Modernisierung ergibt sich eine über die Heizperiode gemittelte Raumtemperatur von 19,0 °C, nach Modernisierung nimmt sie einen (gegenüber der Basisvariante mit 19,9 °C) deutlich kleineren Wert von 19,3 °C an (s. Tabelle 5). Die Annahme der (gegenüber der Basisvariante) tagsüber geringeren Raumsolltemperatur wirkt sich also stärker auf die mittlere Raumtemperatur aus als die Nachtabenkung.

Offenbar wirkt die höchste, im Tagesverlauf vorkommende Raumsolltemperatur prägend auf die mittlere Raumtemperatur. Dieses Phänomen zeigt sich noch deutlicher für den Fall mit Tag- und Nachtabenkung. Hier ergeben sich die vergleichsweise höchsten mittleren Raumtemperaturen über die Heizperiode mit Werten von 19,4 °C vor bzw. 21,5 °C nach Modernisierung. Die morgens und abends deutlich höheren Raumsolltemperaturen und das vom Wärmeschutz der Gebäudehülle abhängige, mehr oder minder rasche Absinken der Temperatur in den Absenkezeiten führen zum Ansteigen der mittleren Raumtemperaturen.

Verringerte Luftwechselrate

In den weiteren Varianten wird die bisher angesetzte Luftwechselrate ganztags von $0,5 \text{ h}^{-1}$ auf $0,2 \text{ h}^{-1}$ reduziert (s. Tabelle 5 rechts). Die Reduktion der Luftwechselrate kann als ein wenig lüftender Nutzertyp verstanden werden oder aber als Nutzung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung⁴⁰. Für beide Fälle kann die kleinere Luftwechselrate von $0,2 \text{ h}^{-1}$ als typisch gelten. Energetisch betrachtet reduzieren sich durch die verringerte Luftwechselrate die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes. Das ist energetisch vorteilhaft. Gleichzeitig hat die reduzierte Luftwechselrate aber auch Auswirkungen auf die Raumtemperaturen, die nun im Vergleich mit den zuvor untersuchten Varianten betrachtet werden sollen.

Für die Varianten mit der reduzierten Luftwechselrate ergeben sich erwartungsgemäß größere, über die Heizperiode gemittelte Raumtemperaturen, da in Zeiträumen⁴¹, in denen die Raumtemperatur über der Raumsolltemperatur liegt, die nun geringeren Lüftungswärmeverluste zu einem langsameren Absinken der Raumtemperatur führen. In den Varianten vor Modernisierung steigt die mittlere Raumtemperatur jeweils um $0,1$ Grad Kelvin an. Die reduzierte Luftwechselrate wirkt sich für alle Nutzertypen in gleicher Weise aus. Hingegen steigen die Raumtemperaturen für die Varianten nach Modernisierung der Gebäudehülle durch die reduzierte Luftwechselrate um $0,4$ bis $0,9$ Grad Kelvin an. Die höchste mittlere Raumtemperatur für den Fall mit Tag- und Nachtabsenkung liegt dann bei $22,4 \text{ °C}$ und damit um $3,4$ Grad Kelvin höher als die Raumsolltemperatur von 19 °C .

4.2.4 Fazit aus den quasi-stationären Berechnungen

Zusammenfassend kann für den Wärmeschutzstandard vor energetischer Modernisierung festgehalten werden, dass die verschiedenen täglichen Verläufe der Temperaturwünsche mit bzw. ohne Temperaturabsenkung bei gleicher mittlerer Raumsolltemperatur (energetisch äquivalente Temperaturwünsche) auch zu sehr ähnlichen mittleren Raumtemperaturen führen. Der energetische Einfluss des Wärmeschutzes der nicht modernisierten Gebäudehülle für die energetisch äquivalenten Typen des Nutzerverhaltens kann also als (sehr) ähnlich bezeichnet werden. Eine reduzierte Luftwechselrate führt zu unwesentlich höheren mittleren Raumtemperaturen. Die Auswirkungen sind jedoch geringer als infolge der verschiedenen täglichen Verläufe der Raumsolltemperatur.

⁴⁰ Die energetisch relevante Luftwechselrate könnte sich dann beispielsweise aus Infiltration mit $0,1 \text{ h}^{-1}$ und Lüftungsanlage mit $(100\%-80\%) \cdot 0,5 \text{ h}^{-1} = 0,1 \text{ h}^{-1}$ (in Summe $0,2 \text{ h}^{-1}$) zusammensetzen. Die Luftwechselrate der Lüftungsanlage wird im Beispiel um 80% Wärmerückgewinnung reduziert.

⁴¹ Daneben gibt es auch Zeiträume mit gleicher Raumtemperatur aber verringerter Heizleistung und Zeiträume, in denen die Heizleistung zu Null wird und die Raumtemperatur geringfügig ansteigt. Beide gemeinsam haben aber deutlich geringere Auswirkungen auf die mittlere Raumtemperatur als der im Text benannte Effekt.

Nach energetischer Modernisierung ergibt sich für den angenommenen hohen Wärmeschutzstandard ein differenzierteres Bild. Hier führt das – durch den verbesserten Wärmeschutz hervorgerufene – langsamere Absinken der Raumtemperaturen abhängig von der Höhe der Raumsolltemperatur zur Nutzungszeit zu deutlichen Unterschieden der mittleren Raumtemperatur. Der nutzerunabhängige Einfluss des Wärmeschutzes auf die mittlere Raumtemperatur ist je nach Nutzertyp (Tagesverlauf des Temperaturwunsches) also deutlich größer. Dieser Effekt wird bei reduzierte Luftwechselrate noch verstärkt. Die reduzierten Lüftungswärmeverluste, die sich aus geringen Lüftungsaktivitäten bzw. Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ergeben, lassen die Raumtemperatur noch langsamer absinken, was zu höheren mittleren Raumtemperaturen führt.

Es ergeben sich über die Heizperiode gemittelte Raumtemperaturen, die sich vor und nach energetischer Modernisierung bei jeweils unverändertem Nutzerverhalten um bis zu 3 Grad Kelvin unterscheiden. Dem ist künftig bei der Betrachtung von Rebound-Effekten und auch bei der Weiterentwicklung einfacher, stationärer Bilanzierungsverfahren Rechnung zu tragen.

Quellen

- [dena 2016] dena-Studie. Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude. Teil 2: Ausreißeranalyse; Berlin 2016
- [IWU 2022] Gradtagszahlen in Deutschland; Excel-Tool des Instituts Wohnen und Umwelt Darmstadt; Fassung vom 14.06.2022; <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205>
- [IWU 2015] EnEV-XL 5.1; Excel-Tool des Instituts Wohnen und Umwelt Darmstadt; Fassung vom 30.06.2015; <https://www.iwu.de/publikationen/tools/informationen-enev-xl/>
- [IWU 2009] Kurzverfahren Energieprofil; Verfahren und Tool für die einfache energetische Bewertung von Gebäuden; Fassung aus dem Jahr 2009; <https://www.iwu.de/forschung/energie/kurzverfahren-energieprofil/>
- [Norm 2008] DIN EN ISO 13790: Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008. Beuth Verlag, Berlin 2008
- [IWU 2017] Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäudesektor, IWU Darmstadt, 2017