

## REBOUND-EFFEKTE NACH ENERGETISCHER MODERNISIERUNG? – KOSMA-FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS INGENIEUR- UND SOZIALWISSENSCHAFTLICHER SICHT

Michael Grafe<sup>1</sup>, Ulrike Hacke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institut Wohnen und Umwelt GmbH, E-Mail: [m.grafe@iwu.de](mailto:m.grafe@iwu.de)*

<sup>2</sup> *Institut Wohnen und Umwelt GmbH, E-Mail: [u.hacke@iwu.de](mailto:u.hacke@iwu.de)*

### Kurzfassung/Abstract

Der berechnete Wärmebedarf und der gemessene Wärmeverbrauch stimmen oft nicht überein. Dabei ist das Phänomen zu beobachten, dass in energetisch nicht modernisierten Gebäuden der Verbrauch geringer ist als der Bedarf, in neuen und energetisch modernisierten Gebäuden hingegen höher. Dort werden oft auch deutlich höhere Raumtemperaturen gemessen. Daraus wird bisher insbesondere in sozialwissenschaftlichen Untersuchungen der Schluss gezogen, dass mit hohen Energiestandards gestiegene Nutzerkomfortansprüche einhergehen. Diese führen dann über die Wunsch einer höheren Raumtemperatur zu Rebound-Effekten und zur Verfehlung der gewünschten Energieeinsparungen.

Im Forschungsprojekt KOSMA wurde Fragen des Nutzerverhaltens (Lüften und Heizen) nachgegangen. Als Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Befragung wurden einerseits sehr verschiedene Verhaltensweisen für das Heizen und Lüften festgestellt. Andererseits konnten keine deutlichen Verhaltensunterschiede in modernisierten Gebäuden abgeleitet werden. In den ergänzenden ingenieurmäßigen Energiebilanzbetrachtungen wurden für zwei Modellgebäude nutzerabhängige und -unabhängige Parameter variiert. Alle diese Parameter haben deutlichen Einfluss auf den Bedarf. Eine Zuordnung der Bedarfs-Verbrauchs-Abweichung zu einem einzelnen Parameter ist aber nicht möglich, sodass Rebound-Effekte aus dem Nutzerverhalten weder nachgewiesen noch widerlegt werden konnten.

The calculated heat requirement and the measured heat consumption often do not match. The phenomenon can be observed that consumption is lower than demand in buildings that have not been energy modernised, but higher in new and energy modernised buildings. Significantly higher room temperatures are also often measured there. The conclusion drawn from this, particularly in social science studies, is that high energy standards are accompanied by increased user comfort requirements. This then leads to rebound effects

through the desire for a higher room temperature and the failure to achieve the desired energy savings.

The KOSMA research project investigated questions of user behaviour (ventilation and heating). On the one hand, the results of the social science survey revealed very different behaviours for heating and ventilation. On the other hand, no clear differences in behaviour could be identified in modernised buildings. In the supplementary engineering energy balance analyses, user-dependent and user-independent parameters were varied for two model buildings. All of these parameters have a significant influence on demand. However, it is not possible to assign the demand-consumption deviation to a single parameter, so that rebound effects from user behaviour could neither be proven nor disproven.

### Einleitung

Der Erfolg von Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden zur Reduktion des Wärmeverbrauchs wird mit Hinweis auf Rebound-Effekte häufig in Zweifel gezogen. Dabei wird die Differenz zwischen dem gemessenen Verbrauch und dem berechneten Bedarf oft allein den Nutzern und deren (Fehl-)Verhaltensweisen zugeschrieben. Zugleich gibt es Erkenntnisdefizite in Bezug auf das komplexe Zusammenwirken von nutzer- und baulich-technisch-bedingten Aspekten und deren Auswirkungen auf den (Mehr-)Verbrauch von Heizwärme.

Vor diesem Hintergrund war der vom BMBF im Förderschwerpunkt FONA/Sozial-ökologische Forschung geförderte Forschungsverbund KOSMA (Komponenten der Entstehung und Stabilität von Rebound-Effekten und Maßnahmen für deren Eindämmung) bestrebt, mögliche Einflussfaktoren direkter Rebound-Effekte im Bereich Heizwärme zu untersuchen. Ein Fokus lag dabei auch in einem Vergleich des Nutzerverhaltens abhängig von vorab definierten unterschiedlichen energetischen Gebäudestandards. Diese Analysen basierten auf Befragungsergebnissen zum Nutzerverhalten ergänzt um gebäude- bzw. wohnungsseitige Informationen, die vom Projektpartner Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH (NHW) zur Verfügung gestellt wurden. Flankierend

dazu wurde mit exemplarischen energetischen Betrachtungen ein Blick auf die vielfältigen Größen mit Einfluss auf Rebound-Effekte und deren Wechselwirkungen geworfen.

### Konzeption und Methodik der sozialwissenschaftlichen Befragung

Zur Erfassung des Wärmenutzungsverhaltens sowie weiterer relevanter Eigenschaften der Haushalte (z.B. sozio-ökonomische/demographische/kulturelle Merkmale, Werte/Normen, Einstellungen, Wissen) wurde eine standardisierte quantitative Erhebung im Mietwohnungsbestand der NHW durchgeführt. Die Stichprobe umfasst 1.304 auswertbare Fälle. Davon konnte eine Teilgruppe (n = 87) zusätzlich retrospektiv zu ihrem Wohnverhalten vor einer zum Befragungszeitpunkt maximal fünf Jahre zurückliegenden Modernisierung befragt werden.

Weit überwiegend wurde die Befragung in Form persönlicher Interviews in den Wohnungen der Befragten realisiert, pandemiebedingt in zwei Wellen (Heizperioden 2019/2020 und 2021/2022). Die Auswahl der an insgesamt 14 Standorten in Hessen befindlichen Gebäude/Wohnungen erfolgte kriterienbasiert, um eine möglichst heterogene Stichprobe zu erreichen, die sowohl sozio-strukturell unterschiedliche Befragtengruppen als auch verschiedene energetische Gebäudequalitäten beinhaltet. Für die Analysen wurde entsprechend ein umfangreiches Set an Auswertungsvariablen herangezogen (siehe Kleinhüchelkotten et al., 2023).

Neben der Zustimmung zu verschiedenen Aussagen oder Wahrnehmungen wurden in Bezug auf das Heizen die Einstellungen an den Heizkörperventilen, Raumthermostaten o.ä. abgefragt, die – wenn abweichend – einheitlich auf eine sechsstufige Skala (0/\*-5) transformiert wurden. Die im Sample befindlichen Wohnungen verfügen überwiegend über Zentralheizungen (56 %), seltener über Gas-Etagenheizungen (21 %) oder Fernwärme (20 %). Vereinzelt fanden sich noch Einzelöfen. Mechanische Lüftungssysteme kommen in 8 % der Wohnungen vor, wobei es sich hierbei – abgesehen von drei Fällen mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, die nicht gesondert betrachtet wurden – um reine Abluftanlagen im Badezimmer handelt.

Die Angaben zum Heizen und Lüften wurden im Allgemeinen für die Räume einer „Normalwohnung“ (Wohnzimmer, Schlafzimmer, ggf. kombiniertes Wohn-/Schlafzimmer, Küche, Bad) abgefragt. Außerdem fanden drei Anwesenheitszustände (tagsüber und nachts bei Anwesenheit sowie tagsüber bei Abwesenheit) Berücksichtigung, wobei die jeweilige Zeitdauer anhand der Angabe der üblichen Abwesenheitsdauer des gesamten Haushalts an einem „normalen Werktag wie heute“ ermittelt wurde. Die Nacht wurde vereinfachend einheitlich mit acht Stunden angesetzt. Auf dieser Basis konnten Variablen für den Gesamttag (24 h-Betrachtung)

aggregiert werden. Beachtet wurden zudem technische „Sonderfälle“ (z.B. Regelung einer Gas-Etagenheizung mit Raumthermostat im Referenzzimmer und Thermostatventilen an den Heizkörpern, Vorhandensein einer Abluftanlage).

Für den Vergleich der hier im Fokus stehenden unterschiedlichen energetischen Qualitäten der Gebäudehülle wurde eine Variable gebildet, die – angesichts der Komplexität und Kleinteiligkeit dieser Thematik – dennoch gut handhabbar sein sollte. Dabei wurde der Bezug auf die konkrete Wohnung als wichtig erachtet, der insbesondere für teilsanierte Gebäude, in denen die Lage der Wohnung im Gebäude einen großen Einfluss auf den Energiebedarf haben kann, präzisere Aussagen ermöglicht. Demzufolge wurde der Dämmstandard der einzelnen Hüllbauteile der Wohnung herangezogen, wobei jeweils die Lage der Wohnung im obersten, in einem mittleren oder im untersten Geschoss berücksichtigt ist. Dies bedeutet, dass nur solche Bauteile in die Variablenbildung eingingen, die die Wohnung des befragten Haushalts auch tatsächlich umgeben. Die Beschreibung des Energiestands der Wohnung erfolgte anhand der Variable  $f_{EN}$ . Sie ist definiert als Quotient aus den flächengewichteten U-Werten der tatsächlichen, die Wohnung umgebenden Hüllbauteile und den für den KfW-Effizienzhaus-Standard 100 notwendigen flächengewichteten U-Werten (siehe Tabelle 1). So entspricht beispielsweise bei einem  $f_{EN,EG} = 1,0$  der Wärmeschutzstandard der Wohnung des Erdgeschosses gerade dem für ein KfW EH 100 nachzuweisenden Standard.

Tabelle 1: Auswertungsvariablen zur energetischen Gebäudequalität

Energetischer Gebäudezustand	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sanierung in Neubaustandards bzw. Vollsanierung gemäß jüngeren gesetzlichen Anforderungen (<math>f_{EN,Wohnung}</math> bis 0,7 bzw. <math>f_{EN,Wohnung} &gt;0,7</math> bis 1,5; zusammengefasst wegen der kleinen Fallzahl im besten Segment)</li> <li>2. Teilsanierung bzw. Sanierung der 1980/90er Jahre (<math>f_{EN,Wohnung} &gt;1,5</math> bis 2,5)</li> <li>3. Teilsanierung mit wenigen Einzelmaßnahmen oder un-sanierter Bestand (<math>f_{EN,Wohnung} &gt;2,5</math>)</li> </ol>
Alter der Fenster	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. vor 1978</li> <li>2. 1978-1994</li> <li>3. 1995-2001</li> <li>4. ab 2002</li> </ol>

Zudem wurde das Alter der Fenster in Klassen zusammengefasst, die sich an markanten Zeitpunkten der Wärmeschutzverordnung bzw. Energieeinsparverordnung orientieren. Fehlende Angaben zum

Fenstereinbau bei Baujahren vor 1995 wurden auf Basis der verfügbaren, baualterstypischen U-Werte ergänzt. Auf diese Weise konnten eine Klassifizierung der Dichtigkeit (zur Betrachtung des Lüftungsverhaltens) und die Plausibilisierung der Fenster-U-Werte (Vorhandensein einer Wärmeschutzverglasung zur Betrachtung des Heizverhaltens) vorgenommen werden.

## Wesentliche Befragungsergebnisse zum Heizen und Lüften

Die Auswertungen der berichteten und – wie oben bereits beschrieben – teilweise aus anderen Regeleinrichtungen transformierten Thermostateinstellungen deuten auf ein allgemein sparsames Heizverhalten bezogen auf alle betrachteten (Wohn-)Räume hin. Dies gilt sowohl für eine 24 h-Betrachtung als auch für die verschiedenen An- und Abwesenheitssituationen, die jeweils hohe Anteile an Haushalten mit Thermostateinstellungen von 0 bis unter 1 aufweisen. Demnach haben je nach Raumnutzung zwischen 20 % und 50 % der Befragten ihre Heizung bezogen auf einen 24 h-Tag entweder vollständig ausgeschaltet oder nur für eine sehr kurze Dauer eingeschaltet. Das Wohnzimmer bzw. das kombinierte Schlaf-/Wohnzimmer wird dabei im Mittel tagsüber bei Anwesenheit von Personen in der Wohnung am stärksten geheizt (mittlere Thermostateinstellung von 2,3 bei Zentralheizung oder Fernwärme; 3,1 bei Gasetagenheizungen). Für Küchen und Schlafzimmer finden sich dagegen geringere Wünsche an die Raumtemperaturen (mittlere Thermostateinstellung jeweils etwa 1 bzw. 1,5).

Die Vergleiche der Thermostateinstellungen in Gebäuden mit unterschiedlicher energetischer Qualität zeigen keine Hinweise auf Rebound-Effekte: Haushalte in unsanierten Gebäuden wählen tagsüber bei Anwesenheit im Wohnzimmer signifikant höhere Thermostateinstellungen (mittlere Einstellung 2,9) als in teilsanierten Gebäuden (2,1) oder solchen in einem besseren energetischen Zustand (2,3). Zwar ist die Mehrheit der Befragten mit den in ihrer Wohnung erreichten Raumtemperaturen zufrieden, etwa jede/r zehnte Befragte empfindet sie jedoch als zu niedrig. Solche Befragte wohnen mehrheitlich in Gebäuden mit mittlerem (42 %) oder schlechterem energetischen Zustand (36 %).

Nach Auskunft der vermietenden Wohnungsgesellschaft wird bei Gebäuden mit Fernwärme oder Zentralheizung eine zentrale Nachtabsenkung auf 18 °C vorgenommen. Ein Großteil der Befragten ist sich dieser Regelung nicht bewusst. Gleichzeitig liegen jedoch die berichteten mittleren Thermostateinstellungen im tagsüber am meisten beheizten Wohnzimmer in der Nacht nach Angaben der Befragten deutlich geringer bei ca. 1,4-1,5. Bezogen auf Schlafzimmer, Küche und Bad wird in den Wohnungen mit der besten energetischen Qualität nachts signifikant seltener eine Temperatur-

absenkung vorgenommen als in energetisch schlechteren Wohnungen. Dies gilt bei stundenweiser Abwesenheit am Tag auch für das Wohnzimmer. Dabei sind jedoch die insgesamt niedrigeren Heizungseinstellungen in diesen Wohnungen zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf längere Abwesenheiten, also wenn sich über mehrere Tage niemand in der Wohnung aufhält, haben über 80 % der Befragten angegeben, die Heizung dann ausnahmslos herunterzulegen.

Auch die aus der Retrospektive für eine kleine Teilgruppe erfragten Aussagen zu Veränderungen beim Wärmenutzungsverhalten infolge einer energetischen Sanierung liefern keine Hinweise auf Rebound-Effekte: Diese Befragten heizen nach der Modernisierung nach eigenen Angaben entweder weniger (66 % Zustimmung) oder genauso wie vor der Modernisierung (31 %). Ein gutes Drittel (35 %) startet nach eigenen Angaben zudem später in die Heizsaison.

Die Auswertungen zum Lüftungsverhalten ergaben, dass es insbesondere im Hinblick auf Wohn- und Schlafräume offenbar feste Fensteröffnungsroutinen gibt, wonach die Fenster zum Lüften entweder ausschließlich weit geöffnet oder ausschließlich gekippt bzw. spaltbreit geöffnet werden. Befragte, die für solche Zimmer im Tagesverlauf sowohl Stoß- als auch Kipp Lüftung angegeben haben, sind mit Anteilen zwischen 6 % und 10 % in der Minderheit. Für Küchen und Bäder wurde dagegen vergleichsweise häufiger die Antwortkategorie „das ist ganz verschieden“ gewählt (Küche 30 %, Bad ohne Abluftanlage 25 %), was auf einen eher situativen Charakter der dortigen Fensteröffnung hinweist. 11 % der insgesamt Befragten öffnen alle Fenster ihrer Wohnung in der gleichen Art und Weise, dabei beinahe ausschließlich in Stoßlüftung. Die präferierte Art des Fensteröffnens scheint zudem im Wesentlichen unabhängig davon zu sein, ob die Befragten erst Pflanzen o.ä. von den Fensterbänken räumen müssen oder nicht.

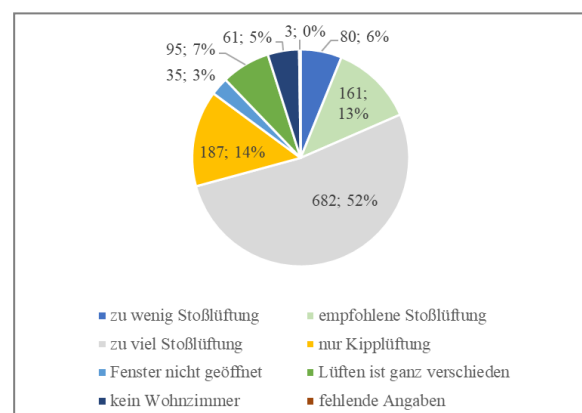


Abbildung 1: Angaben zur Fensteröffnung im Wohnzimmer (n = 1.304)

Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch die erfragten Fensteröffnungspräferenzen für das Wohnzimmer.

Die Angaben zur Stoßlüftung wurden dabei zusätzlich entsprechend der Lüftungsempfehlungen von co2-online (ohne Jahr) kategorisiert, wonach die Befragten ihre Wohnzimmerfenster zur Stoßlüftung im optimalen Fall an einem kalten Wintertag etwa vier bis sechs Minuten (fünf Minuten +/- 20 %), an einem milden Tag etwa acht bis 12 Minuten (10 Min +/- 20 %) in 24 Stunden öffnen. Für die jeweilige Zuordnung lag die subjektive Einschätzung der Befragten zugrunde, ob es sich am Befragungstag um einen kalten oder milden Wintertag handelte. Diejenigen mit zu wenig Stoßlüftung liegen dementsprechend darunter, solche mit zu viel Stoßlüftung zum Teil deutlich darüber.

An einem „normalen Werktag“ öffnen die „Stoßlüfter“ im Mittel zwischen zwei- und dreimal ihre Fenster (Median zweimal). Allerdings zeigt sich auch eine große Spannweite: Es gibt Haushalte, die nur einmal am Tag stoßlüften, und andere, in denen im Wohnzimmer bis zu 15-mal oder in der Küche bis zu 20-mal die Fenster weit geöffnet werden. Auch bei der Dauer der Stoßlüftung gibt es sehr große Streuungen. Klammert man die Extremwerte (definiert als Werte größer als die Summe aus Mittelwert und einer Standardabweichung) aus, beträgt das arithmetische Mittel ca. eine halbe Stunde, der Median etwa 20 Minuten pro 24 h-Tag in Wohn-/Schlafräumen und Bädern, in der Küche mit etwa 25 Minuten etwas mehr. Maximal wurden dann bis zu zwei Stunden Stoßlüftung im Winter berichtet. Die ausschließlichen „Kipplüfter“ öffnen ihre Fenster in den einzelnen betrachteten Räumen im Tagesmittel sehr unterschiedlich: Im Wohnzimmer kippt die Hälfte der betreffenden Befragten nicht länger als anderthalb Stunden das Fenster an. Im Schlafzimmer beträgt der Median dagegen acht Stunden. Dabei handelt es sich oft um „klassische Nachtkipplüfter“. Auch in Bad und Küche werden die Fenster bezogen auf 24 Stunden eher länger gekippt bzw. spaltbreit geöffnet (Median: 6 Stunden bzw. 4 Stunden).

Je nach betrachtetem Zimmer bleiben nachts (Anteile zwischen 70 bis 84 %) und tagsüber bei Abwesenheit des gesamten Haushalts (72 bis 84 %) die Fenster in den meisten Fällen geschlossen.

Die berichteten Stoßlüftungsroutinen scheinen des Weiteren nicht durch die Außentemperaturen beeinflusst zu sein. Mittelwertvergleiche ergaben zumindest keine signifikanten Unterschiede zwischen Personen, die den Befragungstag subjektiv als mild bzw. kalt wahrgenommen haben. Im Hinblick auf die Kipplüftung ließ sich lediglich feststellen, dass an kalten Tagen das Badfenster signifikant öfter, jedoch mit signifikant kürzerer Dauer in Kippstellung gebracht wird. Diese Befunde decken sich auch mit den Ergebnissen, dass etwa 29 % der Befragten nach eigenen Angaben bei kälterer Witterung seltener und/oder kürzer, ca. 42 % an einem milden Wintertag häufiger und/oder länger ihre Fenster öffnen. In den jeweils meisten Fällen bleibt die Witterung somit

offenbar ohne Einfluss auf die Fensteröffnungsroutinen.

Ein Einfluss baulicher Merkmale auf das Fensteröffnungsverhalten und damit ein Hinweis auf Rebound-Effekte ließ sich mit Mittelwertvergleichen der Gruppen mit unterschiedlichem energetischen Gebäudezustand nicht feststellen. Einzig die Beschaffenheit der Fenster ist für sich allein genommen teilweise von Bedeutung. Bei Befragten, die im Wohnzimmer die Fenster üblicherweise per Stoßlüftung öffnen, ließen sich signifikante Gruppenunterschiede feststellen, wobei diejenigen mit den ältesten Fenstern vergleichsweise seltener (im Mittel 2,4-mal vs. 2,9-mal) und kürzer (im Mittel 30 Minuten vs. 49 Minuten) in 24 Stunden lüften. Bezogen auf diejenigen Befragten mit Kipplüftung sind die Ergebnisse weniger eindeutig und zeigen zum Beispiel, dass Befragte mit älteren Küchenfenstern diese vergleichsweise länger ankippen als solche mit jüngeren Fenstern (9,3 h vs. 5,8 h).

### **Einflussgrößen auf Rebound-Effekte aus ingenieurmäßiger Sicht**

Zur Erklärung von Rebound-Effekten wird bisher die Raumtemperatur herangezogen. Sie liegt in modernisierten Gebäuden und Neubauten deutlich höher und wird mit erhöhten Komfortansprüchen der Nutzer in Verbindung gebracht. Die nun folgenden energetischen Betrachtungen sollen zeigen, dass es viele weitere, verschiedenartige Einflüsse auf Rebound-Effekte gibt und die festgestellten Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch keineswegs allein dem Nutzer zugeschrieben werden sollten.

Der zugrundeliegende Forschungsbericht [Grafe, M. 2023] beinhaltet neben den hier vorgestellten Ergebnissen der stationären Energiebilanzierung noch zwei weitere Teile. Der Hinweis darauf und ein kurzer Abriss sind wichtig, um klar zu machen, dass in den anschließend vorgestellten energetischen Betrachtungen nur ein Teil der Einflussgrößen auf Rebound-Effekte detailliert behandelt wird.

So werden zu Beginn des Berichtes die vielfältigen Aspekte benannt und qualitativ betrachtet. Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Größen ergeben sich sowohl auf der Verbrauchs- als auch auf der Bedarfsseite. – „Vollständigkeit des Verbrauchs“ z.B. bei Nutzung von Solarenergie; „Einfache Berücksichtigung“ z.B. Abgrenzung des Verbrauchs von Wärmepumpen, Lüftungsanlagen und Haushaltsstrom; „Lagerhaltung, Mengenermittlung“ z.B. Öl, Scheitholz; Abgrenzung von Verbräuchen für Heizung und Warmwasser einschließlich Verteilverlusten; Raumtemperaturen; Lüftung; Lokalklima. Diese Vielfalt zeigt, dass eine alleinige Zuordnung der Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch zum Nutzer der Komplexität der Wärmetransportvorgänge im Gebäude nicht gerecht wird und als falsch anzusehen ist.

Der Bericht schließt mit energetischen Berechnungen, in denen der Einfluss der Raumtemperatur in zeitlich höher Auflösung genauer betrachtet wurde. Diese Ergebnisse wurden bereits vorgestellt [Grafe, M. 2019], sollen dennoch kurze Erwähnung finden. Für ein fiktives Beispielgebäude wurden ein energetisch nicht modernisierter und ein modernisierter Zustand mit hohem Dämmstandard der Gebäudehülle untersucht. Für beide energetische Gebäudezustände wurden in Varianten die gleichen Nutzertypen und ein identischer Anlagenbetrieb angenommen. Es ergaben sich über die Heizperiode gemittelte Raumtemperaturen, die sich vor und nach energetischer Modernisierung um bis zu 3 Grad Kelvin voneinander unterscheiden. Die höheren Raumtemperaturen resultieren allein aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle und sind in den vorliegenden Berechnungsbeispielen nutzerunabhängig. Damit wurde gezeigt, dass die Raumtemperatur keine rein nutzerabhängige Größe ist, im untersuchten Spezialfall sogar gänzlich nutzerunabhängig. So wurde auch die häufig anzutreffende Annahme widerlegt, dass allein erhöhte Komfortansprüche des Nutzers für höhere Raumtemperaturen nach energetischer Modernisierung und die damit verbundenen Rebound-Effekte verantwortlich seien.

### Beispielhafte Betrachtung ausgewählter Einzeleinflüsse und deren Zusammenwirken

Zur Quantifizierung von Rebound-Effekten ist die Gegenüberstellung des Verbrauchs mit seinem Erwartungswert – einem berechneten Energiebedarf – unabdingbar. Im hier betrachteten Beispiel darf für viele relevante Größen zu Gebäudekubatur, Wärmeversorgungssystem und Verbrauchsdaten von sicheren bzw. sehr guten Angaben ausgegangen werden. Das ist im Rahmen von Untersuchungen zu Rebound-Effekten keineswegs selbstverständlich! Mit den vorliegenden Daten wurde unter Verwendung des IWU-Tools EnEV-XL zunächst ein normnaher Energiebedarf berechnet. Anschließend wurden die Parameter Lokalklima, Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste variiert.

### Beispielgebäude

Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich um Wohngebäude der 1930er Jahre. Es sind zwei Gebäude 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 Varianten des Energiebedarfs müssen folglich nur einmal berechnet werden und können den Verbräuchen beider Gebäude gegenübergestellt werden. Die Wohnfläche beider Gebäude beträgt in Summe 1140 m<sup>2</sup>. 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 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.

### Lokalklima

Der Einfluss des Lokalklimas kann entweder durch Korrektur des Verbrauchs (Klimafaktoren) oder bei der Bedarfsberechnung berücksichtigt werden. Zur Betrachtung von Rebound-Effekten ist Letzteres zu bevorzugen. Das Lokalklima wird in diesem Beispiel bei der Berechnung des Bedarfs berücksichtigt, 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.

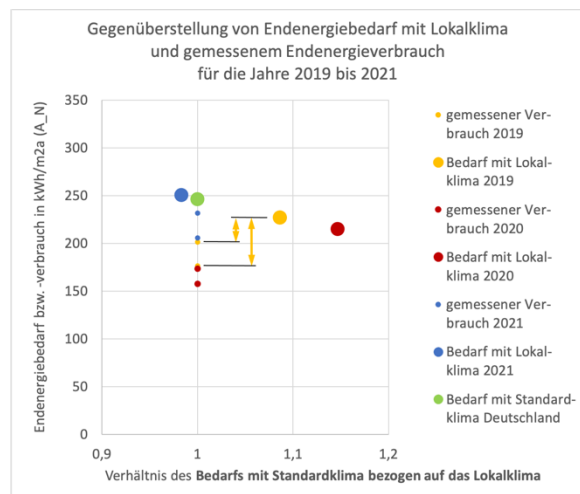


Abbildung 2: Gemessene Endenergieverbräuche und normnah, jedoch mit Lokalklima berechnete Endenergiebedarfe

Die in den beiden Gebäuden gemessenen Verbräuche weichen gegenüber den Bedarfen mit Lokalklima des jeweiligen Betrachtungsjahres um -7%...-27% bzw. -19%...-57 kWh/m<sup>2</sup>a ab. In Abbildung 2 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.

Durch die Berücksichtigung des Lokalklimas ergibt sich ein für energetisch nicht modernisierte Gebäude typisches Bild. In kälteren Jahren liegen die Verbräuche etwas höher und auch die Erwartungswerte des Verbrauchs (mit Lokalklima berechnete Bedarfe) unterscheiden sich zwischen wärmeren und kälteren Jahren. Weiterhin liegen die Verbrauchswerte generell unter den Bedarfswerten. An dieser Stelle wird bei der Betrachtung von Rebound-Effekten gewöhnlich die Berechnung abgebrochen und die verbleibende Abweichung dem Nutzerverhalten zugeschrieben. Das vernachlässigt aber, dass viele weitere nutzerabhängige und -unabhängige Parameter in der Bedarfsberechnung normgetreu angesetzt werden, von denen praktisch keineswegs sicher angenommen werden kann, dass sie in diesen Größen im Gebäude auch vorliegen bzw. wirken. Um den Blick zu weiten, sind nun weitere Einflussgrößen in der Bedarfsberechnung zu variieren, um so einen Eindruck von deren Einflüssen auf die Höhe des Bedarfs resp. des erwarteten Verbrauchs zu gewinnen. Dies soll für drei dieser Parameter – die Raumtemperatur, die Luftwechselrate und die technischen Verteilverluste – geschehen.

### Raumlufttemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste

In den Varianten des Energiebedarfs sind die hier untersuchten Parameter Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste jeweils in drei verschiedenen Ausprägungen berücksichtigt worden.

Die Raumlufttemperatur und die Luftwechselrate werden in einer praktisch in Mehrfamilienhäusern zu erwartenden Bandbreite variiert.

Raumlufttemperatur:

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

Luftwechselrate:

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

Die technischen Verteilverluste werden hingegen in einer Bandbreite variiert, die praktisch für das vorhandene Wärmeversorgungssystem der untersuchten Gebäude erwartet werden darf. Angaben zu Wärmeerzeuger, Speicherung und Übergabe werden aus den Gebäudedaten für alle Varianten gleich übernommen. Die Verteilverluste der Varianten gering/mittel/hoch unterscheiden sich nach den für diese Gebäude (in seinem derzeitigen energetischen Zustand) erwarteten Baualterklassen der Verteilsysteme für Heizung und Warmwasser.

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/m<sup>2</sup>a

Raumtemperatur hoch – gering: 62 ... 92 kWh/m<sup>2</sup>a

Luftwechselrate mittel – gering: 20 ... 28 kWh/m<sup>2</sup>a

Luftwechselrate hoch – gering: 32 ... 45 kWh/m<sup>2</sup>a

techn. Verteilverluste mittel – gering: 21 ... 24 kWh/m<sup>2</sup>a

techn. Verteilverluste hoch – gering: 28 ... 41 kWh/m<sup>2</sup>a

In Tabelle 2 sind die berechneten Endenergiebedarfe aller 27 Varianten für das Jahr 2019 zusammengefasst. In Abbildung 3 werden die Varianten durch je zwei Marker dargestellt – einen Querstrich für die Luftwechselrate und einen Kreis für die Verteilverluste. Die normnah unter Verwendung des Lokalklimas berechnete Variante (in Abbildung 2 gelb gefüllter Kreis) ist mit einem Endenergiekennwert von 227 kWh/m<sup>2</sup>a 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/m<sup>2</sup>a. Diesen Varianten gegenübergestellt sind der normnah mit Standardklima berechnete Bedarf (grün gefüllter Kreis) und die gemessenen, nicht angepasste Verbräuche. Da die Raumtemperaturen nicht bekannt sind, unter denen die Verbräuche zustande gekommen sind, sind die Verbrauchsmesswerte hier nicht über einer bestimmten Temperatur sondern als gepunktete Linien eingezeichnet.

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 geschlossen 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 mittleren) Luftwechselraten und Verteilverlusten.

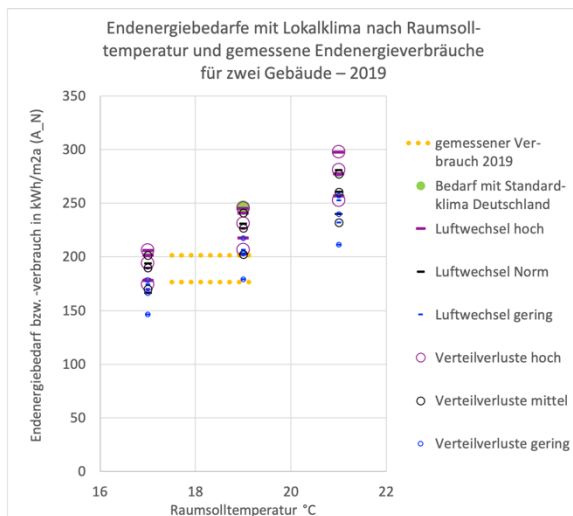


Abbildung 3: Gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe für das Jahr 2019

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. Auch die Betrachtung der anderen beiden Untersuchungsjahre (hier nicht dargestellt) hat zeigt, dass bei sonst gleichen Annahmen in der Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen Unterschiede durch das Lokalklima des Untersuchungsjahres möglich sind. Eine nutzerunabhängige Verschiebung aller Ergebnisse nach oben oder nach unten ist also aus verschiedenen Gründen denkbar. Dann würde sich das Feld mit einer guten Übereinstimmung zwischen Bedarfen und Verbräuchen in einen anderen Bereich verschieben und bei alleiniger Betrachtung dieser weiteren Fälle für die gleichen Gebäude und die gleichen Nutzer gegebenenfalls andere Schlüsse gezogen.

### Fazit und Ausblick für künftige energetische Betrachtungen zu Rebound-Effekten

• 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 wurden neben den nutzerabhängigen Parametern Raumsolltemperatur 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) 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, Wärmezeugung) 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.

• 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 zumindest saisonal 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. Auf die starken Wechselwirkungen zwischen Wärmeschutz, Anlagenbetrieb und Nutzer und deren Auswirkungen auf die Raumtemperatur wurde eingangs hingewiesen. So soll an dieser Stelle erneut für künftige Studien zu Rebound-Effekten sensibilisiert werden, Temperaturmesswerte – insbesondere höhere Raumtemperaturen in Gebäuden mit höheren Energiestandards – nicht automatisch und vollständig dem Nutzer zuzuordnen. Denn es wurde in [Quelle BPT2019] gezeigt, dass es nach energetischer Modernisierung auch bei identischem Nutzerverhalten zu mitunter deutlich höheren Temperaturen kommen kann.

## Zusammenfassung

In künftigen Studien zu Rebound-Effekten sind die Einzeleinflüsse des Nutzers, der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und des -betriebes sowie des Lokalklimas in ihrem Zusammenwirken bzw. in ihren Wechselwirkungen zu betrachten. Das gilt für alle möglichen energetischen Zustände der zu untersuchenden Gebäude. Aus dem Zusammenwirken dieser verschiedenartigen Einzeleinflüsse können sich immernoch Prebound- bzw. Rebound-Effekte ergeben. Die hier vorgestellten Berechnungen haben aber 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. Ein ähnliches Bild ergibt sich aus den Befragungsergebnissen. Sowohl für Heizen als auch für Lüften konnten für alle energetischen Zustände der Wohnungen deutlich voneinander abweichende Gewohnheiten festgestellt werden. Das Zusammenwirken von Nutzer und Wohnung konnte vereinzelt gezeigt werden (z.B. späterer Heizbeginn in hohen Energiestandards oder auch Lüftungsdauer nach Dichtigkeit der Fenster), jedoch ohne ein substantiell geändertes, auf erhöhte Komfortansprüche hindeutendes Nutzerverhalten ausmachen zu können.

## Danksagung

Ein Glücksfall für das Gelingen des Forschungsprojektes KOSMA war unser Praxispartner, die Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH mit ihrem Abrechnungsdienst, der MET Hessen. Sie haben mit großem Engagement und qualitativ hochwertigen Gebäude- und

Verbrauchsdaten sehr wertvolle Beiträge geleistet. Herzlichen Dank hierfür!

## Literatur

co2online, ohne Jahr. Online-Quelle: <https://www.co2online.de/energie-sparen/heizenergie-sparen/lueften-lueftungsanlagen-fenster/richtig-lueften/#c115399> (letzter Zugriff: 12.12.2023)

Kleinhüchelkotten, S. et al. 2023. Determinanten des Heiz- und Lüftungsverhaltens in Miethaushalten. KOSMA-Werkstattbericht Nr. 3. Hannover, Darmstadt.

Grafe, M. 2023. Einflüsse und Wechselwirkungen nutzerabhängiger und -unabhängiger Aspekte auf Energiebedarf und -verbrauch von Wohngebäuden. KOSMA-Werkstattbericht Nr. 4. Darmstadt.

Grafe, M. 2019. Ursachen für Rebound-Effekte bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden – Welche Rolle spielt der Nutzer?, Tagungsbeitrag Bauphysiktage Weimar 2019