

Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards – Sind Rebound-Effekte unvermeidbar?

Franz Schröder
Bernhard Gill
Martin Güth
Tobias Teich
Anna Wolff

Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards – Sind Rebound-Effekte unvermeidbar?

Diese Studie beschreibt Temperatur- und Temperaturvariabilitätstrends im Zuge von Modernisierungen deutscher Wohnumgebungen basierend auf mehreren Millionen empirischen Messungen. Mediane und Mittelwerte der Raumtemperaturen im Winter sind typisch um 4 K angestiegen, von 18 °C in der Baualtersklasse vor 1978 (OLD_77) bis hin zu etwa 22 °C in Passivhäusern (PAH). Kühlere Raumtemperaturen, unter etwa 18 °C, scheinen dagegen in Gebäuden bis EnEV-Standard 2009 und PAH zunehmend zu verschwinden. Letztere sind – im Unterschied zu den meisten Bestandsbauten – homogener und die Heizperiode hindurch konstant hoch beheizt, ihre interne Gebäudemasse wird systematisch wärmer als in Bestandsbauten und fungiert als zusätzlicher Pufferenergiespeicher. Daher führen systematische Energielecks durch geöffnete Fenster und Türen wohl kaum noch zu wahrnehmbarem Komfortverlust und bestehen dauerhaft. Andererseits bewirken zusätzliche, nicht geregelte und saisonal ungünstig eingetragene Energiegewinne – hauptsächlich durch Solarstrahlung und mittelbar auch durch Warmwasserverbrauch – zu zügigem Raumtemperaturanstieg, überwärmen ggf. häufig den Wohnraum, was subsequent erst zur Herstellung des Temperaturkomforts durch Fensteröffnung, d. h. das Ablüften von Wärme, führt. In modernen EnEV-2009 Gebäuden werden Fensteröffnungsraten beobachtet, die ohne weiteres und dauerhaft 10 % übersteigen können, auch im Hochwinter. Gegenwärtig werden entsprechende Zusammenhänge und Wechselwirkungen mit den Wohnungsnutzern durch weitere soziologische Begleituntersuchungen detaillierter und methodisch nachvollzogen. Diese Studie soll dafür sensibilisieren, dass die forcierte Durchsetzung der neuen Baustandards über EnEV-2002 hinaus und im breiten Bestand fragwürdig erscheint, solange sich das physiologische Wohlbefinden in neuen Wohnumgebungen nicht deutlich mit technisch-energetischen Optimierungskonzepten in Übereinstimmung bringen lässt.

Stichworte: Wohngebäude, Raumtemperaturverteilung, Baualtersklassen, EnEV, Heizenergieverbrauch, Fernwärme-Heizenergie, Fensterlüftung, Nutzerverhalten

1 Allgemeines

Forcierte Dämmung und Versiegelung von Gebäudehüllen gemäß moderner EnEV-Baustandards hat während der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts offenbar nicht zu den angestrebten Fortschritten an Energieeffizienz geführt. Statistische Studien über Energieverbrauchskennwerte und

Development trend of seasonal indoor temperature distribution introducing modern building standards – Are rebound effects unavoidable?

This study describes the temperature and temperature variability trend accompanied with introducing modern building insulation standards in Germany, ranging from classical buildings before 1978 to EnEV-2009 and passive house standards (PAH). Data sets comprise far about 10 million field measurements covering room temperatures and manual ventilation activities as well as an exemplary case study within six modern EnEV-2009 buildings. We find winter indoor temperatures increased by 4 K, from initially 18 °C in buildings built prior to 1978 up to about 22 °C within passive houses and modern EnEV-2009 standard, and, at the same time, room temperatures become more homogenous while the lower temperatures are almost vanishing. Furthermore, almost 10 % of the windows are kept open even during the mid-winter heating season. We argue that modern buildings experience frequent, unexpected and unrequested inner energy gains and subsequently larger heat storing effects during the entire season, which lead to discomfort and a reflex to open windows. The "bio-feedback" of residents changes: they may quickly feel a sense of "overheating", but practically never more experience freezing events. Additional research in interdisciplinary best practice labs, aiming at an enhanced understanding of individual feelings of thermal comfort and the development of adapted assisting systems, is recommended. This study emphasizes, that enforced application of building standards beyond EnEV-2002 appears questionable, as long as physiological wellness in modern living environment does not harmonize with technical concepts of energy use optimization and should only be introduced on a voluntary basis.

Keywords: Residential buildings, Indoor temperature distribution, Construction age category, German Energy Saving Ordinance, Heating energy consumption, District heating energy, Natural ventilation, User behavior

Temperaturmessungen haben beispielsweise bekräftigt, dass der aktuelle mittlere Energieverbrauch von den ältesten Gebäudebaualtersklassen (BAK) bis zum EnEV-2002-Standard um nur annähernd 50 % reduziert wurde (Bestandsstatus zwischen etwa 2010 und 2012, [1]). Nachweislich war auch ein Trend von 1–1,5 K ansteigenden Innenraumtemperaturen (Mediane) von Altbauten (bis BAK



Bild 1. EnEV-2009 konforme Gebäude der Münchner GEWOFAG Holding GmbH, gebaut 2010. Je 600 m² Wohnfläche in acht Wohneinheiten auf drei Etagen, 750 m² umbaute Nutzfläche

Fig. 1. Modern building enclosures of the Munich GEWOFAG Holding GmbH, built in 2010, serving German EnEV-2009 standards. Each 600 m² living area on three floors with eight flats and 750 m² total enclosed area

1977) zu dem seinerzeit aktuellen Baustandard EnEV-2002. Diese Temperaturanstiege sind in temporär unbeheizten Räumen stärker ausgeprägt als in den zum Messzeitpunkt beheizten Räumen.

Diese Studie zeigt den vorliegenden Trend von Innenraumtemperaturen und deren saisonaler Variabilität in den verschiedenen BAK bis zu EnEV-2009 und Passivhaus-Standard. Die Basis empirischer Messdaten umfasst etwa 10 Mio. Einzelmessungen, dabei sowohl Raumtemperaturen wie auch Heizflächentemperaturen. Analysiert werden die Beobachtungen im Hinblick auf zunehmende Isolation und Versiegelung der moderneren Gebäudehüllen, nämlich für Niedrigstenergiehäuser [2], EnEV-2009 [3], [7] und Passivhäuser [4]. Dabei wird in [2] auf Daten vom Fraunhofer IBP Stuttgart, in [3] auf GEWOFAG/Fraunhofer

München und in [4] des Passivhausinstituts PHI in Darmstadt zurückgegriffen.

Vergleichend gezeigt werden repräsentative Raumtemperaturverteilungen von fünf Baualterklassen (BAK) während der winterlichen Heizsaison von November bis März sowie deren Variabilität über die Jahresaison. Daran angeschlossen werden exemplarische Beobachtungen von Raumtemperaturen und Fensteröffnungsraten in sechs baugleichen Gebäuden nach modernem EnEV-2009-Standard (Bild 1), um neue Hinweise auf statistisch verändertes Nutzerverhalten in Interaktion mit den modernen Wohnumgebungen anzudeuten.

Wie verändern sich dort möglicherweise physiologische Wahrnehmung von Wärmequellen und Wärmesenken und wie wären möglicherweise fehlende oder fehlgeleitete physiologische Wahrnehmungen durch technische Assistenzsysteme zu überwinden?

2 Winter-Innenraumtemperaturen von November bis März

Umfangreiche und repräsentative statistische Informationen über Wohnraumtemperaturen und spezifischen Energieverbrauch standen bislang für Gebäudebaustandards bis etwa EnEV-2002 zur Verfügung (siehe [1] und Tab. 1) und wurden als zufällige Einzelmessungen über jeweils mindestens fünf Jahre hinweg erhoben. Diese Studie verarbeitet zeitlich dichtere, systematische Messungen über jeweils 1–2 Jahre in einer deutlich geringeren Anzahl von Gebäudeobjekten, allerdings neuerer Baualterklassen. Bild 2 gibt normierte winterliche Innenraum-Temperaturverteilungen für fünf Baustandards von Altbauten vor 1978 (OLD_77) bis zu Passivhäusern (PAH) wieder, welche in fortschreitender Abfolge strengere thermische Gebäudeisolation und Hüllenversiegelung repräsentieren. Die mittleren Modalwerte der Kurven verschieben sich um etwa 4 K von 18 °C auf 22 °C während die Kurvenformen sukzessive schlanker und symmetrischer ausfallen – die

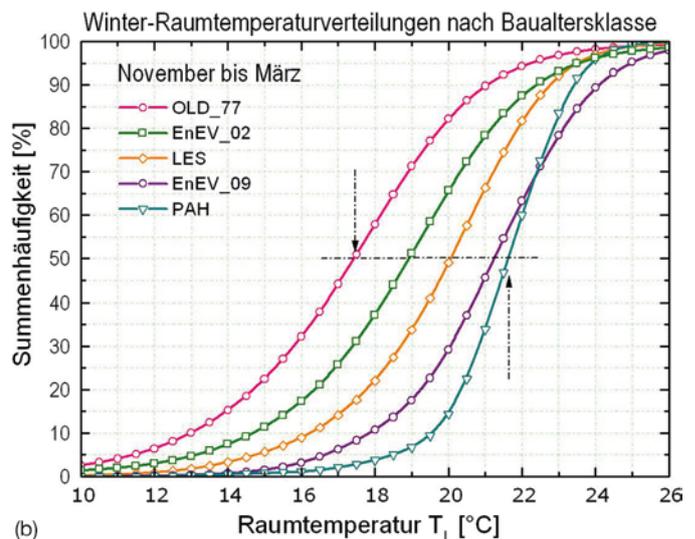
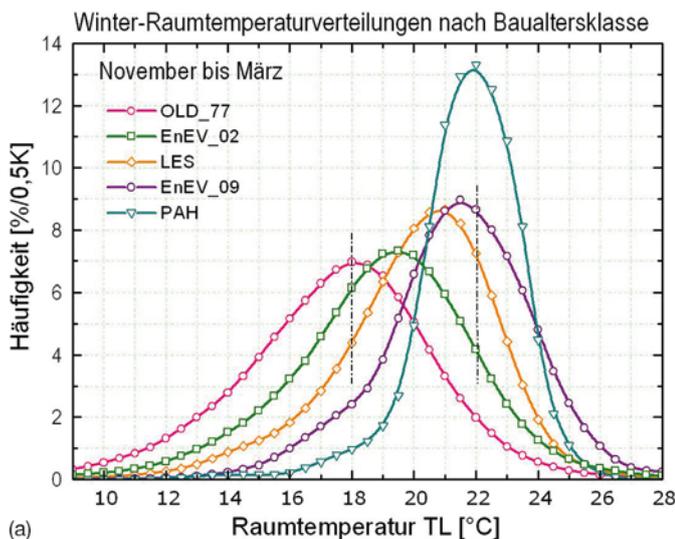


Bild 2. Häufigkeitsverteilung (a) und Summenhäufigkeit (b) winterlicher Raumtemperaturen TL in deutschen Miet-Mehrfamilienhäusern. Von links nach rechts mit fortschreitenden Energieeffizienzstandards bezgl. der Gebäudehüllen (Altbau bis EnEV-2009 und PAH). Bis zu 4 K systematisch höhere Innenraumtemperaturen sind nachweisbar.

Fig. 2. Frequency distributions (a) and accumulated frequency (b) of winter room temperatures within German rental flats, developing (left to right) with advancing energy efficiency standards (old buildings before 1978: OLD_77, EnEV-2002, Low Energy Standard: LES, EnEV-2009, passive house: PAH); 4 K integral increases of mean and median temperatures are evident.

Tabelle 1. Statistische Eckdaten und Quellenreferenzen zu sieben deutschen Gebäudestandards ab 1900. Fünf dieser Standards sind Gegenstand der aktuellen Studie. Random: Einzelmessungen aus jeweils 5 Jahren oder mehr; Smart: Smart-metering-Daten aus jeweils 1–2 Jahren

Table 1. Numerical benchmark data and source references, concerning totally seven German building standards, starting out from 1900. Five of these standards are subject of the present study. Random: Data from single Measurements during 5 or more Years; Smart: Smart metering data out of 1–2 years, respectively

Parameter	Baualtersklassen (BAK)						
	OLD_77	78_94	WSVO-1995	EnEV-2002	LES	EnEV-2009	PAH
TL _{average} [°C]	18,0	18,4	18,7	19,0	20,1	21,4	21,8
TL _{median} [°C]	17,5	18,1	18,4	18,7	20,0	21,3	21,7
Stdev [-]	3,7	3,6	3,5	3,4	2,7	2,4	1,8*
Messungen [#]	6 · 10 ⁶	3,5 · 10 ⁵	2,5 · 10 ⁵	5 · 10 ⁴	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
Metering	random/smart	random	random	random	smart	smart	smart
Gebäude [#]	5500	3500	2500	350	70	8	8
Reference [No.]	[1]	[1]	[1]	[1]	[2]	[3]	[4]

Standardabweichungen halbieren sich in etwa von 3,7 auf 1,8. Die Temperaturen wurden für die vier linksseitigen Kurven weitestgehend in einzelnen Wohnräumen gemessen, während die der PAH-Verteilung im Wesentlichen auf Messungen in zentralen Flurbereichen, damit möglichst repräsentativ für die jeweilige Wohnung erfolgten und somit teilweise die deutlich geringere Streubreite mitbewirken. In Bild 2b, mit Hervorhebung der Medianverschiebung, wird deutlicher, dass gerade die geringeren Raumtemperaturen unterhalb des typischen „Wohlfühlbereichs“ in den modernen Wohnumgebungen mehr und mehr zurückgehen und verschwinden. Beispielsweise liegen noch fast 5/6 oder 85% der OLD_77-Wohnumgebungen unter 20°C, während bei EnEV-2009 nur knapp 1/3 (oder 30%) und im PAH nur noch 1/6 oder 15% darunter verbleiben.

Im Wandel der Baustandardentwicklung wechseln also bis zu zwei Drittel des Wohnraums das Temperaturregime: von typisch unterhalb nach oberhalb einer allgemeinen Wohlfühlgrenze von etwa 20°C. Die numerischen Eckdaten für insgesamt sieben BAK sind zur Dokumentation in Tabelle 1 dargestellt.

In Summe ist also eine signifikante Veränderung des Innenraumklimas zu beobachten, die sich mit der deutschen Verordnungsdirektive EnEV etabliert und deren weitere Ausbreitung im Wohnungsbestand in den kommenden Dekaden wohl bevorsteht. So weitgehend wie hier beschrieben sind diese Veränderungen aber bisher kaum thematisiert, weil sie einerseits relativ unerwartet und relativ groß ausfallen. Andererseits sind sie aber durchaus konsistent mit den schon länger bekannten sogenannten „Rebound“-Effekten betreffend die noch zu hohen Heizenergieverbräuche in modernen Gebäuden. Die um 4 K erhöhten Temperaturniveaus können dabei allein bereits 20–25% systematisch höheren Heizenergieverbrauch erklären als bedarfstheoretisch, d. h. auf geringere und homogene verteilte Innenraumtemperaturen bezogen kalkuliert.

3 Saisonale Variabilität der Innenraumtemperaturen

Bild 3 zeigt die typische saisonale Evolution von Innenraumtemperaturverteilungen für OLD_77-, EnEV-2002-, EnEV-2009- und PAH-Baustandard, wobei die Daten je-

weils zu Histogrammen in einzelnen Jahresperioden zusammengefasst sind: Dezember bis Februar (Hochwinter), März und November, April und Oktober, Mai und September, Juni bis August (Sommer), vereinfachend also für Zeiträume, in denen jeweils durchschnittlich vergleichbare Außentemperaturen vorherrschen.

Nicht überraschend wird eine deutlichere Variation über die Jahreszeiten beobachtet, je älter die Baustandards ausfallen. Der Kontrast der mittleren Innentemperaturen zwischen Sommer und Winter ist erheblich größer, erreicht typisch 7 K in Altbauten und schrumpft bis auf unter 3 K in PAH. Besonders der linksseitige Ausleger der Kurven durchläuft jeweils eine ausgeprägte „Wanderung“ zwischen Hochwinter und Spätfrühling (bzw. Frühherbst), während diese Kontraste in modernen Bauwerken mehr und mehr zurückgehen und praktisch verschwinden.

Während der zentralen Heizperiode von Oktober bis April bleibt die Innenraumtemperaturverteilung am Ende also quasi unverändert, was auch bedeutet, dass die systematische und maximale Diskrepanz zwischen Innen- und Außentemperaturen im Winter sogar zunimmt und damit auch die physiologische Adaption für Menschen, welche den Aufenthalt zwischen drinnen und draußen wechseln, über ein größeres Temperaturintervall bewerkstelligt werden muss.

Es ist erkennbar, dass sich auch im Hochsommer (siehe Bild 3, JUN-AUG) die Innenraumtemperaturen um wenige K nach oben bewegen. Die Schwerpunkte der statistischen Verteilungen wandern von etwa 22°C (OLD_77) bis zu 24°C und darüber hinaus (EnEV-2009 und PAH), was ggf. einen ersten Hinweis darauf gibt, dass Erwärmungsszenarien über den typischen Wohlfühlbereich hinaus innerhalb moderner Gebäudehüllen häufiger auftreten, trotz nominell besserer thermischer Isolation. Allerdings ist speziell diese Beobachtung weniger repräsentativ und gesichert, weil die Anzahl der Untersuchungsobjekte noch klein ausfällt (Tabelle 1).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass neueste Baustandards also zur Etablierung homogenerer und durchgehend deutlich höherer Innenraumtemperaturen im Winter führen, während das Spektrum und die Verfügbarkeit mittlerer und kühlerer Raumtemperaturen mehr und mehr verlorengeht. Die „Temperatursaison im Innenraum“

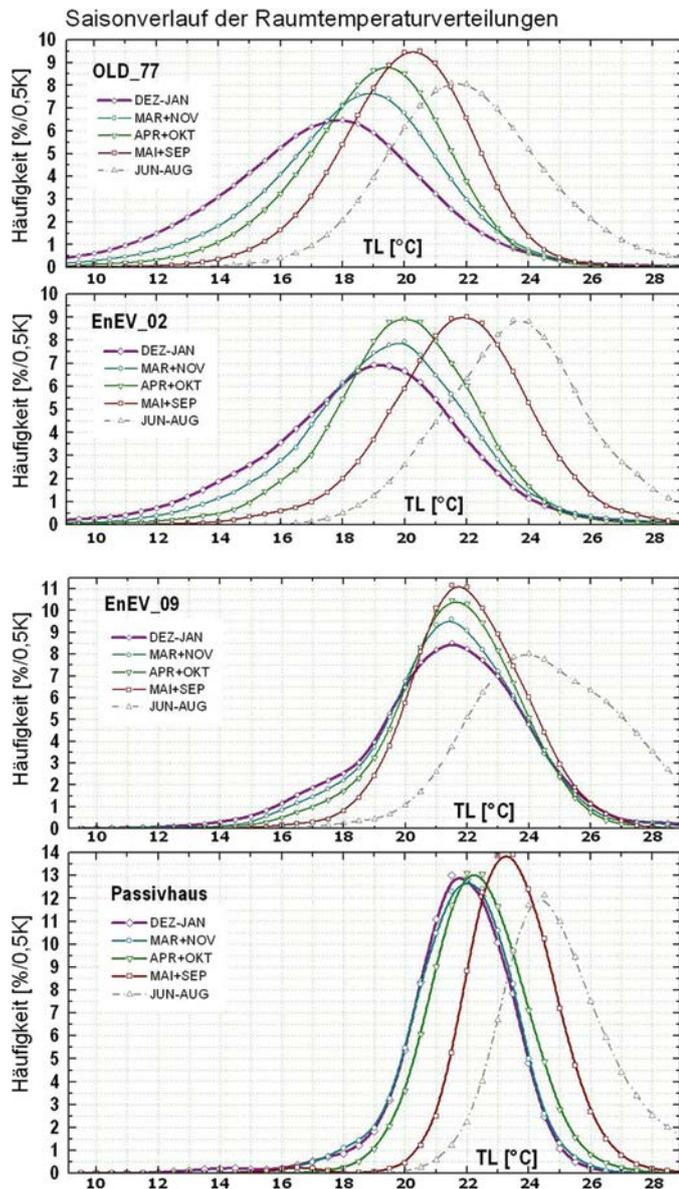


Bild 3. Saisonale Variabilität der Innenraum-Temperaturverteilungen für vier Baualtersklassen (OLD_77 bis PAH). Die Basisstatistik umfasst mehr als 7 Mio. Einzelmessungen
 Fig. 3. Seasonal development of indoor temperature distributions (TL), displayed for 4 building standards (OLD_77 to PAH). Statistics comprise more than 7 Mio. single measurements.

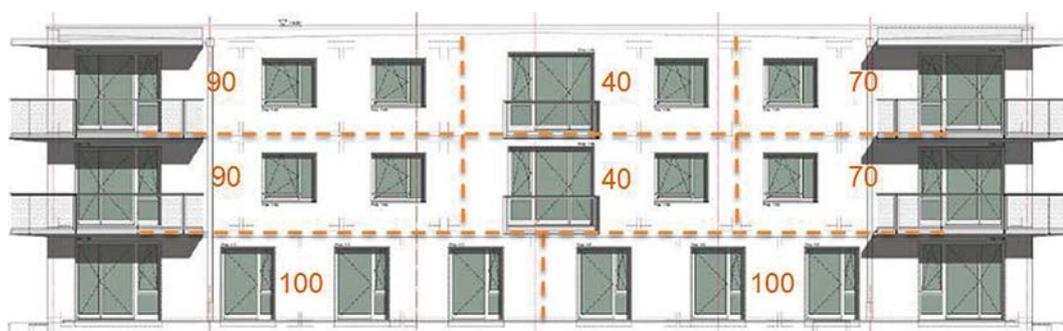


Bild 4. Südfassade der untersuchten Forschungshäuser inkl. ungefährer Abgrenzung der je acht Wohneinheiten (mit Wohnflächenangabe in m²). Eine Fenster-/ Türfront gilt als statistisch „open“, sobald mindestens ein einzelner Fensterkontakt einer Front „open“ meldet.
 Fig. 4. Building southern front and approx. distribution of 8 flats (incl. living area indication) inside. A window-front is regarded as statistically „open“, as soon as at least one single window sensor reports „open“ status.

verschwindet gewissermaßen. Gleichzeitig wird dieser generelle Temperaturanstieg notwendig begleitet von ansteigenden Temperaturen aller gebäudeinternen Massen und dadurch von einem deutlichen Anstieg zusätzlich und permanent im Gebäude gespeicherter Wärme, unmittelbar in der Nähe und mit Wirkung auf alle Wohnbereiche. Ebenso in der wärmeren Jahreszeit deuten sich in moderneren Gebäuden – trotz aufwendigerer thermischer Isolation – höhere Raumtemperaturen an. Ob es sich bei dieser Entwicklung insgesamt um Komfortgewinn für die Wohnungsnutzer handelt, wird eher angezweifelt und in der nachfolgenden Diskussion wieder aufgegriffen.

4 EnEV-2009 – Fallstudie von Beheizungs- und Lüftungsmodalitäten

Sechs nominell baugleiche Wohnhäuser (Baubauweise und geographische Exposition) bilden die Grundlage der in diesem Abschnitt illustrierten EnEV-2009-Temperaturverteilungen und der im Folgenden beschriebenen Rebound-Effekte. Jedes Einzelgebäude besitzt etwa 600 m² Wohnfläche, 750 m² Nutzfläche verteilt über drei Stockwerke und ein teilweise öffentliches Kellergeschoss (Bild 1 und Bild 4). Die Fassaden besitzen je 55 Glasfronten, davon 22 südwärts, 16 nordwärts, 8 westwärts und 9 ostwärts ausgerichtet. Acht Wohnungen verteilen sich mit je ca. 40, 70 bzw. 90 m² auf die beiden oberen Etagen; die beiden Wohnungen im Erdgeschoss sind je etwa 100 m² groß. Innenraumtemperaturen wurden von Herbst 2012 bis Spätsommer 2013 detailliert im Stundentakt aufgezeichnet [3], Heizenergie- und Warmwasserverbrauch sechs Jahre lang seit Herbst 2011 (und fortlaufend) in einem monatlichen, energetischen Monitoring erfasst.

Bild 5 zeigt zunächst die täglichen Mittel inklusive den Standardabweichungen der Wohnraumtemperaturen TL aller 48 Wohnungen und zwar in Abhängigkeit vom umgebenden Außenklima (TA) am Beispiel der Saison Oktober 2012 bis September 2013. Hier ist veranschaulicht, dass – vgl. auch Bild 3 – der Schwerpunkt von TL über einen weiten Bereich von Außentemperaturen TA unterhalb von 14°C nie einen Komfortbereich von 21–22°C unterschreitet, egal wie weit die Außentemperaturen absinken. Lediglich die Standardabweichungen von TL erhöhen sich noch marginal, d.h. es existieren vereinzelt noch leicht kühlere oder aufgeheizte Wohnungen, respektive Einzel-

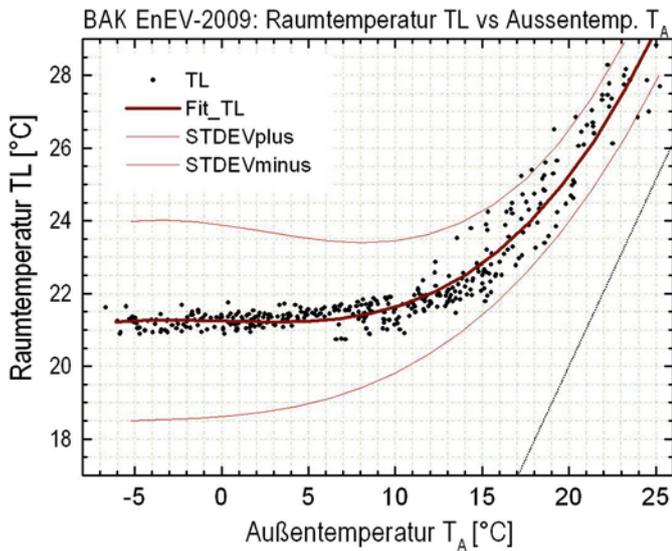


Bild 5. Mittlere Tages-Raumtemperaturen TL (Punkte schwarz) inkl. Standardabweichungen (rote Linien) über 6 Gebäude (48 Wohnungen) versus Tages-Außenmitteltemperatur T_A . Datenbasis: Stundenmittel der Temperaturmessungen zwischen Oktober 2012 und September 2013
Fig. 5. Average daily room temperatures and standard deviation across 48 flats vs. ambient atmospheric temperature T_A . Time series based on hourly measurements between October 2012 and September 2013

räume, zwischen etwa 18 und 24 °C. Erwähnenswert ist weiterhin, dass bis in die Sommermonate hinein, also bei mittleren Außentemperaturen über etwa 14 °C hinaus, die Raumtemperaturen TL immer und durchgehend noch typisch um 5 K (minimal etwa 4 K) über den Tagesmitteltemperaturen liegen (vgl. Diagonale rechts unten in Bild 5). Dadurch wird sichtbar, dass durchgehend Energieeinträge in den Wohnungen vorliegen müssen, entweder durch Heizenergie oder durch innere Wärmegewinne (wie Solareinstrahlung) oder eben durch beides parallel.

4.1 Beheizungsmodalitäten

Bild 6 zeigt die mittleren Heizenergieeinträge pro Wohnung und Monat, die sich auf gut 5 MWh direkt über die Heizflächen plus schätzungsweise weitere 2 MWh mittelbar über den Warmwasserkonsum belaufen (jeweils als Summen über die Saison). Der reine Heizenergieverbrauchskennwert erreicht dabei witterungskorrigiert knapp 65 kWh/(m²a) und liegt allein noch unterhalb des in Summe postulierten Endenergiebedarfs (gem. EnEV, graue Linie). Allerdings verteilen sich die realen Heizenergieanteile weit breiter über die Saison zwischen Früh- und Spätsommer, mindestens von September bis Juni, wogegen gemäß der Normbedarfsberechnung die Heizsaison bestenfalls zwischen Oktober bis etwa Mitte/Ende April stattfinden sollte.

Hinzu kommt ein relativ substanzieller Wärmeeintrag in die Gebäudehülle über den (relativ hohen) Warmwasserkonsum von durchschnittlich über 40 m³ pro Wohnung und Jahr und relativ gleichverteilt über die Saison. Der gesamte Energieeinsatz für Trinkwassererwärmung (TWE) liegt entsprechend relativ hoch bei gut 52 kWh/(m²a) und

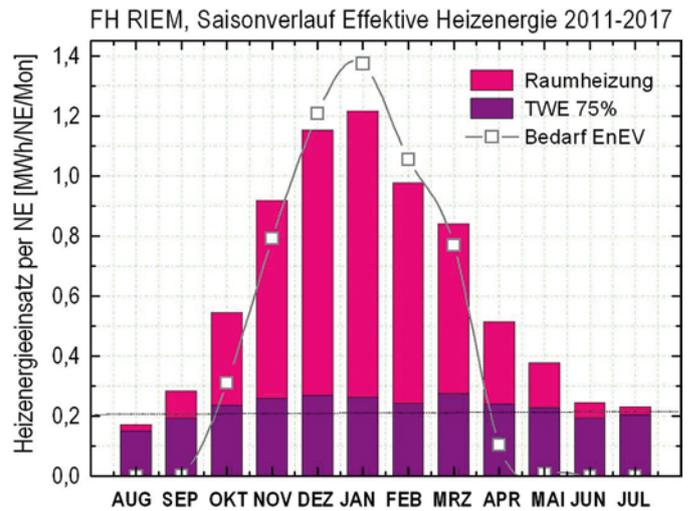


Bild 6. Saisonale Verteilung des mittleren Heizenergiekonsums pro Wohnung in den sechs EnEV-2009-konformen Gebäuden; rot: mittlerer Energieeintrag über Heizkörper; lila: anteiliger mittelbarer Heizenergiebeitrag über konsumiertes Warmwasser (75% der TWE)
Fig. 6. Seasonal distribution of average heat energy consumption within six EnEV-2009 conform buildings. The energy balance comprises a six years period (within 2010 to 2017). red: average pure radiator heat energy input; purple: fractional energy contribution (75%) of the drinking water heating

variiert saisonal typisch zwischen 3,5 und 5 kWh/(m²Mo-nat) mit den höheren Werten im Hochwinter. Abgeglichen mit den konsumierten Warmwasservolumina (im Mittel etwa gut 0,56 m³/(m²a)) ergibt sich ein mittlerer Energieeinsatz von gut 0,09 MWh/m³ für die TWE.

Als Erkenntnis aus viel umfangreicheren statistischen Datensätzen (Bild 7) ergibt sich, dass bei vergleichbaren Bestandsgebäuden mit Fernwärmebeheizung etwa zwei Drittel bis drei Viertel dieser (sekundär eingebrachten) Heizenergie, mittelbar und nicht konkret erfassbar, der Raumheizung zugutekommen. Dies lässt sich konkreter aus dem Vergleich größerer Ensembles von Gebäuden mit Heizanlagen ohne bzw. mit integrierter zentraler Trinkwassererwärmung (TWE) ableiten. Dort (s. Bild 7) zeigt sich quasi immer ein systematischer Minderverbrauch an für Raumheizung abgetrennter Heizenergie bei Anlagen mit TWE gegenüber der Gesamtheizenergie bei solchen ohne TWE. Es ist zwar plausibel, dass Anlagen ohne TWE häufiger älter und energetisch weniger effizient sind, was aber andererseits einen substanziellen Unterschied von fast 20 kWh/(m²a) kaum allein erklären kann.

Mit dem Versuch, die entsprechenden Verteilungen (schwarze Linien mit Symbolen in Bild 7) grob in Übereinstimmung zu bringen, ergibt sich ein Anteil von gut 75% der TWE-Energie, der dafür der Gebäudeerwärmung zugerechnet werden sollte (mittlere gepunktete Linie). Mit Hinblick auf die nicht quantifizierten energetischen Unterschiede zwischen Anlagentypen mit und ohne TWE könnte man diesen Anteil nach unten hin abschätzen, ggf. also als „best guess“ hier ein Intervall von 60% bis 80% angeben. Die TWE liefert also mittelbar einen zusätzlichen Sockelbetrag zur Erwärmung der Gebäudehülle (in Bild 6: lila), ist aber speziell außerhalb der Heizsaison nicht als

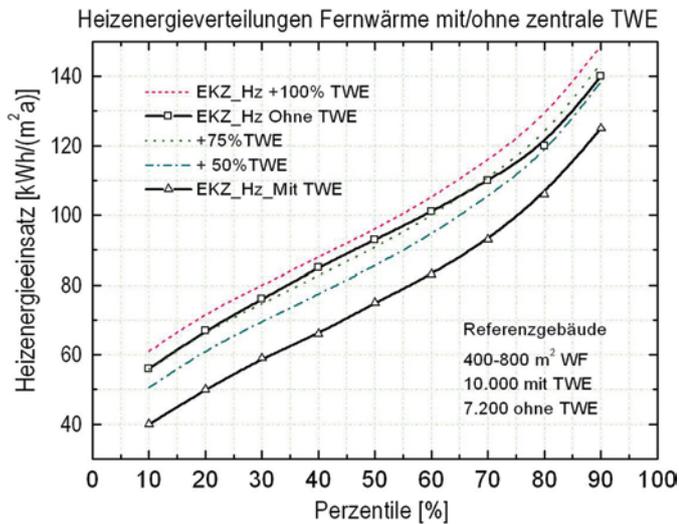


Bild 7. Häufigkeitsverteilung konsumierter Fernwärme-Heizenergie (Nutzflächenbezug) in Gebäuden mit (Dreiecke) und ohne (Quadrate) zentrale Trinkwassererwärmung (TWE). Beide Kurven zeigen eine durchgehende Diskrepanz von etwa $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Gepunktete und gestrichelte Kurven illustrieren die Aufwärtsverschiebung der untersten Kurve durch Addition von jeweils 50%, 75% und 100% Anteil der TWE. Statistikbasis: 7.200 Referenzgebäude, 80.000 Wohnungen ohne zentrale TWE-Anlage; 10.000 Referenzgebäude, 90.000 Wohnungen mit zentraler TWE-Anlage. Verbrauchsdaten 2012 bis 2016, teilweise aus [1].

Fig. 7. Frequency distributions of specific district heat energy consumption of buildings with (triangles) and without (squares) central water heating assemblies. Both curves are separated by about typically $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dotted and dashes lines represent a shift of the lowest curve by adding 50%, 75% or 100% fraction of the drinking water heat energy (DWH) to it, respectively. Statistic data base: 7.200 reference buildings, 80.000 flats without DWH; 10.000 reference buildings, 90.000 flats, with DWH. Data collected between 2012 and 2016, partly from [1].

„nutzbarer“ Wärmeeintrag anzusehen und gerade deshalb von Interesse, weil er auch über die Nutzbarkeit anderer Wärmegewinne, wie der solaren und weiteren internen mitentscheidet.

Zusammenfassend erinnert das saisonale Profil an eingebrachter Heizenergie an thermisch viel schlechter isolierte Altbauten und weniger an nominell moderne, EnEV-2009-konforme Gebäudehüllen. Der faktisch realisierte mittlere Heizenergieverbrauch dieser Gebäude entwickelt sich also nachweislich und nachhaltig gegen im Mittel etwa $90\text{--}95 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, d. h. etwa einem Viertel bis einem Drittel über die kalkulierten EnEV-Bedarfswerte und – vor allem in der saisonalen Verteilung – hinaus. Dieser Sachverhalt erscheint unerwartet stark ausgeprägt und begründet vermutlich im Wesentlichen systematische Rebound-Effekte bei der Beheizung moderner Gebäudehüllen allgemein.

4.2 Belüftungsmodalitäten

Wie die Raumtemperaturen T_L wurden parallel auch die Fensteröffnungsraten erfasst, d. h. stundenweise systematisch in den Jahren 2012 und 2013 sowie sporadisch und stichprobenartig in der Zeit danach.

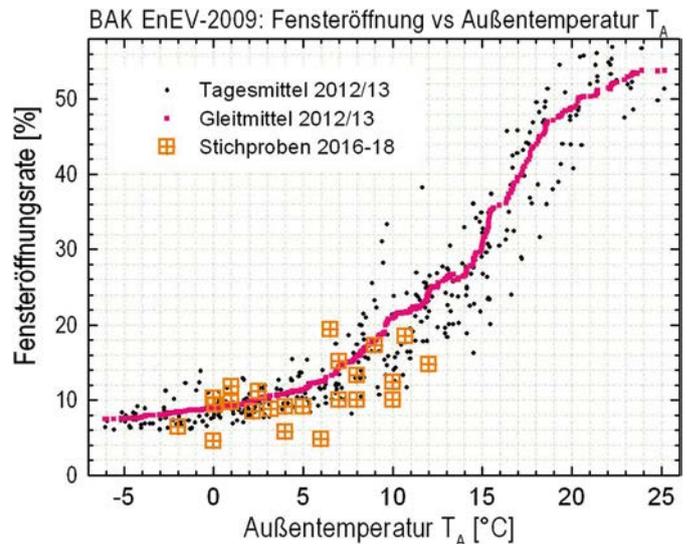


Bild 8. Mittlerer prozentualer Anteil geöffneter Fenster (und Türen) versus Mittlerer Außentemperatur T_A ; schwarze Punkte: Tagesmittel über 6 Gebäude (48 Wohnungen und Treppenhäuser, 2012/13); rot: gleitendes Mittel über je 12 Tage mit vergleichbarer Außentemperatur; orange: fallweise Einzelzählungen offener Fensterfronten (2016–2018). Fig. 8. Daily average percentage of open window-surface vs daily average ambient atmospheric temperature T_A ; black dots: daily average over 6 buildings (48 flats and stair cases); red: moving average over 12 days (at comparable T_A); Orange symbols: Single investigations (counting open windows) in 2016–2018.

Bild 8 illustriert, analog zu Bild 5, die prozentualen mittleren Fensteröffnungsraten an 365 Tagen in Abhängigkeit von der Außentemperatur T_A . Diese Rate stagniert bei den kältesten T_A nicht unter 7–8%, also auch im Hochwinter, überschreitet 10% ab $T_A = 5^\circ\text{C}$, typisch bereits zwischen März bis November, 20% ab etwa $T_A = 10^\circ\text{C}$, typisch in Mai und September und bis weit über ein Drittel hinaus im Sommer (Juni bis August). Ab März und bis Ende November steht mindestens jedes zehnte Fenster durchgehend offen, ab Mai und bis Ende September ist es bereits jedes fünfte, im Hochwinter, d. h. Dezember bis Ende Februar steht statistisch jede fünfzehnte Fensterfront zur Belüftung durchgehend offen. Die 365 Tageswerte (schwarze Punkte) ergeben sich aus den effektiven Mittelwerten von stündlichen Messungen an den Fensteröffnungskontakten aller sechs Versuchsgebäude und nur für die Saison 2012/2013. Sie werden ergänzt und befinden sich in befriedigender Übereinstimmung mit einzelnen, direkten Stichprobenzählungen offener Fensterfronten in den Folgejahren (orange Symbole). Diese Methode erscheint gleichermaßen aussagekräftig wie zuverlässig und ist zudem weniger aufwändig für die nachhaltige Ergänzung des monatlichen energetischen Langzeitmonitorings.

Tageszeitliche Variationen der Lüftungsverteilungen werden zusätzlich in Bild 9 dargestellt, hier zusammengefasst und beschränkt auf die Hauptheizperiode von November bis einschließlich März. Gezeigt wird damit die statistische Verteilung der „manuellen Lüftungstätigkeit“, täglich gemittelt sowie differenziert aufgelöst für vier je sechsstündige Zeitintervalle und insgesamt repräsentativ für die Hauptheizperiode, während der die typischen Au-

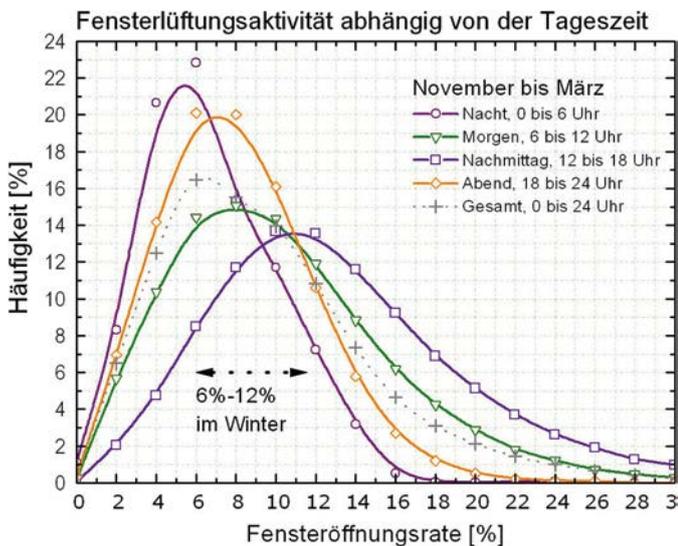


Bild 9. Tageszeitliche Variabilität der manuellen Fensteröffnungs-Häufigkeit in den sechs EnEV-2009-Gebäuden mit zusammen 48 Wohnungen in der Winterperiode November 2012 bis März 2013. Die Verteilungen sind gemittelt über alle stündlichen Messungen und differenziert zusammengefasst nach vier sechsstündigen Tageszeitintervallen. Der mittlere effektive Wert erreicht annähernd 10%.

Fig. 9. Diurnal variability and distribution of manual ventilation activity within six EnEV-2009 conform buildings during winter time November 2012 to March 2013. Distributions represent averages over all hourly measurements and they are segregated according to four daily 6-hours-time-intervals. The average effective value (over the grey curve) reaches almost 10%.

Raumtemperaturen meistens 10°C unterschreiten und durchschnittlich mehr als 85% des jährlichen Heizenergiekonsums anfallen.

Die Modalwerte der Kurven weisen auf mindestens 5–10% dauerhaft geöffnete Fenster oder Balkontüren hin. Die niedrigsten Werte treten nachts auf, während am Nachmittag, sei es aufgrund von Nutzungsgewohnheiten oder aufgrund der solaren Einstrahlung, am meisten gelüftet wird. Die Schwerpunkte der Verteilungen variieren für vier Tageszeiten (vier 6-Stunden-Intervalle) um einen Faktor zwei, zwischen etwa 6% und 12%.

Durchgehend 10% offene Fenster im Winter erscheint als viel, speziell im Hinblick und in Kontrast zu dem hohen Aufwand, der den Vorschriften gemäß der EnEV-2009 nach betrieben werden muss, um hohe thermische Isolationsstandards für Gebäudehüllen zu realisieren. Obwohl es nicht möglich ist, die Rate offener Fenster direkt in Beziehung zu setzen zu konkreten Luftwechselraten, kann vermutet werden, dass die permanent hohen Öffnungsraten die maßgebliche Energiesenke für die Gebäude ausmachen und die wesentliche Ursache des Rebound-Effektes darstellen.

Auch ein simples Dreisatzmodell der Transmissionswerte der Gebäudehülle erweist sich als konsistent: Für die Gebäudehülle ergibt sich ein nomineller mittlerer U-Wert von etwa $0,49\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, wobei die jeweiligen Anteile sich folgendermaßen verteilen: Dach ($U = 0,25$) 23%, Kellerdecke ($U = 0,35$) 19%, Fassaden ($U = 0,4$) 44%, Fensterfronten ($U = 1,4$) 14%; insgesamt mit effektivem Verhältnis der

Wärmetransmission von 60:40 zwischen Resthülle und Fensterfronten [7]. Bei beobachtungsgestützter Vorgabe von 10% eröffneten Fensterfronten (und etwa Verzehnfachung deren U-Werte auf 12 bis 14) invertiert sich das Wärmetransmissionsverhältnis auf etwa 45:55, und zwar bei einer Erhöhung des mittleren Gebäude-U-Wertes um ein Drittel auf $0,67\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und mit einem Anteil von annähernd 30% der Wärmetransmission durch die geöffneten Fensterfronten der Hülle.

Um den typischen Charakter der Fensteröffnungspraxis nachhaltig zu bestätigen, wurden in den Folgejahren nach 2015 immer wieder direkt und stichprobenartig weitere Zählungen geöffneter Fensterfronten vorgenommen, vorzugsweise jeweils im Hochwinter zwischen November und März. Diese singulären Beobachtungen bestätigen die Erkenntnisse des kurzen ursprünglichen Messprojektes nachhaltig und sind ergänzend in Bild 8 integriert.

Zusammen mit den Bilanzierungen des Heizenergiekonsums impliziert das beschriebene „mittlere Lüftungsverhalten“, dass in den Häusern – hauptsächlich wohl neben der Hauptheizsaison während der Übergangszeiten in April, Mai, September und Oktober – substantielle Mengen an (kostenpflichtiger) Heizenergie über den theoretischen Bedarf hinaus in die Gebäudehülle aufgenommen – und ein mittlerer Anteil von etwa 16 MWh/Gebäude/a (2 MWh pro Wohnung) als temporär nicht nutzbare Heizenergie via Fensteröffnung wohl wieder abgelüftet werden muss, um die Balance des beobachteten Zustandes herzustellen. Dabei liegt der theoretische Heizenergiebedarf nach EnEV bei etwa 44 MWh/Gebäude/a (5,5 MWh pro Wohnung), der beobachtete reale Verbrauch dagegen nahe bei 60 MWh/Gebäude/a (7,5 MWh pro Wohnung). Die ausschlaggebenden Fragen sind: Warum finden wir so häufig in modern isolierten Gebäudefassaden weit geöffnete Fensterfronten vor? Müssen wir davon ausgehen, dass gerade diese Konstellation einen bevorzugten Wohnkomfort erzeugt? Wie beeinflusst die Fensteröffnungspraxis konkret das menschlichem Behaglichkeitsempfinden?

5 Diskussion des Rebound-Effekts

Ist der beschriebene Effekt auf ein „Fehlverhalten“ der Nutzer zurückzuführen, oder ist er unwillkürlich und unvermeidlich?

Gängige Auffassungen in der Wohnungswirtschaft deuten bei Problemen mit dem Heizsystem meist auf zwei „schlechte Typen“ von Wohnungsnutzern: Solche, die außergewöhnlich hohen Energieverbrauch verursachen, also „Verschwender“, und jene, die kaum oder keine erfasste Heizenergie verbrauchen und als „Trittbrettfahrer und Schimmelzüchter“ missbilligt werden. Zudem unterliegt heutigen Baustandards die Vorstellung von überall hohen Raumtemperaturen als erstrebenswertem Komfort; moderate bis geringe Temperaturen werden dagegen als Mangel aufgefasst. Solch vereinfachende Ansichten unterstellen implizit schlechte Vorsätze oder menschliche Stereotypen, lenken oft von technischen Unvollkommenheiten ab und verstellen den Blick auf eine weit höhere Komplexität von Wohnszenarios verschiedener Bewohnertypen mit ihren unterschiedlichen und wechselnden Komfortbedürfnissen. Diese unterliegen nicht nur historischem Wandel, sondern weisen mitunter deutliche regionale Unterschiede auf und

hängen von den individuellen Erfahrungen der Bewohner ab. Folgende heuristische Typologie wurde z. B. von [5] entwickelt: „Eisbären“: Menschen mit deutlich reduzierten Wohlfühltemperaturen; „Sparfüchse“: Personen, die es gern wärmer hätten, aber sparen wollen/müssen; „Lüftungsfanatiker“: oft Raucher; „Ofenanbeter“: Menschen mit deutlich erhöhtem Wärmebedarf, sowie „Kontrollfreaks“: die erheblichen Aufwand mit Messung und Einstellung betreiben. In der großen Varianz von Komfortbedürfnissen der Haushalte kann daher eine kühlere Wohnung durchaus als angenehm oder optimal empfunden werden [5].

Eine zu warme Wohnung kann andererseits also durchaus auch Diskomfort bedeuten, Wärmekomfort ebenso durch Techniken des Körperwarmhaltens erzeugt werden. Heutige Baustandards, denen die „Behaglichkeitsnorm“ (i.d.R. 20–21°C) zugrunde liegt, bewirken allerdings höhere und homogenere Innenraumtemperaturen, wie die vorangegangenen Beobachtungen belegen. Dadurch geht in moderneren Wohnumgebungen auch die klassische Diversität möglicher Komfortszenarios schrittweise verloren. Dies liegt auch darin begründet, dass in Altbauten ein größerer Temperaturgradient zwischen Außenwänden und Raumluft besteht und sich folglich stärkerer kontinuierlicher Wärmefluss ausbildet. Die operative Temperatur als physiologisch effektives Mittel zwischen Wärmeabstrahlung der Oberflächen ($\sim T^4$) und der sensiblen Raumlufttemperatur bestimmt das individuelle Komfortbefinden: Je niedriger der Isolationsstandard desto kälter die inneren Oberflächentemperaturen und desto höher die notwendige sensible Raumlufttemperatur, um den thermischen Komfort zu erreichen. Ein substanzialer Anteil der inneren Gebäudemasse, nämlich der Hüllenummantelung, erreicht dabei nur Temperaturen, die bis zu mehreren K unter typischen Komforttemperaturen liegen, diese Massen bilden damit eine Art permanentes „Kühlreservoir“. Unerwartete, nicht willentlich initiierte Energieeinträge – wie solare Einstrahlung – repräsentieren in diesem Kontext willkom-

mene temporäre Kleinerwärmungen. Andererseits werden Wärmeverluste (z. B. nach dem Lüften) als „Kälteerlebnisse“ schnell bemerkt. Anschließend liegen sowohl Raumluft als auch Teile der Gebäudemasse deutlich (und ggf. einige Zeit) unter Komfortniveau und müssen vorwiegend durch dauerhafteren Einsatz seitens der Heizkörper wieder erwärmt werden.

Im Gegensatz dazu herrscht in modernen Gebäuden generell ein höheres Temperaturniveau, ebenso in einem relativ größeren Anteil der internen Gebäudemasse (Bild 10). Alle inneren Oberflächen und die Raumluft unterscheiden sich hier nur durch wenige Zehntel Grad Kelvin Differenz. Weil der dauerhafte Energieabfluss nach außen sehr viel kleiner ausfällt, bildet sich praktisch kein „Kältereservoir“, sodass zusätzliche innere Wärmegewinne zu zügigem und deutlichem Raumtemperaturanstieg führen. Da sich aber die aktuelle Raumtemperatur bereits auf Komfortlevel befindet, kommt es häufiger zu ungewollter Luftüberwärmung und bei längerer Dauer auch zur Überwärmung der inneren Gebäudemassen mit entsprechender Speicherwirkung. Diese Ausgangslage unterminiert die Nutzbarkeit unvorhergesehener Wärmegewinne durch Solareinstrahlung und/oder z. B. Wärmeabgabe an die Wohnung durch Warmwasserkonsum. Diese Beiträge wirken dann – im Sinne von Komforterhaltung – „übersättigend“, kontraproduktiv, d. h. unbehaglich. Sie sind also das Gegenteil von nutzbar, nämlich unerwünscht und müssten wieder abgeführt werden.

Wenn andererseits Wärmeleckagen durch geöffnete Fenster oder Türen entstehen, kann es lange dauern, bis diese überhaupt zu Diskomfort führen, denn das große Wärmereservoir der inneren Gebäudemasse (auf Komfortlevel) wird die kalten aber relativ kleinen Luftmassen über längere Zeit effektiv kompensieren können. Nach dem Schließen eines Fensters wird die Raumluft innerhalb weniger Minuten zurück auf Komfortniveau gehoben, typischerweise auch ohne jeden weiteren Einsatz eines Heizkörpers.

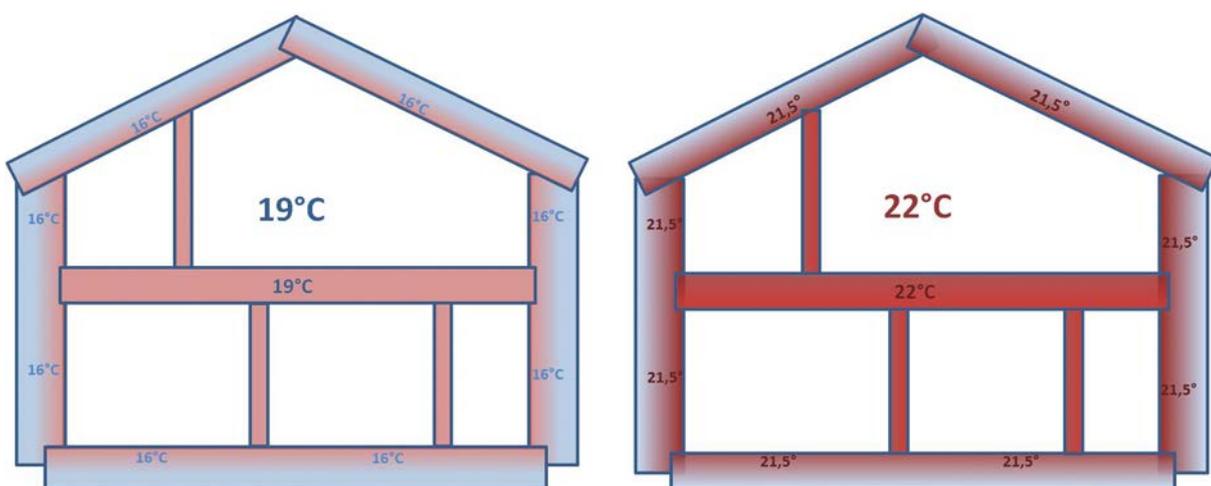


Bild 10. Schema exemplarischer Innenraumtemperaturen von Raumluft, Oberflächen und inneren Gebäudemassen, typisch für Altbauten (links) und modern isolierten Gebäuden (EnEV-2009 oder PAH, rechts). Entsprechende systematische Unterschiede führen zu zusätzlich gespeicherten Wärmemengen von gerechnet 10–15 kWh pro Wohnraum gegenüber klassischen Altbauten (OLD_77).

Fig. 10. Schematic illustration of indoor temperatures of air, surfaces and deeper building masses, typical for old (left) and for most modern building standards (right, EnEV- 2009 and PAH). Such systematic discrepancies are leading to calculated 10–15 kWh excess energy per room stored within walls, floors and furniture compared to classical buildings (OLD_77).

Um diese Mechanismen quantitativ zu verdeutlichen, ist die große Diskrepanz zwischen den Massen an Raumluft und des Gebäude geeignet, welche typisch ein Verhältnis von 1:300 bis 1:500 ausmachen kann: Für beispielsweise ein modernes Gebäude mit 600 m² Wohnfläche berechnen sich Raumluftvolumen, -masse und zusätzlich gespeicherte Wärmemenge (bei angenommenen 3 K Temperaturdifferenz, z. B. 19–22 °C) zu 1500 m³, 1800 kg und 6000 kJ oder 1,8 kWh. Für die effektiv wirksame innere Gebäudemasse (mit der Annahme von Stahlbeton für Böden und Ziegelwerk für Wände) errechnen sich 400 m³, 800000 kg und 2400 GJ oder 700 kWh zusätzlich an verfügbarer Wärmeenergie im Kontrast zu einem klassischen Altbau mit (nur an den nach außen gerichteten) kälteren Innenwandoberflächen. Die zusätzlich „gespeicherte“ Wärme pro Wohnraum (angenommen 40–45 Räume wie in der Fallstudie) betrüge dann typisch 10–15 kWh, entsprechend in etwa dem Zehnfachen dessen, was ein typischer Heizkörper über eine Stunde hinweg an Leistung abgeben würde.

In Summe sind also „Kälteerfahrungen“ in modernen Gebäuden als selten anzunehmen und schwer zu provozieren, während sich eine Überwärmung recht häufig einstellen kann. Ein offenes Fenster in einem homogen mit 22 °C durchwärmten EnEV-2009-Gebäude oder Passivhaus wird also eine vollkommen andere Situation repräsentieren, als in einem Altbau mit eher unkomfortablen Innenwandtemperaturen um 18 °C oder weniger. So wird im Rahmen aktueller sozialwissenschaftlichen Untersuchungen bevorzugt beobachtet, dass sich z. B. nach einer Sanierung speziell das Lüftungsverhalten schnell und deutlich ändert, während das Heizverhalten zunächst stabil bleibt [6]. Insgesamt kann eine große Varianz von Reaktionsweisen und Komfortbedürfnissen der Nutzer festgehalten werden, die jedoch im Widerspruch zu einem „Einheitsbenutzer“ und zur „Behaglichkeitsnorm“ steht, die den aktuellen Baustandards zugrunde liegt. Daher, so die Ausgangsthese hier, kommt es einerseits quasi unwillkürlich immer wieder zur Überwärmung von Innenräumen in modernen Gebäuden, was zu „Unbehaglichkeitserfahrungen“ führen kann, sofern eben nicht durch spontanes Fensteröffnen direkt und – wichtig: schnell erfahrbar – eine „komfortablere“ Situation herbeigeführt würde.

Wenn andererseits die Bewohner moderner Gebäude möglicherweise kaum noch Kälteerlebnisse erfahren, erscheint es nur folgerichtig, dass ein signifikanter Anteil offener Fenster oder Türen auch über längere Zeitintervalle nicht unangenehm wahrgenommen wird, daher eben „vergessen“ und in diesem Zustand belassen wird. Wenn solche Intervalle mitunter Stunden bis zu Tagen andauern können, entweicht sicher ein substanzieller Anteil der „Pufferenergie“ des Gebäudes in die Umwelt. Die „zweckentfremdete Eröffnung“ einer thermisch gut isolierten Gebäudehülle wird zum Bestandteil eines durchaus mit bestem thermischen Komfort assoziierten Rebound-Wohnszenarios: „Angenehm temperierte, warm strahlende Umgebung kombiniert mit allzeit kühler, frischer Luftbrise“.

6 Kommentar und Ausblick

Diese Studie quantifiziert und dokumentiert in erster Linie einen substanziell ansteigenden Trend der Innenraumtem-

peraturen und ihrer räumlichen wie saisonalen Homogenisierung in modernen Gebäudehüllen. Zum absoluten Anstieg der Innentemperaturen um bis zu 4 K kommen ebenso systematisch hohe Fensteröffnungsraten von häufig bis über 10 % während der Hauptheizperiode. Die statistische Systematik dieser Rebound-Effekte – soweit diese Fallstudie als typisch und repräsentativ gelten darf – lässt darauf schließen, dass sie fast immer unwillkürlich zustande kommen und damit in gewisser Weise unvermeidlich eintreten. Gleichzeitig ist noch in keiner Weise belegt, dass diese statistische Anhebung und Homogenisierung der Innenraumtemperaturen einen allgemeinen Komfortgewinn darstellen oder durchgehend wünschenswert wären. Unabhängig davon wird der Rebound-Effekt finanziell problematisch, wenn die Erfüllung der EnEV-Vorgaben eher durch Einbindung (teurer) regenerativer Energieträger, d. h. nachhaltig hohem Endenergieverbrauch bei Verbesserung des Primärenergiefaktors, erreicht wird. Dies war in der geschilderten EnEV-2009-Fallstudie gegeben und hat (trotz und wegen zusätzlicher Erfüllung sogar der EnEV-2014 mittels eines sehr niedrigen Primärenergiefaktors) in keiner Weise zu zumutbaren Amortisationszeiten geführt. Finanziell schlechte Erfahrungen sind daher nur unwahrscheinlicher, wenn – wie z. B. im Fall gut funktionierender PAH – bei der Bauphysik eher auf konsequent niedrigen Endenergieverbrauch gesetzt wird.

Es sollte zusätzlich nachvollziehbar argumentiert werden, dass die menschliche Wahrnehmung (unangenehmer) Kälte in modernen Gebäuden mindestens stark verzögert ist und verlängerte, unbeabsichtigte Energieleckagen produziert. Andererseits können innere Energiegewinne – hauptsächlich durch Einstrahlung – häufig und schnell zu Überwärmung über die Komforttemperatur hinaus im Raum führen (gesättigte Energiepuffer) und somit zu Missempfindungen und einem „Fensteröffnungsreflex“. Das Lüftungsverhalten wird mit der Modernisierung von Wohnlandschaften zu einem substanziellen Einflussfaktor für den Heizenergieverbrauch und gleichzeitig ist ein ganzheitliches Verständnis der Wohnungen, welche aktuell gebaut werden, noch weitgehend unvollständig und kaum erprobt im Hinblick auf vielfältige physiologische, psychologische und soziale Aspekte.

Die Studie soll dafür sensibilisieren, dass die herrschenden (technischen) Strategien zur Heizenergieeinsparung Missverständnissen unterliegen und dass mitunter simplere Lösungen in der Breite zu besseren Resultaten führen könnten. Namentlich die Vermeidung unbeabsichtigter Wärmeabluftung durch offene Fenster erscheint in diesem Kontext vielversprechend, weil eben diese Handlung für den Wohnungsnutzer den einzig verbleibenden schnellen Regulationseingriff zur Raumtemperaturbeeinflussung „mit Feedback“ darstellt. Zudem wäre die Vermeidung von Überwärmung durch weniger träge Beheizungssysteme und auch eine Wiedereinführung von „Hotspots“ (wie z. B. IR-Strahler) versuchsweise erwägenswert, um für die Bewohner wieder ein „Bio-Feedback“ herzustellen.

Denkbar wäre schließlich auch, der Wahrnehmung der Wohnungsnutzer assistierend entgegenzukommen, wo immer der menschliche „Spürsinn“ in modernen Wohnumgebungen irritiert wird oder verlorengelht. Es wäre hilfreich für zukünftiges Energiemanagement, dem Bewohner die aktuellen und akkumulierten Energieabgabeverhältnisse

zu visualisieren, oder, wenn erwünscht, mehr Kontrollautonomie an die Systemtechnik im Hintergrund zu delegieren (z. B. die gezielte Vermeidung unwillkürlicher Ablüftung).

Eine weiterführende Idee dazu ist, variabel programmierbare Schnittstellen der Mensch-Maschine-Interaktion zu schaffen, die sowohl das Erfordernis der Energieeinsparung, die variablen Komfortbedürfnisse der Bewohner wie auch ihre Steuerungswünsche berücksichtigen können. Ein solches hochvariables Konzept kann – allgemein im Rahmen der aufkommenden Wohnungsdigitalisierung – auf viele weitere Aktivitäten über das reine Energiemanagement hinaus, ausgedehnt werden. Mögliche Synergien durch die bereichsübergreifende Verkopplung mit modernisierter Wohnungsverwaltung und unterstütztes Wohnen durch medizinische und soziale Assistenzangebote (AAL) wären bewusst angestrebte Effekte, um auch den altersgerechten Umbau von Wohnlandschaften gleichzeitig und wirksam zu unterstützen.

Eine ausgedehntere praxisorientierte soziologische Untersuchung der hier behandelten Wohnumgebungen ist bereits initiiert und Gegenstand einer interdisziplinären Folgestudie. Neben dem energetischen Langzeit-Monitoring im Hintergrund werden die sechs Gebäude differenzierter hinsichtlich der Variation von Heizungs- und Lüftungsanlagen bewertet sowie die individuellen Nutzerbeobachtungen, -anforderungen und -befindlichkeiten in Interaktion mit der Haustechnik nachgefragt und diskutiert. In diesem Kontext erhofft man sich detailliertere Belege für die diskutierte Interpretation des Rebound-Effektes.

Literatur

- [1] Schröder, F. P., Papert, O., Boegelein, T., Navarro, H., Mundry, B.: Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand, *Bauphysik* 36 (2014), S. 309–324.
- [2] Schröder, F., Reiß, J., Erhorn, H., Ohlwärter, C.: Reale Temperaturen in Mehrfamilienhäusern – Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen. In: *EnEV aktuell*, Heft 2/2010.
- [3] H. I.-B. GmbH: Erstellung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Bauvorhaben auf Basis des Forschungsprojektes „Messestadt Riem R3WA2+4“, Endbericht, 2015 (unveröffentlicht).
- [4] Peper, S., Feist, W.: Die Energieeffizienz des Passivhaus-Standards: Messungen bestätigen die Erwartungen in der Praxis, Darmstadt, 2015.

- [5] Weber, I., Schönemann, M., Farny, A., Schröder, F., Wolff, A., Gill, B.: Explaining Flat-Specific Heating Energy Consumption by Building Physics and Behaviour. An Interdisciplinary Approach 2017; LoPa Working Paper Series No. 1, München; http://www.lokale-passung.de/wp-content/uploads/2017/05/WP_calculator.pdf
- [6] Wolff, A., Weber, I., Gill, B., Schubert, J., Schneider, M.: Tackling the interplay of occupants' heating practices and building physics: Insights from a German mixed methods study. *Energy Research & Social Science* (2017), Vol. 32, 65–75. (DOI: 10.1016/j.erss.2017.07.003)
- [7] *Ingenieure Süd GmbH*: Nachweis des Wärmeschutzes nach der EnEV und nach DIN 4108, DIN EN 832 und DIN 4701-10; Dokumentation Projekt Nr. I-0206 BV: Riem Messestadt, WA 2 und 4; München, 2007.

Autoren dieses Beitrages:

Dr. rer. nat. Franz Schröder, F.Schroeder@Metrona-Union.de
METRONA Wärmemesser Union GmbH
Aidenbachstraße 40
81379 München

Prof. Dr. Bernhard Gill, Bernhard.Gill@soziologie.uni-muenchen.de
Ludwig-Maximilians-Universität München
Sozialwissenschaftliche Fakultät
Institut für Soziologie
Konradstraße 6
80801 München

Dipl.-Ing. Martin Güth, Martin.Gueth@GEWOFAG.de
GEWOFAG Holding GmbH
Gustav-Heinemann-Ring 111
81739 München

Prof. Dr. rer. pol. habil. Tobias Teich, tobias.teich@fh-zwickau.de
Westfälische Hochschule Zwickau
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Dr.-Friedrichs-Ring 2A
08056 Zwickau

Anna Wolff M.A., anna.wolff@soziologie.uni-muenchen.de
Ludwig-Maximilians-Universität München
Sozialwissenschaftliche Fakultät
Institut für Soziologie
Konradstraße 6
80801 München

Interdisziplinäre Praxisforschung zur menschengerechten Gestaltung unserer Wohnlandschaften ist das Credo unter dem wir zusammenarbeiten: Sozial engagierte Daseinsvorsorger aus der Wohnungswirtschaft, akademische Forschungsinstitutionen der Fachrichtungen Wirtschaftsinformatik und Sozialforschung sowie ein Entwicklungsunternehmen für angewandte Meßtechnik in der Wohnungswirtschaft.

Seit fast einer Dekade sammeln die Westsächsische Hochschule Zwickau und METRONA Union gemeinsam Erfahrungen im Smart Metering und mit der Entwicklung im Allgemeininteresse nutzbarer Wohnungsdigitalisierung, zusammen mit Wohnungsgenossenschaften und kommunalen Wohnungsbaugesellschaften sowie der Soziologie der Ludwig-Maximilians-Universität München als Partner.

Die zukunftstaugliche Umgestaltung unserer Wohnlandschaften birgt dabei sowohl die ambitioniertesten Herausforderungen wie auch die vielversprechensten Chancen für einen wirksamen Anschlag der Energiewende, in dem Maße, wie die heute wirtschaftsdominierten Sektoren Industrie und Verkehr sich schrittweise an aktive Verkehrsvermeidung und nachhaltiges Energiemanagement werden anpassen können. Entsprechende sektorenübergreifende, volkswirtschaftlich motivierte Planungsvorgaben bilden einen wesentlichen Ansatz dahinzielend, den aufkommenden Klimawandel in Grenzen zu halten.

