Franz Schröder
Olaf Papert
Tobias Boegelein
Hendrikus Navarro
Bernhard Mundry

DOI: 10.1002/bapi.201410045

Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand

Wohnraumtemperaturen und Heizflächennutzung wurden bis dato kaum statistisch untersucht. Zusätzlicher Temperaturkomfort und Ablüftungswärmeverluste nehmen in modernen Gebäudehüllen messbar zu. Die vorliegende Studie basiert auf mehr als 1 Mio. Messungen durch elektronische Heizkostenverteiler (EHKV) in bauphysikalisch klassifizierten Gebäuden. Es entwickelt sich ein Trend von im Mittel 1 bis 1,5 K erhöhten Innenraumtemperaturen beim Übergang von alter (vor 1977) zu moderner Bausubstanz (bis EnEV 2002) und darüber hinaus. Der Temperaturtrend für unbeheizte Räume ist etwa das Doppelte von beheizten Räumen. Der Anteil jederzeit in Betrieb stehender Heizflächen im Winter vermindert sich von über 40 % auf unter 30 %, wobei Raumtemperaturen in modernen gedämmten Gebäudehüllen aber homogener ausgeprägt sind. Die relative Energieabgabe steht in guter Korrelation zu kumulierten Verbrauchsverteilungen der EHKV (DIN EN 834) wie auch zu flächenspezifischen Endenergieverbräuchen (EnEV). Verbrauchskennwerte und Temperaturanalysen bestätigen übereinstimmend, dass sich der mittlere Heizenergieverbrauch von nichtmodernisierter Bausubstanz (vor 1977) gegenüber Neubauten gemäß EnEV 2002 nur annähernd halbiert hat. Über 2002 hinaus wird die große Mehrzahl moderner Gebäude die vorgegebenen Energie*bedarfs*grenzen mit ihrem realen Energie*verbrauch* klar überschreiten: Kennzahlen über 50 kWh/(m^{2}a) für Heizung plus zukünftig mindestens 25 bis 30 kWh/(m^{2}a) für Trinkwassererwärmung werden die Regel bleiben. Der relative Einfluss individuellen Verbraucherverhaltens auf die Gesamtenergiebilanz gut wärmegedämmter moderner Gebäude wird immer weiter steigen, da die Beheizungsmodalitäten sich der unmittelbaren Wahrnehmung der Wohnungsnutzer weiter entziehen werden. Belegbar ist, dass sich bereits ein Fünftel des Gesamtenergieverbrauchs auf Einzelereignisse in Bereiche weit oberhalb durchschnittlicher Energieabgaben umverteilt hat und dass dieser Trend mit der Modernisierung der Bausubstanz voranschreitet. Energieeffiziente Gebäudehüllen rechtfertigen demnach nicht ein sorgloseres Nutzerverhalten beim Heizen sondern es ist angezeigt, Assistenzsysteme zur Vermeidung zusätzlich entstehender Energieverluste zu entwickeln.

Trends of the specific energy consumption and actual living room temperatures in view of an increasing degree of modernisation of the building stock. *Room-temperatures and heat-radiator-performance have statistically poorly been investigated yet. Additional temperature comfort and air ventilation losses seem to rise inside modern building enclosures. The present study refers to more than 1 million field measurements derived from electronical heat cost allocators (EHCA) within buildings of documented energy efficiency standard. We see a trend of 1 to 1,5 K rising median room-temperatures between old building standards (before 1977) and the modern EnEV2002 standard. Temperature increase is almost double as high within actually unheated-compared to actively heated rooms. The fraction of active heat radiators at any time during winter is decreasing from above 40 % to close below 30 %. At the same time the room temperatures are more homogenously distributed in modern buildings. The relative energy transfer appears well correlated to the yearly integral energy consumption (DIN EN 834) of the EHCA and also to the area-specific energy-ratings calculated from the primary energy consumption. Energy ratings and temperature measurements confirm that the average actual energy consumption starting from the oldest buildings (before 1977) up to the modern EnEV 02 standard has only been reduced by little less than 50 %. An extrapolated trend ahead from 2002 to EnEV 09 forecasts, that the future energy consumption (EnEV 2009 and further) will probably and clearly exceed the official claims concerning theoretical energy needs: Specific heat energy consumption above 50 kWh/(m^{2}a), plus at least 25 to 30 kWh/(m^{2}a) for domestic water heating, will remain the rule, indefinitely. On the other hand, potentially negative and unintentional influence of individual user behaviour on the integral energy consumption will further rise, because the energy-release into the living environment gets more and more disconnected from the human perception (bio-feedback). Almost one fifth of the energy-release has already moved into a region further above average energy-release-values in the course of EnEV 2002 standard and this trend will continue with EnEV 2009 an its followers. Highly effective building enclosures apparently do not justify a more carefree user attitude interacting with the flat heating. Concerning upcoming new unattended heat sinks one should consider to develop new assisting tools.*

1 Motivation

Welche Entwicklung nimmt der reale (Heiz)energieverbrauch mit der Modernisierung der Bausubstanz in Deutschland und welche Veränderungen ergeben sich u. U. im Detail für die räumliche Verteilung von Temperaturkomfort und Beheizungspraxis?

Diese Studie entwirft ein zusammenhängendes Bild von Wohnraumklimata, Wohnraumnutzung und Heizenergieverbrauch auf Basis breiter, unabhängig gewonnener, anonymer Statistikdaten, nämlich:

– Energieverbrauchsausweise für Wohngebäude, die reale flächenspezifische Heizenergieverbräuche dokumentieren,

– zufällig erhobene, repräsentative Einzelmessungen von Wohnraum- und Heizkörpertemperaturen mittels elektronischer Heizkostenverteiler (EHKV),
– dimensionslose, integrale und momentane Energieabgabemessungen in Wohnräumen mittels EHKV.

Diese Informationen liegen für vier bauphysikalische Baualtersklassen (BAK, zwischen 1900 und 2008) vor. Deren flächenspezifischer Endenergieverbrauch kann zusätzlich nach Gebäudegröße, d. h. nach Gebäudenutzfläche, gemäß EnEV differenziert werden.

Im Rahmen der öffentlichen Diskussion der Energiewende wird der Heizenergiebedarf privater Haushalte als wichtiges Thema begriffen. Nationale wie europäische Gesetzesinitiativen prognostizieren erhebliche Energieeinsparpotentiale und suchen deren Realisierung zu fördern. Die Fortschreibungen der Energieeinsparverordnung sehen weitere Reduzierungen des Energiebedarfs für Neubauten und modernisierte Gebäude vor, welche aber nach übereinstimmenden empirischen Beobachtungen zunehmend von den realen Endenergieverbrauchswerten nicht erreicht werden, z. B. [2], [4], [5], [6], [9], [10], [11].

Die vorliegende Studie legt wichtige Erkenntnisse offen, indem der Istzustand flächenspezifischer Energieverbrauchsverteilungen repräsentativer und geeignet zusammengefasster Baualtersklassen allgemeinzugänglich dokumentiert wird. Anschließend werden die typischen mittleren Heizflächen- und Wohnraumtemperaturen sowie die zugehörigen Verbrauchsverteilungen auf BAK-spezifische Unterschiede hin analysiert. In der Zusammenschau der Statistiken ergibt sich ein konsistentes Bild von Energieabgabe und Temperaturverteilungen in den Wohnumgebungen wie sie sich heute in der Realität darstellen und welcher Wandel beginnt.

Erwartungsgemäß wird das ingenieurtechnisch schwer fassbare Nutzerverhalten [12] und dessen unterstützende Beeinflussung wohl zukünftig eine wichtigere Rolle spielen. In diesem Kontext warten auch auf die Abrechnungsdienstleister neue Aufgaben, insofern sie bei Wohnungsgesellschaften, Immobilieneigentümern und Wohnungsnutzern die Einsicht in die Realitäten und Notwendigkeiten von „Heizgemeinschaften“ innerhalb verschiedener Wohnumgebungen fördern helfen können. Dabei sollte aufgezeigt werden, wie zum Nutzen aller sinnvolle Modernisierungsmaßnahmen, moderne Heizanlagenbetriebsführung und bewusstes Nutzerverhalten zur Energieeffizienzsteigerung und -einsparung ineinandergreifen können.

2 Methodiken

2.1 Spezifische Energieverbrauchskennzahlen

Wie lässt sich eine kompakte, pragmatische Darstellung von spezifischen Verbrauchskennzahlen über Baualtersklassen entwerfen?

Der flächenspezifische Endenergieverbrauch von Gebäudeobjekten bildet den Dreh- und Angelpunkt zu deren energetischer Bewertung und Verfolgung der Energieeffizienzentwicklung im Wohnungsbestand. Die *Universellen Energiekennzahlen* [1]–[4] ermöglichen u. a. die Darstellung deutschlandweit repräsentativer Energieverbrauchskennzahlen für folgende Baualtersklassen (BAK):

– nichtmodernisierte Gebäude bis Baujahr 1977 „OLD_77“
– nichtmodernisierte Gebäude Baujahre 1978 bis 1994 „78_94“
– Neubauten der Baujahre 1995 bis 2001 WSVO_95“
– Neubauten der Baujahre 2002 bis 2008 „EnEV_02“.

Jede Baualtersklasse wird zusätzlich unterteilt in fünf Größenklassen gemäß ihrer Gebäudenutzfläche, nämlich 50 bis 200 m^2, 200 bis 400 m^2, 400 bis 700 m^2, 700 bis 1500 m^2 und > 1500 m^2. Diese Differenzierung entspricht in aller Regel auch einer Klassifizierung nach Anzahl der Wohneinheiten von 1–3, 2–5, 4–10, 10–20 und > 20 Wohneinheiten, sofern von überwiegend privater Wohnnutzung ausgegangen werden kann.

Im Hinblick auf eingesetzte Energieträger wird unterschieden zwischen einerseits kesselbeheizten Wohnanlagen (Gas oder Öl) sowie andererseits mit Fern- oder Nahwärme versorgten Objekten. Dokumentiert werden insgesamt 40 Gebäudeklassen mit Angabe von Mittelwerten, Medianen, 10 %- und 90 %-Quantilen, statistischen Stärken und Standardabweichungen, Bilder 1 und 2, Tabellen 1 und 2. Die Daten stellen damit auch ein bundesweit anwendbares Äquivalent zu allen etablierten kommunalen und regionalen Heizspiegeln dar, wobei zusätzlich alle Energievergleichskennwerte nach BAK differenziert angegeben werden. In der Vorgängerversion der *Universellen Energiekennzahlen* sind sie seit 2010 der öffentlichen Forschung zugänglich gemacht worden [5].

2.2 Wohnraum- und Heizkörpertemperaturen

Elektronische, nichtfunkende Heizkostenverteiler (EHKV) liefern quasi-zufällig und anonym Temperaturmessungen im Rahmen eines technischen Selbsttests und nur einmal jährlich zum Zeitpunkt der Auslesung durch den Wärmedienst. Sie vermitteln so in ihrer Gesamtheit einen statistisch repräsentativen „Schnappschuss“ über die in Wohnungen zu bestimmten Jahreszeiten vorherrschenden Tagestemperaturen der Raumluft, TL, und an den Heizflächen, TH, indem diese von den Messungen des raumseitigen Fühlers und des Heizkörperfühlers im EHKV abgeleitet werden.

Die Datengesamtheit dieses Teils der Studie umfasst 1,5 Mio. Einzelmessungen, gewonnen jeweils während der Wintermonate von November bis März innerhalb der vergangenen Dekade. Diese Messungen beziehen sich hier ausschließlich auf einen Teil derjenigen Gebäude, die auch zur Zusammenstellung der dokumentierten Energiekennzahlen herangezogen wurden, können also den verschiedenen Gebäudeklassen zugeordnet werden.

Unterschieden wird außerdem zwischen Messungen in räumlichen Umgebungen mit gerade aktiven – also Energie abgebenden – Heizflächen und solchen, in denen gerade kein Heizbetrieb stattfindet. Als Maß für diese Unterscheidung dient konkret der Temperaturunterschied $DT \equiv (TH - TL)$ zwischen Raumlufttemperatur TL und Heizkörpertemperatur TH. Definiert wird in Anlehnung an die DIN EN 834: Heizkörperbetrieb entspricht $DT \geq 5$ K, Nichtbetrieb $DT < 5$ K. Dadurch können näherungsweise und vereinfacht „beheizte“ und momentan aktiv bewohnte Räume von „unbeheizten“ und momentan eher nicht bewohnten Räumen unterschieden werden. Die anschließende statistische Analyse besteht im Wesentlichen darin, die charak-

teristischen Häufigkeitsverteilungen für TL, TH und DT in Abhängigkeit sowohl vom Betriebszustand des Heizkörpers als auch von den betrachteten BAK quantitativ zu vergleichen. Daraus lassen sich systematische Trends ableiten.

2.3 Integrale und momentane Energieabgabe

Zusätzlich zu den Temperaturverteilungen werden die an den einzelnen Messstellen anfallenden relativen (EHKV-spezifischen) Verbrauchseinheiten (VE) und auch deren Anzahlverteilungen in die Analyse mit einbezogen. Diese Verbrauchseinheiten können – entsprechend dem originären Anwendungszweck gemäß DIN EN 834 – als relatives Maß für die integrale Energieabgabe (über ein Jahr) betrachtet werden.

Speziell vier Verbrauchsverteilungen werden jeweils für die vier BAK generiert und anschließend mithilfe der jeweils mittleren Gesamtverbräuche jeder BAK normiert. Als Resultat entstehen „normierte Verbrauchsspreizungen“ um den Wert Eins, die im Hinblick auf besonders kleine bzw. hohe Werte zwischen den Baualtersklassen signifikante Unterschiede aufweisen, welche wiederum auf unterschiedliche Trends der Heizungsbenutzung in Gebäuden unterschiedlicher BAK hinweisen. Die Identifizierung solcher Trends ist mitentscheidend für die Einschätzung aktueller und zukünftiger Nutzerverhaltensweisen in unterschiedlich modernisierter Bausubstanz. Folgerichtig haben sie auch Bedeutung für zukünftige Ausgestaltungen verbrauchsorientierter Abrechnungsverfahren.

3 Ergebnisse

3.1 Flächenspezifischer Energieverbrauch nach Baualtersklassen (BAK)

Wie stark hat sich der Heizenergieverbrauch im Gebäudebestand von nominell nichtmodernisierten Altbauten bis hin zum EnEV 2002-Standard bislang verändert?

Die Bilder 1 und 2 sowie Tabellen 1 und 2 enthalten zusammengefasst die deutschlandweit repräsentativen differenzierten Energieverbrauchskennzahlverteilungen für die reine Raumbeheizung sowie für die Trinkwassererwärmung, jeweils in Abhängigkeit von der BAK. Bilder und Tabellen sind getrennt jeweils für (a) Kessel-(ÖL und Gas) bzw. (b) Fernwärmebeheizung. Insgesamt sind rund 140.000 BAK-differenzierte Verbrauchskennzahlen-Datensätze dargestellt, dies entspricht etwa 40 % des insgesamt betrachteten Kennzahlenfundus‘. Deren statistische Stärke teilt sich folgendermaßen auf: 125.000 für Kesselheizungen und 15.000 für Fernwärmeversorgungen, wobei die relativen Bestandsanteile nach BAK OLD77, 78_94, WSVO95 und EnEV02 mit je etwa 2/3, 1/6, 1/6 und 1/30 vertreten sind.

Bild 1 und Tabelle 1 illustrieren anhand von Summenhäufigkeitskurven und numerischen Werten die Variabilität der Heizenergieverbrauchsverteilungen. Für Kesselheizungen variieren die Mediane (50 %-Quantile) zwischen minimal etwa 65 kWh/(m^{2}a), und maximal etwa 155 kWh/(m^{2}a), Die arithmetischen Mittelwerte liegen dabei typisch um 5 kWh/(m^{2}a) höher. Differenziert nach BAK (EnEV_02 bis OLD_77) gruppieren sich die Mediane ohne Überschneidungen in Intervallen von etwa [65–80], [85–105], [115–130] und [135–155] kWh/(m^{2}a). Innerhalb der BAK variieren die Mediane also in Abhängigkeit von der Objektgröße typisch um 15–20 kWh/(m^{2}a). Die empirischen Standardabweichungen, d. h. in Bild 1(a) auch die sichtbare horizontalen Neigungen der Kurven, vermindern sich über die BAK (von alt zu neu) von etwa 45 bis 60 kWh/(m^{2}a) bis hin zu 30 bis 45 kWh/(m^{2}a). Die Grenzen hin zu den jeweils 10 % energetisch günstigsten sowie 10 % ungünstigsten Objektwerten, nämlich jeweils die 10 %- sowie 90 %-Quantilwerte, liegen BAK-abhängig jeweils zwischen [40–45], [55–65], [75–85] und [90–100] kWh/(m^{2}a) sowie zwischen [100–140], [135–185], [170–200] und [190–230] kWh/(m^{2}a). Charakteristisch gut zu erkennen ist, dass die BAK sich am deutlichsten voneinander abheben unter den optimierten Objekten (10 %-Quantile), während sich hin zu den energetisch schlechteren Objekten (90 %-Quantile) die Differenzierung relativiert; entsprechend zu erkennen an teilweisen Überschneidungen zwischen verschiedenfarbigen Kurven.

Die Verteilungen für *Fernwärmeheizungen* (Bild 1, rechts) basieren auf einer um eine Größenordnung geringeren Objektdatenmenge, wobei die untersten beiden Größenklassen statistisch schwächer belegt sind. Andererseits stehen sie für deutlich größere Wohnanlagen mit durchschnittlich drei- bis vierfach zahlreicheren Nutzeinheiten, z. B. [1], und damit ebenso für einen substantiellen Anteil am gesamten Wohnraumbestand. Die Mediane der Fernwärmeverteilungen variieren zwischen minimal etwa 54 kWh/(m^{2}a) und maximal etwa 130 kWh/(m^{2}a), liegen demnach typisch 15 bis 30 kWh/(m^{2}a) unter denen für Kesselanlagen, weil vor Ort keine Energieverfeuerungsverluste anfallen. Die arithmetischen Mittelwerte liegen um typisch um 5–10 kWh/(m^{2}a) über den Medianen. Differenziert nach BAK (EnEV_02 bis zu OLD_77) gruppieren sich die Mediane Intervallen von etwa [54–64], [60–80], [85–95] und [105–130] kWh/(m^{2}a). Innerhalb der BAK variieren die Mediane in Abhängigkeit von der Objektgröße uneinheitlicher, d. h. von 10–25 kWh/(m^{2}a). Die empirischen Standardabweichungen vermindern sich über die BAK von etwa 35–70 kWh/(m^{2}a) bis hin zu 20–35 kWh/(m^{2}a). Die Grenzen hin zu den jeweils 10 % energetisch besten sowie 10 % ungünstigsten Gebäudeobjektwerten liegen BAK-abhängig jeweils zwischen [25–38], [40–55], [50–60] und [65–80] kWh/(m^{2}a) sowie zwischen [85–105], [110–140], [120–160] und [155–200] kWh/(m^{2}a). Die Differenzierung zwischen den BAK ist weniger deutlich ausgeprägt als bei Kesselheizungen, insbesondere bei den jüngeren BAK EnEV_02 und WSVO_95.

Zur Dokumentation des Energieverbrauchs für eine gekoppelte zentrale Trinkwassererwärmung dienen Bild 2 und Tabelle 2. Um die im Vergleich zum Heizenergieaufwand geringeren Unterschiede adäquat sichtbar zu machen, wurde die klassische Häufigkeitsverteilung als „Glockenkurve“ gewählt. In der Graphik, nicht aber in der Tabelle, werden alle Gebäudegrößen zu einer Verteilung pro BAK zusammengefasst. Die Häufigkeitsverteilungen dokumentieren einen messbaren Trend des Energieeinsatzes im Übergang von alter zu neuer Bausubstanz: Zu erkennen ist dies an der leichten Linksverschiebung der Modalwerte und der Kurven insgesamt.

Für *Kesselheizungen* (Bild 2, links) lässt sich der Trend mit minus 3 bis 4 kWh/(m^{2}a) quantifizieren, der effektive Mittelwert des flächenspezifischen Verbrauchs sinkt dabei

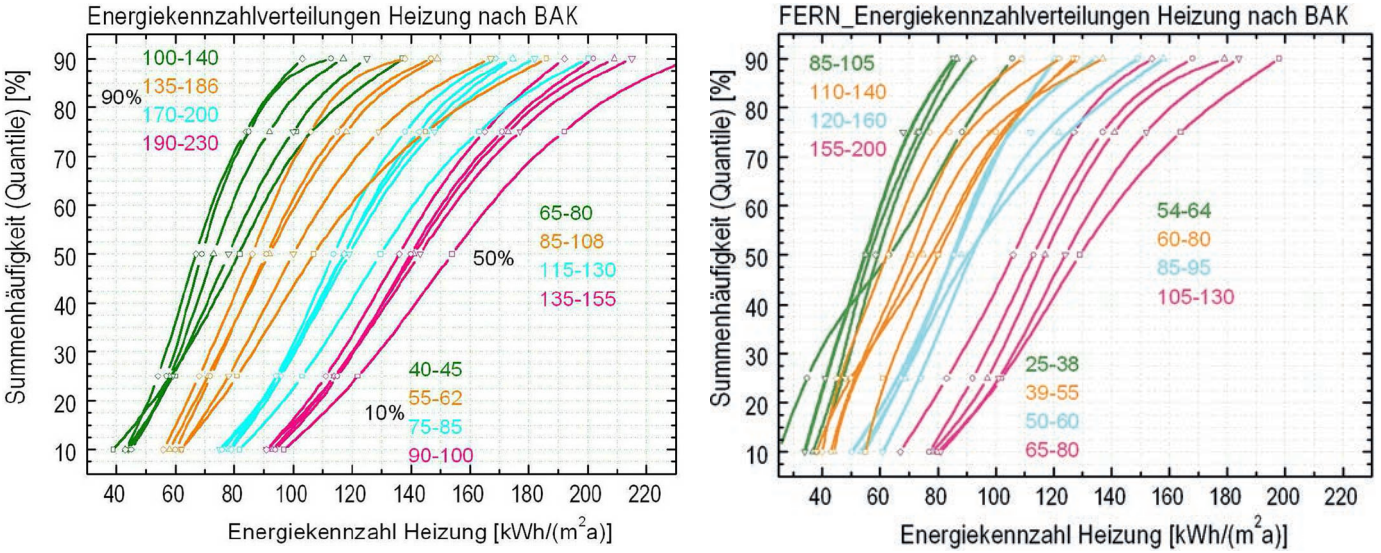

Bild 1. Summenhäufigkeitsverteilungen Energiekennzahlen Raumheizung für (links) Kesselheizungen (Gas, Öl) und (rechts) Fernwärme in Deutschland; rot – BAK OLD_77, hellblau – 78_94, orange – WSVO95, grün – EnEV02. Gleichfarbige Kurven repräsentieren 5 von rechts nach links zunehmende Gebäudegrößen.
Fig. 1. Frequency distributions of specific energy ratings for room heating: gas or oil heated buildings (left), and community heating (right); red – BAK OLD_77, blue – 78_94, orange – WSVO95, green – EnEV02. Curves of equal colour represent 5 increasing building sizes from the right to the left.

Tabelle 1. Energiekennzahlen Raumheizung für Kesselheizungen (GAS und ÖL) und Fernwärme in kWh/(m²a), s. Bild 1
Table 1. Energy ratings room heating for gas or oil heating and community heating in kWh/(m²a), see Fig. 1

BAK & Größe	<----------KESSELHEIZUNGEN---------->						<----------FERNWÄRME---------->					
OLD_77	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=87200*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	STABW	*N=7100*
< 200 m²	97	**154**	235	**162**	60	*11700*	80	**129**	198	**140**	60	*300*
200-400 m²	91	**143**	215	**150**	54	*37800*	81	**124**	184	**129**	46	*1300*
400-700 m²	93	**141**	209	**148**	53	*21400*	78	**117**	179	**125**	49	*1700*
700-1500 m²	94	**140**	202	**146**	50	*11800*	77	**113**	168	**122**	56	*1900*
> 1500 m²	91	**136**	192	**141**	44	*4500*	67	**106**	154	**108**	36	*1900*
78_94	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=19500*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	STABW	*N=1990*
< 200 m²	82	**130**	200	**137**	52	*1300*	62	**103**	239	**130**	66	*40*
200-400 m²	75	**119**	182	**126**	46	*6700*	61	**91**	149	**107**	80	*200*
400-700 m²	78	**117**	175	**124**	47	*5700*	53	**88**	158	**98**	45	*250*
700-1500 m²	79	**117**	174	**123**	41	*3900*	55	**86**	134	**93**	52	*400*
> 1500 m²	76	**114**	169	**119**	40	*1900*	50	**86**	121	**87**	33	*1100*
WSVO_95	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=17300*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	STABW	*N=1980*
< 200 m²	62	**107**	186	**115**	47	*900*	55	**80**	127	**91**	41	*40*
200-400 m²	62	**100**	167	**108**	44	*4700*	38	**80**	128	**82**	36	*240*
400-700 m²	58	**92**	149	**99**	40	*6100*	44	**75**	137	**83**	38	*400*
700-1500 m²	60	**91**	147	**98**	38	*3900*	43	**71**	122	**78**	36	*600*
> 1500 m²	56	**86**	138	**94**	48	*1700*	40	**63**	109	**70**	34	*700*
ENEV_02	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	STABW	*N=2860*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	STABW	*N=620*
< 200 m²	39	**82**	137	**88**	47	*120*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*
200-400 m²	44	**78**	125	**83**	35	*640*	25	**63**	106	**64**	33	*50*
400-700 m²	43	**73**	117	**78**	31	*950*	38	**58**	92	**64**	23	*130*
700-1500 m²	43	**67**	103	**72**	29	*830*	38	**54**	85	**59**	20	*240*
> 1500 m²	45	**69**	113	**77**	37	*320*	34	**55**	85	**57**	22	*200*

von 28 auf 24 kWh/(m²a) oder um etwa 15 %. Im Einklang mit früheren Studien [3], [5], welche die Warmwasserbereitung in modernen BAK mit etwa einem Drittel am Gesamt-Heizenergieaufwand beziffern, entspräche dies insgesamt einer Reduzierung um einzelne Prozentpunkte, insgesamt aber deutlich weniger als 5 %.

Für Fernwärmeheizungen gelten vergleichbare Beobachtungen wie bei Kesselheizungen: Durchschnittlich ergeben sich minus 4 kWh/(m²a) von OLD_77 bis zu EnEV_02, der effektive Mittelwert des flächenspezifischen Verbrauchs sinkt von 23 auf 19 kWh/(m²a) oder um ebenfalls 15 %. Im Unterschied zu den Kesselanlagen fällt die empirische Standardabweichung bei den Fernwärmeobjekten durchgehend 20 % niedriger aus, d. h. sie liegt deutlich unter 10 kWh/(m²a) im Vergleich zu deutlich über 10 kWh/(m²a) bei Kesselanlagen. Dieser Umstand ist wohl der durchgehend mehrfach größeren Anzahl angeschlossener Wohnungseinheiten in Fernwärmeobjekten zuzuschreiben.

Wegen der heute noch generellen Unschärfe bei der messtechnischen und/oder konventionellen Warmwasser-Abtrennung in der Praxis und den hier überschaubar klei-

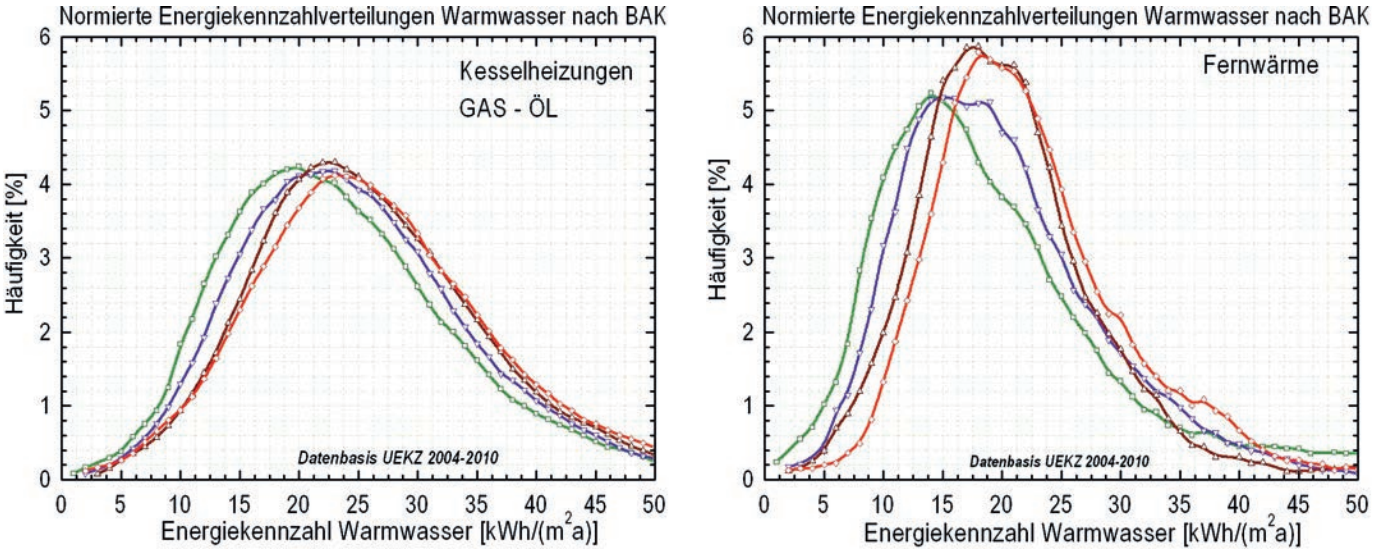

Bild 2. Häufigkeitsverteilungen Energiekennzahlen Trinkwassererwärmung für (links) Kesselheizungen (Gas/Öl) und (rechts) Fernwärme; rot – BAK OLD_77, braun – 78_94, lila – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 2. Frequency distributions of specific energy ratings for water warming gas or oil heated buildings (left), and community heating (right); red – OLD_77, brown – 78_94, purple – WSVO95, green – EnEV02

Tabelle 2. Universelle Energiekennzahlen Trinkwassererwärmung für Kesselheizungen (Gas und Öl) und Fernwärmeversorgung in kWh/(m²a), s. Bild 2, differenziert nach 5 Gebäudegrößenklassen
Table 2. Universal Energy Ratings for water warming; gas- or oil heating and community heating in kWh/(m²a), see Fig. 2, specified for 5 building size classes

BAK & Größe	<----------KESSELHEIZUNGEN---------->						<----------FERNWÄRME---------->					
OLD_77	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=46200*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=3050*
< 200 m²	14	**26**	43	**28**	12,5	*7100*	12	**22**	36	**24**	10,8	*100*
200-400 m²	14	**25**	41	**27**	11,7	*22300*	14	**22**	34	**24**	10,1	*450*
400-700 m²	15	**26**	41	**27**	12,1	*9700*	12	**21**	35	**22**	9	*650*
700-1500 m²	16	**27**	43	**29**	13	*5000*	13	**21**	34	**23**	9,2	*750*
> 1500 m²	18	**28**	41	**29**	14,4	*2100*	14	**20**	34	**22**	9	*1100*
78_94	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=12900*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=1440*
< 200 m²	14	**25**	42	**27**	12,2	*950*	15	**23**	31,8	**25**	8,9	*20*
200-400 m²	13	**24**	40	**26**	11,2	*4800*	13	**21**	33	**24**	13,3	*120*
400-700 m²	15	**26**	39	**27**	10,9	*3600*	11	**20**	33	**22**	11,9	*130*
700-1500 m²	16	**26**	40	**27**	10,3	*2300*	11	**20**	32	**21**	8,7	*230*
> 1500 m²	19	**28**	40	**29**	9,7	*1200*	12	**19**	27,5	**20**	7,9	*940*
WSVO_95	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=12500*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=1500*
< 200 m²	11	**23**	41	**25**	12,9	*630*	7	**16**	22	**16**	8,3	*30*
200-400 m²	13	**23**	39	**25**	11	*3600*	11	**19**	28	**20**	8	*140*
400-700 m²	14	**24**	39	**26**	10,7	*4200*	11	**17**	32	**20**	9	*290*
700-1500 m²	14	**24**	37	**25**	9,7	*2900*	11	**19**	32	**20**	7,9	*500*
> 1500 m²	14	**24**	38	**25**	10,1	*1200*	11	**19**	32	**20**	8,7	*550*
ENEV_02	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=2400*	Q10	**Median**	Q90	**Mittel**	Stabw	*N=420*
< 200 m²	9	**23**	44	**25**	14,9	*80*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*	*no data*
< 400 m²	12	**22**	38	**24**	10,6	*500*	7	**16**	23	**16**	6	*40*
400-700 m²	13	**22**	37	**23**	9,7	*800*	10	**14**	29	**17**	9,3	*130*
700-1500 m²	12	**22**	35	**23**	9,7	*700*	9	**17**	26	**17**	7,2	*150*
> 1500 m²	14	**25**	38	**25**	9,2	*280*	10	**24**	40	**24**	10,6	*100*

nen Wertediskrepanzen erübrigt sich in vielen Fällen eine entsprechende Differenzierung des absoluten Warmwasseranteils. Bei vielen Anwendungen oder Analysen ist es ausreichend, sich auf einheitliche Durchschnittswerte und Streubreiten für alle BAK zu beziehen.

Zusammenfassend illustriert dieser Abschnitt, dass die Energieverbrauchskennzahlen für den reinen Heizbetrieb sich vom vorwiegend nichtmodernisierten Altwohnungsbestand bis hin zur EnEV_02 annähernd halbiert haben, nämlich von typisch 140 kWh/(m²a), über 120 kWh/(m²a) und 90 kWh/(m²a), auf etwa 70 kWh/(m²a). Jeweils zwischen den beiden älteren und den beiden jüngeren BAK wurden typische Verbesserungen um 20 kWh/(m²a) realisiert, während die stärkste Reduktion von gut 30 kWh/(m²a) mit der Inkraftsetzung der WSVO1995 erreicht worden ist. Unter Einbeziehung des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung, der sich im Zuge der bauphysikalischen Entwicklung weniger vermindert hat, liegt die Reduktion des gesamten Energieverbrauchs für Heizung plus Warmwasserbereitung durchschnittlich näher bei 40 % und ist damit hinter den auf Energie*bedarfs*berechnungen beruhenden Annahmen zurückgeblieben.

3.2 Reale Raumtemperaturverteilungen in Wohnungen

Verändern sich typische Wohnraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Baustandard eines Gebäudes?
Die Innenraumtemperierung in Wohngebäuden ist der maßgebliche Faktor für den Heizenergiekonsum insgesamt. Dabei bestimmt primär der Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenluft – im Winter zwischen November und März sind es durchschnittlich etwa 16 K – die benötige Menge an Heizenergie und jedes Grad darüber hinaus realisierte Innentemperatur vermehrt den Verbrauch um etwa 1/16 oder 6 %. Welche Temperaturverhältnisse sich im Detail in Wohnraumumgebungen einstellen, hängt wesentlich vom Temperaturempfinden der Bewohner und ihrer daraus resultierenden Interaktion mit Stellgliedern der Anlage sowie Fenstern und Außentüren ab. Befindlichkeiten des Menschen umfassen neben Kälte- und Hitzeintoleranz auch Unwohlsein, welches durch Gerüche, Feuchte, CO_2-Überschuß und auch Überwärmung bedingt sein- und zu spontanem und ggf. häufigem Ablüften größerer Wärmemengen animieren kann. Unabhängig davon, welche Mechanismen im Einzelfall wirksam sein können, ist es zunächst interessant, nach einer statistischen Signatur zu suchen, die eine systematisch signifikante Veränderung von Raumtemperaturen in modernerer Bausubstanz belegen könnte. Entsprechende Hinweise hatten Vorstudien bereits geliefert [8], [9] und sollen hier weitergehend untersucht werden. Im gegebenen Fall entstünde so auch eine erste konkrete Handhabe, den Heizenergieverbrauch bezogen auf die unterschiedlichen Baualtersklassen zu bewerten und speziell relative Einsparpotentiale abzuschätzen.

Bild 3 zeigt zunächst die normierten statistischen Temperaturverteilungen von TL in Abhängigkeit von der BAK. Tabelle 3 enthält ergänzende numerische Kennwerte der Verteilungen. Zusätzlich eingefügt in Bild 3 ist die Raumtemperaturverteilung einer älteren empirischen Erhebung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP über etwa 70 Gebäude und mindestens eine Wintersaison [8]. Jene Kurve repräsentiert im Wesentlichen Objekte mit ausgewiesenem Niedrigenergiehaus-Standard, der damit ein noch über die EnEV 2002 hinausgehendes Anforderungsniveau repräsentieren soll. Die Temperaturverteilungen nach BAK erscheinen deutlich differenziert mit einer systematischen Verschiebung der Modal-, Median- und Mittelwerte hin zu höherem TL mit abnehmendem Alter der BAK. Die absolute Verschiebung macht insgesamt etwa zwischen 1 bis 1,5 K betreffend OLD_77 bis hin zum EnEV_02-Standard aus.

Die weitere scheinbare Diskrepanz um etwa 1 K bis zur Fraunhofer-Kurve kann hingegen *nicht* als absoluter Wert gelten, weil unterschiedliche experimentelle Systematiken und die Verwendung unterschiedlicher Temperaturmesssensoren und -verfahren zugrunde liegen. Auch die Streubreite der grauen Kurve fällt deshalb geringer aus, weil sie auf einer weit geringeren Anzahl von Gebäudeob-

Tabelle 3. Numerische Statistikparameter betreffend Raumtemperaturverteilungen TL, Heizkörpertemperaturverteilungen TH und integrale Verbrauchsverteilungen VE
Table 3. Numerical statistic parameters concerning room- (TL) and heat-radiator- temperature (TH) distributions as well as integral consumption distributions

Raumtemperaturen TL: Abschnitt 3.2 WINTER NOV - MRZ (Abb. 3, 4, 5)	OLD_77	_78_94	WSVO_95	ENEV_02
Anzahl Gesamtheit N (ALL) [#]	800000	320000	210000	60000
Mittelwert TL ALL [°C]	18,1	18,4	18,7	18,9
Median TL ALL [°C]	17,9	18,1	18,4	18,7
Anzahl Heizung aus N [(OFF) [#]	460000	193000	139000	40000
Mittelwert TL OFF [°C]	17,2	17,6	18,1	18,4
Median TL OFF [°C]	17,4	17,9	18,4	18,6
Anzahl Heizung an N [(ON) [#]	340000	123000	69000	17000
Mittelwert TL ON [°C]	18,8	18,9	19,2	19,3
Median TL ON [°C]	19,2	19,5	19,7	19,8
Heizflächentemperaturen TH: Abschnitt 3.3 WINTER NOV - MRZ (Abb. 6 -10)	OLD_77	_78_94	WSVO_95	ENEV_02
Anzahl Gesamtheit N (ALL) [#]	800000	320000	210000	60000
Mittelwert TH ALL [°C]	27,7	27,1	26	25,2
Median TH ALL [°C]	21,2	20,8	20,2	20
Anteil "ON" *Winter NOV bis MRZ*	42%	39%	33%	30%
Anteil "OFF" *Winter NOV bis MRZ*	58%	61%	67%	70%
Anteil "ON" *APR, MAI, SEP, OKT*	14%	10%	9%	6%
Anteil "OFF" *APR, MAI, SEP, OKT*	86%	90%	91%	94%
Jahresverbrauch (DIN834): Abschnitt 3.4 Gesamtjahr JAN - DEZ , (Abb. 11-13)	OLD_77	_78_94	WSVO_95	ENEV_02
Anzahl Gesamtheit N (ALL) [#]	840000	325000	272000	68000
Mittlere VE [VE/a/Messstelle]	1010	830	740	600
Relativer Anteil bezogen auf BAK OLD_77	100%	82%	73%	59%
Nie betriebene Heizstellen: VE = 0	17%	17%	15%	16%
Nie oder marginal, VE/Jahr < 20	24%	26%	26%	27%

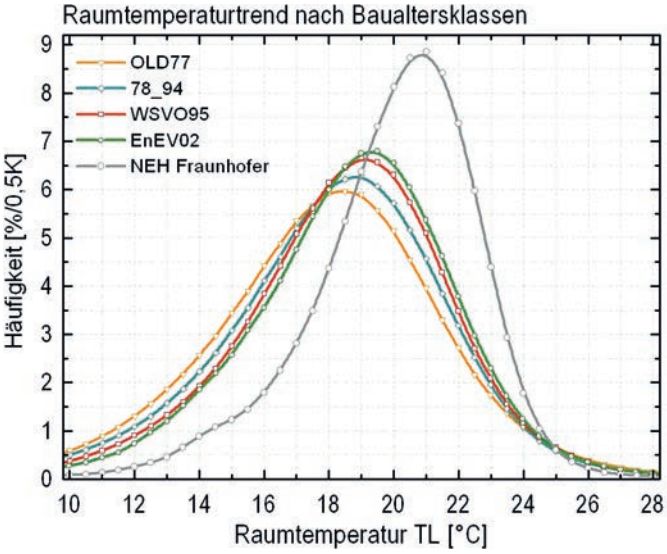

Bild 3. Tages-Raumtemperaturverteilungen TL für 5 verschiedene BAK von November bis März; orange –OLD_77, blau – 78_94, rot – WSVO95, grün – EnEV02, grau – Niedrigenergiehausstandard (< 70 Objekte, nach [8])
Fig. 3. Statistical room temperature distributions TL (at daytime) for 5 different BAK, November to March; orange – OLD_77, blue – 78_94, red – WSVO95, green – EnEV02, grey – nearly zero-energy building standard (< 70 objects, see [8])

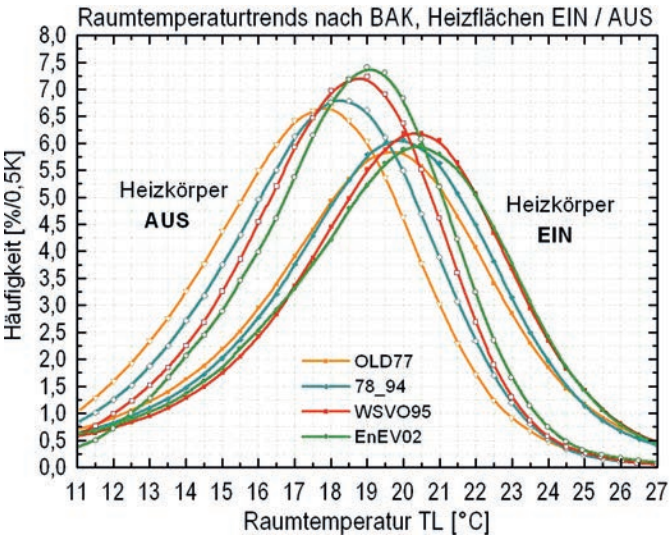

Bild 4. Statistische Raumtemperaturverteilungen TL für 4 verschiedene BAK, November bis März, s. Bild 3, unterteilt in zwei statistische Untergruppen: Heizkörper „in Betrieb“ und „außer Betrieb“; orange – OLD_77, blau – 78_94, rot – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 4. Statistical room-temperature distributions TL for five different BAK, during months November to March (as Fig. 3), but separated into two statistical sub-goupes: “heat radiator under operation” and “heat radiator off”; orange – OLD_77, blue – 78_94, red – WSVO95, green – EnEV02

jekten und damit weit eingeschränkteren Menge von individuellen Wohnraumumgebungen und Temperaturszenarien beruht. Die BRUNATA- und Fraunhofer-Temperaturverteilungen sind untereinander also eher nur qualitativ vergleichbar. Sie sollen im Wesentlichen die Fortsetzung des Raumtemperatur-Aufwärtstrends im Übergang zu besser gedämmten Gebäudehüllen bekräftigen.

Bild 4 präsentiert die Raumtemperaturverteilungen unterschieden nach solchen Messstellen (Heizkörpern), die sich zum Zeitpunkt der Messung im Heizbetrieb befinden oder nicht. Diese Darstellung soll quantifizieren helfen, wie groß die typische oder mittlere Temperaturdifferenz zwischen „momentan beheizten“ und „momentan nicht beheizten“ Räumen in den vier BAK ausfällt. In der Tat zeigt sich auch in der Diskrepanz „beheizter“ zu „unbeheizter“ Umgebung ein abnehmender Trend mit der BAK. Die numerischen Details sind ebenfalls in Tabelle 3 dokumentiert.

Zusammenfassend illustriert Bild 5 die quantitativen Trends von Mittel- und Medianwerten der Raumlufttemperaturen in momentan unbeheizten, beheizten und allen Räumen gemeinsam. Es zeigt sich, dass der stärkste Trend mit annähernd 1,5 K Kontrast zwischen etwa 17 und 18,5 °C die unbeheizten Räume betrifft, während die momentan beheizten Umgebungen im Mittel nur einen 0,5 K-Erwärmungseffekt, von 19 auf 19,5 °C, erfahren haben. Im Schnitt ergibt sich dann für alle Räume ein 1 K-Trend von knapp 18 °C hin zu knapp 19 °C Raumtemperatur.

Damit ergibt sich der empirisch-statistische Beleg für eine Homogenisierung, d. h. Angleichung der Raumtemperaturen innerhalb von Gebäuden und Wohnumgebungen mit steigendem Modernisierungsgrad. Liegen zwischen beheizten und unbeheizten Räumen in BAK OLD_77 statistisch noch etwa 2 K, so hat sich diese mittlere Diskrepanz

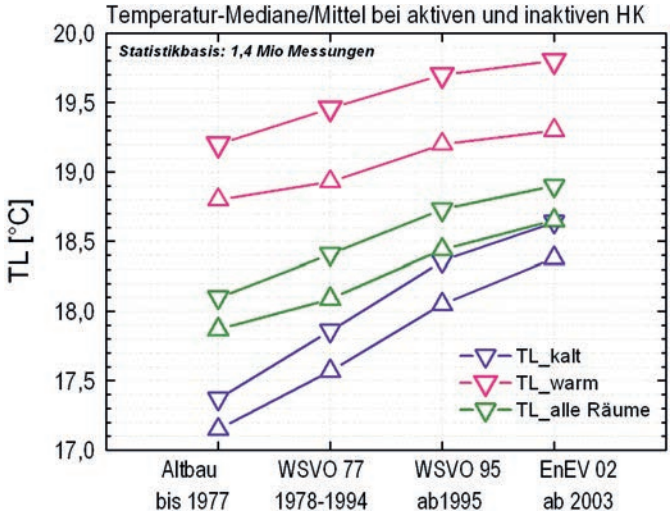

Bild 5. Trend der Mittelwerte (▲) und Mediane (▼) der Raumtemperaturen TL über die vier verschiedenen BAK, differenziert für „beheizte“ (rot), „unbeheizte“ (lila) sowie alle Wohnräume (grün).
Fig. 5. Trends of Averages (▲) and Medians (▼) of reported room temperature, over four different BAK, separated for “heated” (red), “unheated” (purple), and “all” rooms (green).

bis BAK EnEV02 annähernd auf 1 K halbiert. In der logischen Fortsetzung dieses Trends wäre zu erwarten, dass sich mit der bauphysikalischen Weiterentwicklung die Temperaturkontraste weiter vermindern und innerhalb zukünftiger Wohnumgebungen fast einheitlich die *höheren* Raumtemperaturen realisiert sein werden, unter denen sich die Bewohner vorzugsweise aufhalten. Die Homogenisierung, d. h. die Vereinheitlichung der Raumtemperaturen, der Wohnraumtemperierung als *ein* Ausdruck des Nutzerverhaltens, scheint also auf dem Weg zu sein, was umge-

kehrt aber nicht unbedingt für die Beheizungspraktiken, d. h. die Verteilung und Ausnutzung der Wärmequellen, gilt. Deren Entwicklung wird in den Folgeabschnitten behandelt.

3.3 Heizflächentemperaturverteilungen in Wohnräumen

Verändern sich die Verteilung und Nutzung der Raumwärmequellen mit steigendem bauphysikalischen Modernisierungsstand – und im gegebenen Fall wie?

Bild 6 zeigt dazu zunächst die vier normierten Häufigkeitsverteilungen der *Heizflächen*temperaturen TH für die vier untersuchten BAK. Im Vergleich mit Bild 3 ist direkt zu sehen, dass die TH-Kurven in der Mehrheit der Fälle (zwischen 10 °C und 30 °C: „kalte“ Heizflächen) ähnlich verlaufen wie die TL-Raumtemperaturkurven und sich nur für die Minderzahl der Fälle deutlich in den Temperaturbereich oberhalb von 30 °C ausdehnen. Nur letzterer umfasst also diejenigen Fälle, in denen die Heizflächen arbeiten („warme“ Heizflächen), d. h. Heizenergie zur effektiven Raumerwärmung abgeben. Allein aus den Flächenverhältnissen ist grob einschätzbar, dass die Raumerwärmung zu jedem Zeitpunkt von mindestens weniger als der Hälfte bis hinunter zu einem Viertel aller Heizflächen bewerkstelligt wird.

Bild 7 – mit geteilter Ordinate – und Tabelle 3 heben die systematischen Unterschiede hervor, die sich zwischen den Häufigkeitsverteilungen von TH der einzelnen BAK ergeben. Qualitativ zu erkennen ist die relative Zunahme ausgeschalteter Heizflächen gegenüber den aktiven mit zunehmender Modernität der Baualtersklasse: Je moderner

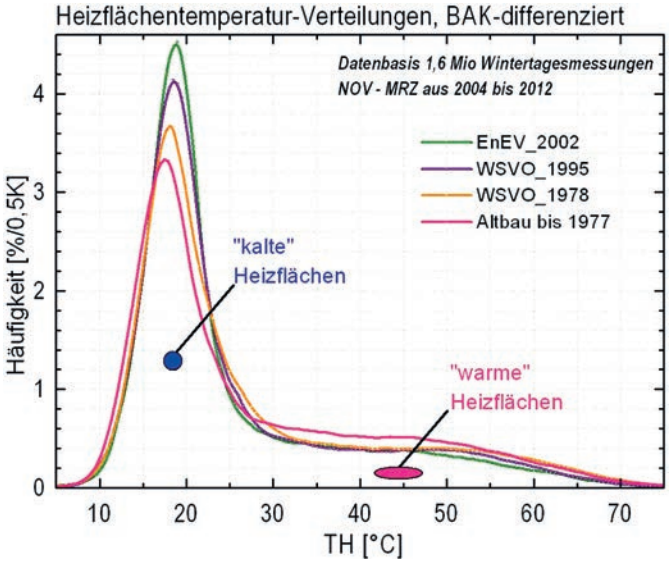

Bild 6. Exemplarische Heizkörpertemperaturverteilungen TH, repräsentativ für jeweils alle Wohnräume der 4 BAK; rot – OLD_77, orange – 78_94, lila – WSVO95, grün – EnEV02. Die Peak-Bereiche repräsentieren vorwiegend abgeschaltete-, rechtsseitige Flanken die in Betrieb stehenden Heizflächen.

Fig. 6. Exemplaric heat radiator temperature distributions TH, representative for all rooms of four BAK; red – OLD_77, orange – 78_94, purple – WSVO95, green – EnEV02. The peaking-areas mostly represent radiators offline (“cold”), while die righthand areas mark actually running radiators (“warm”).

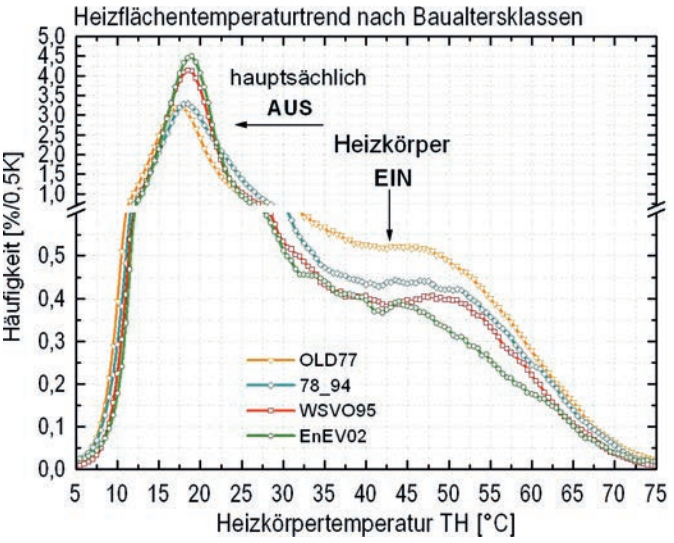

Bild 7. Heizkörpertemperaturverteilungen TH, s. Bild 6, präzisiert für relevante Kurvenbereiche (geteilte Y-Achse): orange – OLD_77, blau – 78_94, rot – WSVO95, grün – EnEV02

Fig. 7. Heat radiator temperature distributions TH, see Fig. 6, but more precisely for special areas of interest, (divided y-axis); orange – OLD_77, blue – 78_94, red – WSVO95, green – EnEV02

die BAK, desto höher fällt die Amplitude der Hauptmode aus und desto abgeflachter und kürzer erscheint der Auslauf der jeweiligen Verteilung hin zu hohen Heizflächentemperaturen. Die Modal-(Maximum-)Werte der TH-Verteilungen steigen über die BAK – entsprechend in etwa den Raumtemperaturen der unbeheizten Umgebungen (TL_OFF) – von etwa 17,5 auf 19 °C an, die Mittelwerte und Mediane beschreiben einen umgekehrten Trend: Erstere fallen um 3 K von knapp 28 auf etwa 25 °C und repräsentieren einen im Mittel absoluten Rückgang der abgegebenen Wärmeenergie, s. Tabelle 3. Die Mediane hingegen fallen um nur 1 K von 21 auf 20 °C, da sie primär anzahlgewichtet von den Ereignissen abhängen und daher auch die „Rechtsverschiebung“ der Hauptmode widerspiegeln.

Da speziell die Verhältnisse bei aktiver Energieabgabe interessieren, stellt Bild 8 die Anzahlverteilungen und die *effektiven* Energieabgabe *nur der aktiven* Heizflächen dar. Letztere ergeben sich dabei durch Betrachtung nur derjenigen Fälle, in denen nominell Heizbetrieb registriert wird, nämlich für TH – TL >= 5 K. Die Anzahlverteilungen zeigen ausgeprägte Maxima im Bereich zwischen 27 °C und 32 °C, der häufig von Heizkörpern in Aufwärm- bzw. Abkühlungsphasen überstrichen wird sowie in Rechtsrichtung ein mehr oder weniger ausgebildetes Plateau mit ggfs. einem Zweitmaximum im Bereich zwischen 45 °C und 55 °C. Dessen relative Ausprägung, zusammen mit der Reichweite des Kurvenverlaufs in höhere Temperaturbereiche quantifiziert insgesamt die Nutzungsintensität der Heizflächen. Die Tatsache, dass die Kurven älterer Bauklassen diejenigen der jüngeren entlang der gesamten Temperaturskala „einhüllen“, macht deutlich, inwiefern (1) die Häufigkeit der Heizflächenbenutzung insgesamt abnimmt, (2) eine überproportionale Verminderung hoher TH stattfindet und (3) der Heizbetrieb typisch auch erst bei höheren TH effektiv einsetzt. Letzteres ist erkennbar an der Rechtsverschiebung der linken Kurvenflanken (von OLD_77 bis EnEV_02), bestä-

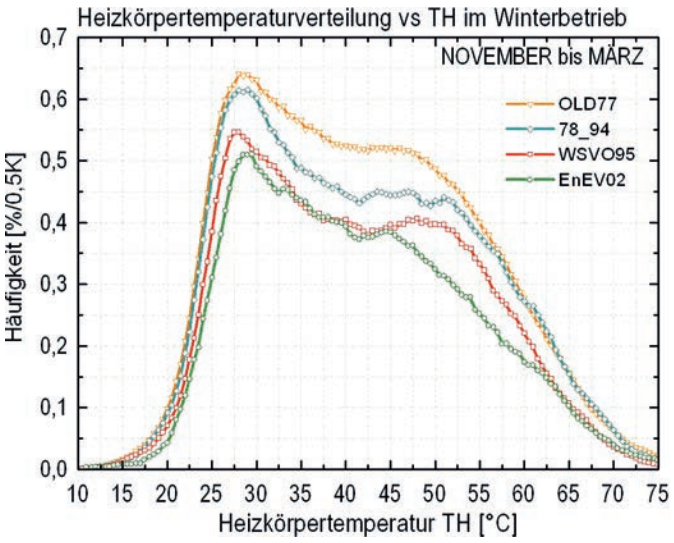

Bild 8. Heizkörpertemperaturverteilungen, nur für in Betrieb stehende Heizkörper, repräsentativ für aktuell beheizte Wohnräume, orange – OLD_77, blau – 78_94, rot – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 8. Heat-radiator-temperature-distributions, only actively working heat radiators, representative for actually heated rooms; orange – OLD_77, blue – 78_94, red – WSVO95, green – EnEV02

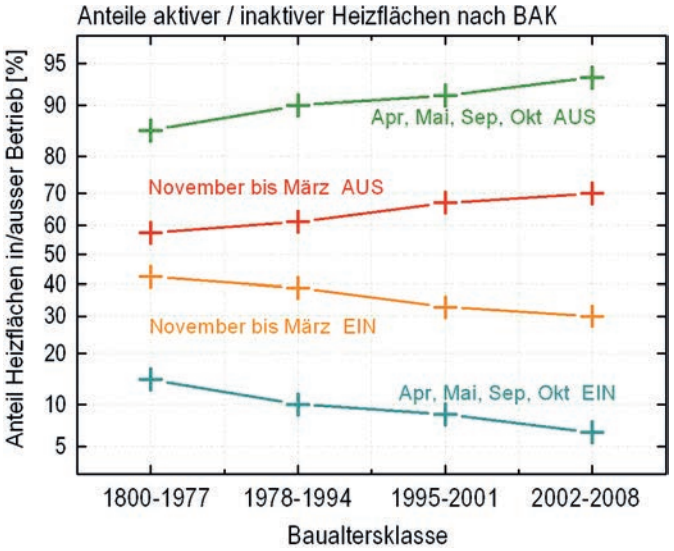

Bild 10. Statistische Anteile jederzeit aktiver- (untere Kurven) und inaktiver Heizflächen (obere Kurven), während der Hauptheizperiode November bis März (orange und rot) sowie in Übergangsmonaten April, Mai, September, Oktober (blau und grün)
Fig. 10. Statistical fractions (Y-axis) of permanently active heat surfaces (lower two curves) and fraction of permanently inactive heat-surfaces (upper two curves), once during period November to March März (orange and red) and twice during transition months April, May, September, Oktober (blue und green)

tigt auch für sich Existenz von im Mittel höheren Raumtemperaturen TL in modernerer Bausubstanz. Die effektive Energieabgabe als Funktion der aktuellen Heizflächentemperatur TH (Bild 9) wurde errechnet durch die Multiplikation der prozentualen Anzahlhäufigkeit (Bild 8) mit dem jeweiligen Mittelwert des Terms (TH – TL)[1,1]. Beide Teilbilder spiegeln mit den Flächenanteilen quantitativ die bestehenden Unterschiede im Benutzungsgrad der Heizflächen wider, anzahlmäßig und bezogen auf die Energieabgabe.

Bild 10 und Tabelle 3 (unten) summieren anhand numerischer Kennwerte die Erkenntnisse zum Benutzungsgrad der Heizflächen, abhängig von der BAK und zusätzlich über die gesamte Jahresperiode. Sie zeigen die jeweils *relativen Anteile von aktiven und inaktiven* Heizflächen,

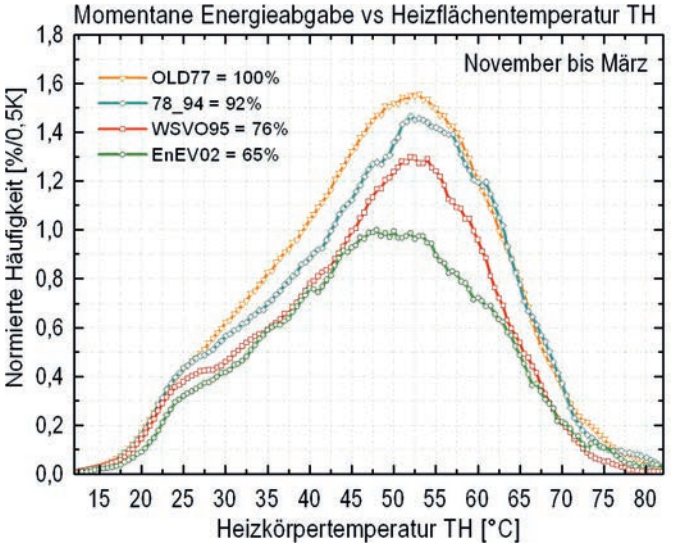

Bild 9. Energieabgabeverteilungen, korrespondierend zu Bild 8
Fig. 9. Energy release distributions, corresponding to Fig. 8

zu jedem beliebigen Tageszeitpunkt, einmal im Winter und einmal während der Übergangsperioden. Im Winter liegen diese Anteile – beginnend bei den Altbauten – am nächsten beieinander, nämlich bei rund 42 % zu 58 %, laufen dann im Übergang zu modernerer Bausubstanz deutlich auseinander: 38 % zu 62 %, 33 % zu 67 % und schließlich knapp unter 30 % zu knapp über 70 % bei modernen Gebäuden gemäß EnEV02.

Die relative Anzahl der zu jedem Zeitpunkt aktiven Heizflächen nimmt also in diesem Maße, nämlich von über 40 % auf etwa 30 %, d. h. auf deutlich unter einem Drittel ab. Das bedeutet: Es ergibt sich qualitativ eine *Inhomogenisierung* der Verteilung der Energieabgabe mit dem Übergang zu modernerer Bausubstanz. Dies entspricht wohl einer Änderung im gelebten aber nicht unbedingt bewussten Heizverhalten.

Betrachtet man zusätzlich die Zeitintervalle der „heiztechnischen Übergangsmonate“, so ist zu erkennen, dass die relativen Änderungen der Heizkörperausnutzung hier noch deutlicher ausfallen. Die Abnahme in Betrieb stehender Heizkörper über die BAKs beträgt hier von über 15 % bis zu 6 %, macht also bereits einen Faktor von zwei bis drei aus. Es wird also deutlich, dass im Übergang zu moderner Bausubstanz während der Heizperiode und mitunter schon über vier Monate (ein Drittel des Jahres) Heizanlagen unter immer marginalerer Auslastung (< 10 %) stehen.

In Summa tragen also zu jedem Zeitpunkt immer weniger Heizflächen mit immer weniger absoluter Energieabgabe und immer inhomogener, d. h. punktueller, zur Energieübergabe bei. Das ist prinzipiell naheliegend, lässt sich hier aber statistisch quantifizieren. Entscheidende Fragen sind:

Können durch diese „Enthomogenisierung" der Energieabgabe auch möglicherweise vermehrt ungewollte Energieverluste entstehen? Stellt moderne Bausubstanz im Hinblick auf unbeabsichtigt verursachte Energieverluste u. U. neue und erhöhte Anforderungen an Wohnungsnutzer als in klassischen Wohnumgebungen?

3.4 Integrale und momentane Verteilung von Verbrauchseinheiten und Energieabgabe

Wie ist die Verteilung der Energieabgabe über die Heizflächen grundsätzlich charakterisiert und lassen sich Schlüsse betreffend das „heiztechnische" Nutzerverhalten ableiten?
Im Folgenden wird die Verteilung der Wärmeflüsse von Heizfläche zu Wohnraum konkreter quantifiziert. Dazu wird die momentane effektive Temperaturdifferenz DT = (TH – TL), respektive deren exponentiell gewichteter Wert $(TH - TL)^{1,1}$, repräsentativ für punktuelle Energieabgabe $EA \sim (TH - TL)^{1,1}$ bestimmt. Letztere dient auch als Integrationswert für den normgerechten Zählbetrieb, d. h. als das relative Maß für die Energieabgabe. Diese dimensionslosen Verbrauchseinheiten „VE" werden gemäß DIN EN 834 im Regelfall für ein abgeschlossenes Betriebsjahr eines Heizkostenverteilers aufsummiert und zum Zweck der Energieabrechnung gespeichert.

Die Jahressummen an VE einer Heizfläche, respektive der gesamten Heizflächen eines Gebäudes, in Relation jeweils zum damit beheizbaren Wohnraum (Wohnfläche) bilden u. a. wichtige Kennwerte zur Beurteilung der Effizienz des Heizanlagenbetriebes und sind auch als grober Richtwert für Einschätzung des realen Energieverbrauchs und energetische Güte eines Gebäudes verwendbar. Dabei kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass der substantielle Anteil der Heizenergie eines Gebäudes über dessen Heizflächen abgegeben und dort von den EHKV auch erfasst wird: man spricht vom sog. „Erfassungsgrad". Für grobe Abschätzungen der absoluten Energieabgabe bei normgerechtem Heizanlagenbetrieb kann von etwa 1 abgegebenen kWh pro registrierte VE ausgegangen werden.

Wie entwickeln sich die Jahressummen abgegebener VE und – wichtiger – wie ggf. deren Verteilungen über die zahlreichen Heizflächen im Übergang zwischen den unterschiedlichen BAK?
Bild 11 (links) zeigt die typischen monoton fallenden Funktionen der Verteilungen über mehrere Größenordnungen relativer Häufigkeit versus integrale VE. Charakteristisch für alle Verteilungen sind die hohen Anteile von „Nullverbräuchen", d. h. der typisch hohe Anteil nie oder nur marginal betriebener Heizflächen. Obwohl systematische Diskrepanzen zwischen den Kurven in doppeltlogarithmischer Darstellung nicht deutlich hervortreten, ist zu entnehmen, dass alle Kurven sich im Bereich um 800 VE/a schneiden und dass mit jeweils modernerer BAK immer weitere Umverteilungen dem Bereich oberhalb von etwa 800 VE/a in den Bereich unterhalb stattfinden. Die prozentuale Umverteilung insgesamt macht etwa ein Sechstel (15 %) der Messstellen aus und die zughörigen Mediane halbieren sich von über 400 VE/a auf ~ 180 VE/a. Die arithmetischen Mittelwerte der Kurven sinken von absolut 1010, 830, 740 auf 600 VE/a pro Heizfläche und Betriebsjahr.

Bild 11 (rechts) zeigt die Verteilung der integralen Energieabgabe, das Produkt aus Häufigkeit und Jahresverbrauch versus Jahresverbrauch selbst. Die Modalwerte der Kurven fallen von 1500 VE/a auf unter 1000 VE/a, die Flächenintegrale entsprechen den arithmetischen Mittelwerten. Dies dokumentiert ausführlich, in welchem Maße die jährliche Benutzungsintensität beim Übergang von alterhin zu moderner Bausubstanz, abgenommen hat. Vereinfachend wird dabei vorausgesetzt, dass typische Erfassungsgrade und Wohnraumgrößen in allen BAK sich *nicht* wesentlich unterscheiden. Sollten entsprechende Gewichtungen miteinbezogen werden, so wäre wohl mit leicht vergrößerten Diskrepanzen der Energieabgabeverteilungen zu rechnen. Darauf wurde hier verzichtet und widergespiegelt ist wesentlich der Reduktionsfaktor „in Größenordnung Zwei" der erfassten Verbrauchseinheiten zwischen ältester und modernster BAK.

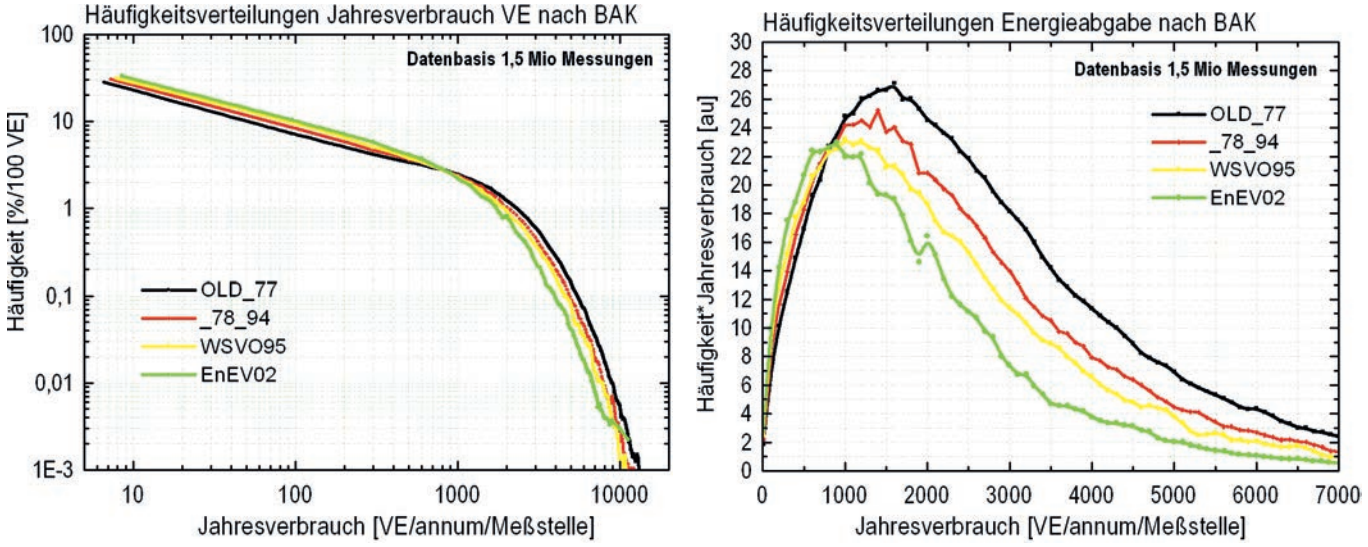

Bild 11. Häufigkeits- und Energieabgabeverteilungen der Gesamtjahres-Verbrauchssummen von EHKV in Abhängigkeit von den BAK; schwarz – OLD_77, rot – 78_94, gelb – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 11. Frequency- and corresponding Energy-release-distributions of yearly integral consumption units of HCA depending on BAK. black – OLD_77, red – 78_94, yellow – WSVO95, green – EnEV02

Wie gestalten sich demgegenüber die relativen Verbrauchsverteilungen, d. h. diejenigen, welche auf die mittleren Verhältnisse jeder BAK normiert wurden?
Die Heraushebung möglicher *relativer* Diskrepanzen wäre von Bedeutung für den eigentlichen Vergleich der Nutzungssituationen von Wohnräumlichkeiten in verschiedenen BAK. Dies wird erreicht durch eine alternative Darstellung, die zuvor die Normierung der BAK-Verteilungen auf ihren individuellen arithmetischen Verbrauchs-Mittelwert vornimmt, s. Tabelle 3, ähnlich wie in Richtlinie VDI 2077 vorgesehen). Bild 12 zeigt in direktem Vergleich zu Bild 11 die Energieabgabeverteilungen nach der Division durch Ihren mittleren Jahresverbrauchswert. Die Kurven rücken damit aufeinander, weisen aber eine erkennbare Vergrößerung der Streubreite zu modernen BAK auf, d. h. Verlagerung von relativer Energieabgabe in den Bereich oberhalb des 3,5-fachen des mittleren normierten Jahresverbrauches.

Um diese Diskrepanzen herauszustellen, werden die Differenzen zwischen der jeweiligen Kurve modernerer BAK zur ältesten BAK (OLD_77) abschnittsweise zusammengefasst. Die Histogramme in Bild 13 zeigen diese zusammengefassten Diskrepanzen der relativen Jahresverbräuche (RVB) zwischen 0, ½, 3½, 7 und über 7 für die reinen Anzahlverteilungen und für die Energieabgabeverteilungen. Anzahlbezogen werden mit steigender Modernität der BAK etwa 2,5 bis 4,5 % der Fälle aus dem Mittelbereich [½–3½] in die anderen Bereiche verlagert, das Gros' dabei hin zu den geringeren RVB < ½. Damit werden an abgegebener Energie zwischen 4 bis 7 % verlagert, mit über die BAK steigender Tendenz in die Bereiche RVB > 3½ und RVB > 7 hinein. Maximal werden für BAK EnEV02 annähernd 4 % abgegebene Energie in den Bereich oberhalb des Siebenfachen der mittleren Energieabgabe verlagert.

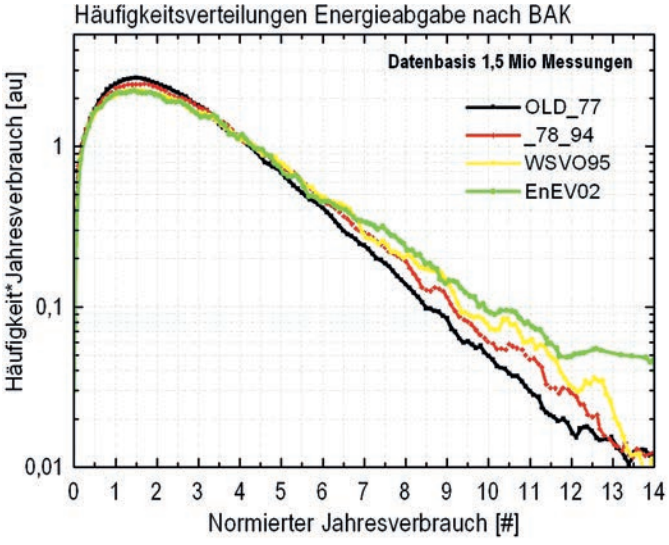

Bild 12. Normierte Energieabgabeverteilungen, s. Bild 11, basierend auf Gesamtjahres-Verbrauchssummen der 4 BAK; schwarz – OLD_77, rot – 78_94, gelb – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 12. Normalized energy-release-distributions, see Fig. 11, based on yearly integral consumption units of HCA, depending on BAKs; black – OLD_77, red – 78_94, yellow – WSVO95, green – EnEV02. Normalization according to average yearly consumption rates, as documented in Table 3.

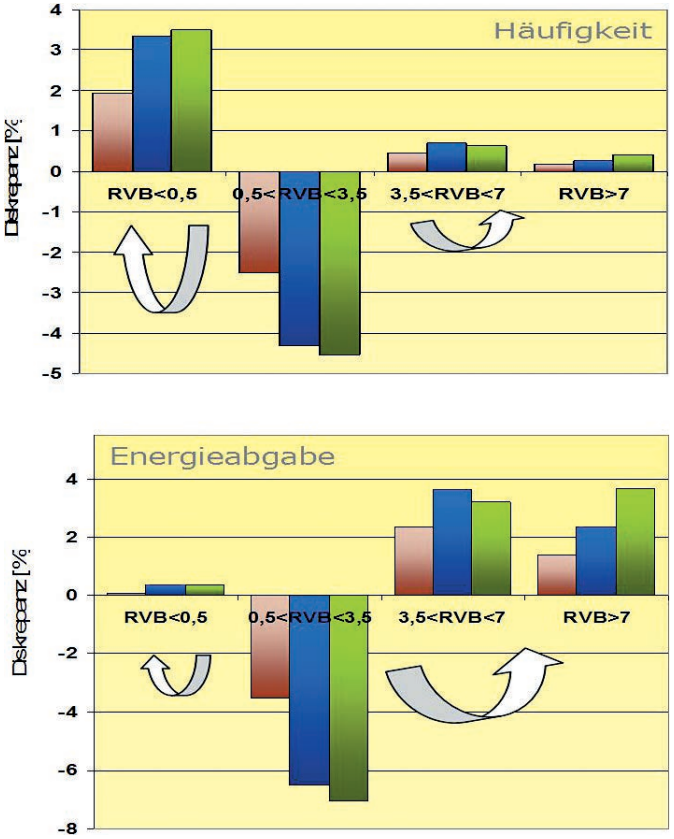

Bild 13. Abschnittsweise summierte Differenzen zwischen den normierten integralen Häufigkeits- und Energieabgabeverteilungen; rot: 78_94 – OLD_77, blau: WSVO95 – OLD_77, grün: EnEV02 – OLD_77
Fig. 13. Subtractions between the curves of the normalized integral frequency and energy release distributions; red: 78_94 – OLD_77, blue: WSVO95 – OLD_77, green: EnEV02– OLD_77. Redistribution out of the range of relativ yearly consumption ("RVB") intervall [0,5; 3,5] into the ranges of RVB < 0,5 and RVB > 3,5 reaches 2,5 to 4,5 % in number and 3,5 to 7 % in energy-release.

Zusammenfassend gilt, dass sich durch die *integralen Jahresverbrauchssummen pro Heizstelle* mit steigender Modernität der BAK bereits eine signifikante Verlagerung von Heizenergieabgabe hin zum „Vielverbrauch" direkt empirisch nachweisen lässt, selbige allerdings im einstelligen Prozentbereich verbleibt.

Wie kann ein Abbild einer „momentanen" Energieabgabeverteilung erstellt werden?
Da sich die Jahresverbrauchssummen an einer individuellen Messstelle (DIN 834) immer durch eine Vielzahl wechselnder Betriebszustände über einen langen Zeitraum zusammensetzten, ist zu mutmaßen, dass sich bei einer *zeitlich punktuelleren* Betrachtung der Energieabgabe aller Messstellen, d. h. durch einen „Schnappschuss" der momentanen Energieabgabeverteilung des Messstellenbestandes, möglicherweise ein ausdifferenzierteres Bild ergeben kann, d. h. konkret: In einer zeitlich augenblicklicheren Betrachtung, welche auch enger an der menschlichen Wahrnehmung und am aktuellen Nutzerverhalten liegen muss, werden deutlich größere Diskrepanzen der Energieabgabe vermutet als im Jahresmittel.

Hierzu wird aus der Vielzahl der individuellen Temperaturmessungen während der Wintermonate, dargestellt in

den vorangegangenen Abschnitten, die momentane gewichtete Temperaturdifferenz $DT^{1,1}$ zwischen Heizkörper- (TH) und Umgebungstemperatur (TL) nutzbar gemacht. Dieser Term ist proportional zur Energieabgabe auf sozusagen „inkrementeller“ Basis und seine Häufigkeitsverteilungen werden nachfolgend analog behandelt wie zuvor die der Jahresverbrauchssummen.

Bild 14 (oben) illustriert die Häufigkeitsverteilungen der normierten Energieabgabe über etwa fünf Größenordnungen, wie sie sich zu jedem Tageszeitpunkt während der Wintermonate in den unterschiedlichen BAK darstellt. Hier ist herausgestellt, dass und inwieweit die Kurven sich für die jeweils jüngeren BAK beidseitig an den Rändern über die älteren BAK erheben. Der Anteil von zu jedem Zeitpunkt inaktiven Heizflächen steigt dabei von alten zu modernen BAK von 28 % auf 36 %, an, andererseits bildet sich im Bereich hoher Vielfacher eine Häufigkeitsdiskrepanz von bis zu einer Größenordnung aus. Diese Seite des Spektrums ist die interessantere im Hinblick auf die Entwicklung von relativen „Vielverbraucherstellen“.

In Bild 14 (unten) ist die Verlagerung der gesamten Energieabgabe analog zu Bild 12 dargestellt. Hier zeichnet sich deutlich die Vergrößerung der Verbrauchsspreizung ab: Die Modalwerte der Kurven liegen insgesamt rechtsverlagert (von 2 bis 3,5) und die momentanen Energieabgabekurven setzen sich hin zu höheren Vielfachen (x-Achse) deutlicher ab. Auch die Differenzierungen der BAK untereinander fallen deutlicher aus: Die flächenbezogenen Mittelwerte der Kurven steigen von 3 bis etwa 4,5 um gut ein Drittel an und die Verteilungen setzen sich hin zu höheren Werten oberhalb von fünf sehr viel deutlicher voneinander ab. Dies ist der bislang umfassendste empirische Beleg da-

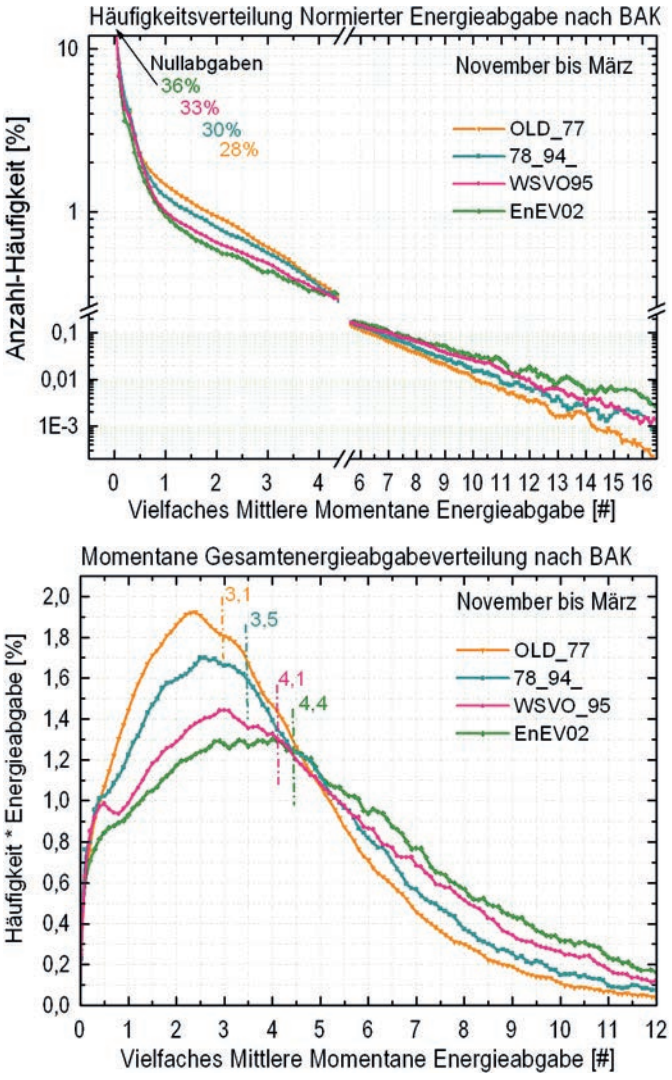

Bild 14. Momentane normierte Häufigkeits- und Energieabgabeverteilungen, ~ (TH – TL)^{1,1}; orange – OLD_77, blau – 78_94, pink – WSVO95, grün – EnEV02
Fig. 14. Instantaneous normalized frequency- and energy-release-distributions, ~ (TH – TL)^{1,1}; orange – OLD_77, blue – 78_94, pink – WSVO95, green – EnEV02. The normalization has been carried out by the average effective (weighted) temperature gradient (TH – TL)^{1,1}. The average value of the integral instantaneous energy release propagates from 3,1 up to 4,4.

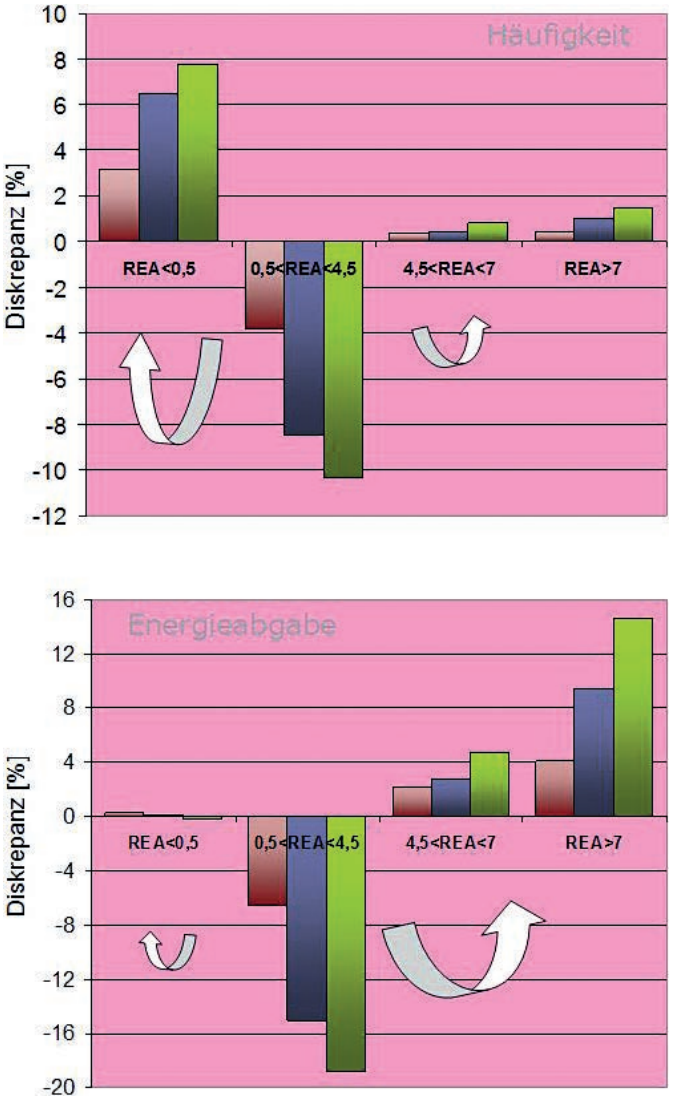

Bild 15. Abschnittsweise summierte Differenzen zwischen den normierten momentanen Häufigkeits- und Energieabgabeverteilungen; rot: 78_94 – OLD_77, blau: WSVO95– OLD_77, grün: EnEV02– OLD_77
Fig. 15. Subtractions between the curves of the normalized instantaneous frequency- and energy-release-distributions; red: 78_94 – OLD_77, blue: WSVO95– OLD_77, green: EnEV02– OLD_77. Redistribution out of the range of relativ actual consumption (“REA”) intervall [0,5; 4,5] into the ranges of RVB < 0,5 and RVB > 4,5 reaches 4 to 10 % in number and 5–20 % in energy-release.

für, dass und wie sich die heizflächenbezogene Energieabgabe in moderner Bausubstanz immer *inhomogener* entwickelt, d. h. die Heizenergie immer punktueller und in „extremeren Portionen“ in die Wohnumgebung abgegeben wird.

Diese quantitative Verbrauchsverschiebung wird, analog zur Darstellung in Bild 13, in Bild 15 zusammengefasst (X-Achse: relative Energieabgabe, REA). Die Diskrepanzen, d. h. verlagerten Anzahl- und Energieabgabeportionen fallen bei der momentanen verglichen mit der integralen Analyse entsprechend stärker aus. Hier werden zwischen etwa 4 % und gut 10 % der Messereignisse in die „Randbereiche“ verlagert, 4/5 davon allerdings in Richtung marginal geringer Energieabgabe (REA < ½) und ein Fünftel in den Bereich EA > 4½. Bezogen auf die insgesamt abgegebene Energiemenge bestreitet aber allein dieses Fünfzigstel aller Messstellen bereits zwischen 6,5 % und annähernd 20 % der Gesamtenergieabgabe von älteren zu jüngeren BAK. Bis zu einem Fünftel der momentanen Gesamtenergieabgabe wird beim Übergang von Altbauten zum EnEV02-Standard in Bereiche überdurchschnittlicher Energieabgabe verlagert und bereits ein Sechstel (~ 15 %) in den Bereich der relativer Extremverbräuche (REA > 7). Diese Verlagerung hat also mit BAK EnEV02 schon substantielle Anteile erreicht, mit erwartet fortschreitender Wirkung im Hinblick auf alle Fortschreibungen der EnEV.

Wichtig ist der belastbare empirische Nachweis, dass die Interpretationskraft von lokaler, momentaner Energieabgabe sehr deutlich über die jährlich erhobener Verbrauchswerte hinausgeht. Zusammenfassend ist gezeigt, dass das Volumen verlagerter Energieabgabemengen hin zu extremeren punktuellen Ereignissen sich weit in den zweistelligen Bereich hinein entwickeln kann. Es zeichnet sich ein differenzierteres Bild von der Energieabgabeverteilung als es durch Interpretation nur der integralen Verbrauchsdaten möglich ist und eröffnet die konkrete Diskussion um angemessene Zeitskalen für effektives Heizenergiemonitoring und Realisierung von Energieeinsparpotentialen.

4 Diskussion

Welche wesentlichen Erkenntnisse ergeben sich aus der kombinierten statistischen Betrachtung der Tendenzen von realen spezifischen Energieverbräuchen und Wohnraumklimata der BAK?

4.1 Kennzahlen

Die Betrachtungen der Endenergieverbräuche belegen, dass die relative Reduzierung des realen Heizenergieverbrauchs von den Altbauten (im heutigen bauphysikalischen Zustand und inkl. Warmwasserbereitung) bis EnEV02 kaum 50 % ausmacht. Bild 16 fasst diese Tendenz beispielhaft zusammen für kesselbefeuerte Gebäude entsprechend den differenzierten universellen Energiekennzahlen aus Abschnitt 3.1 (blaue Balken). Hier fallen die typischen Verbrauchswerte von etwa 180 kWh/(m²a) auf 80–85 kWh/(m²a). Zusätzlich illustriert sind (orange Balken) die parallel modellierten Bereiche entsprechender Baualtersklassen durch ein Gebäudemodell der Technischen Universität Dresden (TUD), welches u. a. explizit gemessene *Verbrauchs*kennwerte für Heizenergie (auf einer mehrfach größeren Datenbasis) und gemessene Raumtemperaturverteilungen (s. Abschn. 3.2) als Eingabeparameter für die Modelläufe nutzbar gemacht hatte [7]. Diese Modellergebnisse kommen im Rahmen ansonsten anerkannter Wohnszenarien für Temperierung, Belüftung und Trinkwasserkonsum zu weitgehender Deckungsgleichheit mit den empirischen Kennzahlen, was bei Zugrundelegung rein *bedarfs*orientierter Randbedingungen nicht zu erwarten wäre.

Angesichts der guten Übereinstimmung von Empirie und Modell wird der Extrapolation der Modelläufe mit Verbrauchsentwicklung zu 75–90 kWh/(m²a) für BAK EnEV09 (Bild 16) belastbare Aussagekraft zugestanden. Empirisches Material zu dieser BAK ist noch nicht in ausreichender Menge vorhanden. Das heute realistische Energieverbrauchsniveau betreffend Neubau (oder umfassende Sanierung, EnEV2009) wird sich gegenüber den Altbauten (Old_77) also nicht mehr als halbiert haben.

Ein energetische Einsparpotential „Alt zu Neu“ wird im statistischen Mittel so kaum mehr als 90–100 kWh/(m²a) ausmachen, was bei heute unterstellten 0,1 €/kWh Energiekosten kaum 10 €/(m²a) oder 100 €/m²/Dekade Amortisationspotential entspräche. Solch systematisch begrenzte Werte stellen modernes Bauen und Sanieren zumindest für eine Mehrheit des Wohnungsbestandes durchaus infrage und besonders für solche Gebäude, deren Verbrauchskennwerte heute schon gut unter 200 kWh/(m²a) liegen. Es ist möglich, dass vielen Immobilieneigentümern die reale „Verbrauchssituation“ bereits bewusst ist und da-

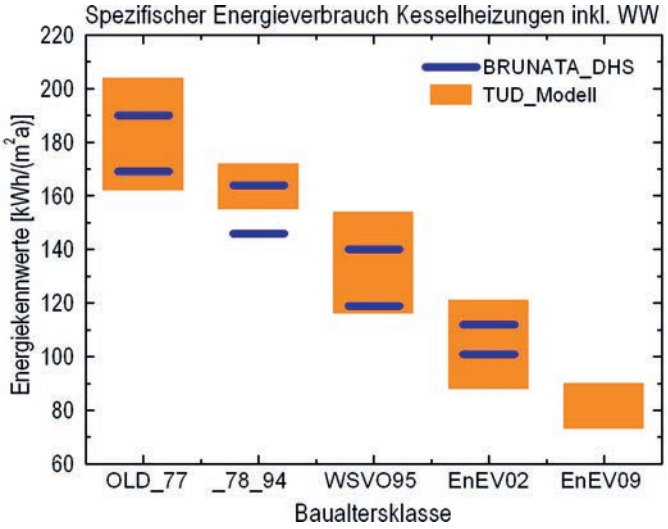

Bild 16. Tendenzen mittlerer spezifischer Energiekennwerte (Raumheizung plus Warmwasserbereitung) über die BAK. Blaue Balken repräsentieren die Bereiche empirisch dokumentierter BRUNATA-Kennwerte in Abhängigkeit von der Gebäudegröße. Die orangen Bereiche entsprechen Modellnachstellungen der TU Dresden [7] für vergleichbare Gebäudegrößen und gleiche BAK. Kennwerte für EnEV09 entsprechen der Extrapolation des Modells.
Fig. 16. Tendencies of the average specific energy consumption values (room-heating plus water-heating) along the BAK. Blue marked ranges represent the documented empirical consumption values (by BRUNATA), depending on building size. Orange column ranges illustrate reconstructed model calculations by the TU Dresden [7] for comparable building sizes and the same BAK. Values for EnEV09 refer to an extrapolation of the model.

mit maßgeblich zum so benannten „Sanierungsstau“ beiträgt.

Auf absehbar lange Zeit scheint sich also kein Trend abzuzeichnen, der den spezifischen Heizenergieverbrauch deutlich unter 50 kWh/(m²a) senken könnte, insbesondere, wenn allein der Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung bei 30 kWh/(m²a) stagnierte. Eine aktuelle Untersuchung zeigt sogar, dass letzterer in den vergangenen sechs Jahren um mindestens 5 % und der Warmwasserkonsum selbst um 3 % zugenommen haben. Daraus ist u. a. der Schluss zu ziehen, dass der Suche nach wirtschaftlicheren, d. h. geringer-investiven (jenseits der bauphysikalischen) Maßnahmen eine erhöhte Bedeutung zuwächst, zumindest so lange, bis die Deckung eines eher stagnierenden Heizenergiebedarfs durch regenerative Energie sichergestellt wäre. Hierfür kommen die Bereiche der Heizanlagenbetriebsführung und eben auch der gezielteren Unterstützung des Nutzerverhaltens infrage.

4.2 Temperaturkomfort und unbewusste Nutzungsänderungen

Der durch Wohnungsnutzer in Anspruch genommene „Temperaturkomfort“ erscheint mit typischen bundesweiten Wohnraumtemperaturen von 18–18,5 °C (s. Abschn. 3.2) sicher nicht übertrieben und weist eher auf einen in der Breite verantwortungsbewussten Umgang der Wohnungsnutzer mit Heizenergie hin. Evident sind hingegen die zunehmende Homogenisierung und systematische Erhöhung der Temperaturen in den Wohnumgebungen um etwa 1 °C, wobei diese in direkt genutzten Räumen geringer ausfällt als in jeweils momentan nicht beheizten Räumen. Es wird gemutmaßt, dass der direkt in Anspruch genommene Temperaturkomfort und damit das subjektive Nutzerverhalten am momentanen Aufenthaltsort sich kaum signifikant ändert, weil die deutlicheren Temperatursteigerungen eher in momentan nicht frequentierten Räumen stattfinden.

Dies führt zu der These, dass wegen des zunehmenden Fehlens von „Kaltzonen“ in moderneren Wohnräumen Verbindungstüren immer häufiger offen stehen werden und die Angleichung der Innenraumtemperaturen vorantreiben. Andererseits geht die beobachtete „Dehomogenisierung“ der Wärmeabgabe vonstatten, d. h. die Verlagerung der Energieabgabe auf immer weniger aber stärker genutzte Energieabgabepunkte. Selbige befinden sich dann innerhalb der Wohnumgebung immer seltener in der „fühlbaren“ Nähe der Bewohner, werden sich deren Wahrnehmungsbereichen und damit dem menschlichen Aktio-Reaktio-Schema mehr und mehr entziehen. Die Interpretation ist, dass in der aktuellen Diskussion um Bewertung des Nutzerverhaltens häufig ungerechtfertigter Weise „Verschwendungspotentiale“ und „-neigungen“ assoziiert werden und damit implizit eine Vorsatzhaltung, die in der Realität gar nicht gegeben sein muss. Die beobachteten Temperaturverteilungen und Energieabgabe lassen eher vermuten, dass: Erstens, in stark wärmegedämmten Gebäudehüllen physiologische Reaktionen, wie z. B. Frieren in unbeheizten Räumen oder in der Nähe kalter Wände- oder Fensterflächen, immer weniger vorkommt und immer seltener bewusste direkte Eingriffe in den Heizbetrieb auslöst. Zweitens wird sich die massereiche innere Bausubstanz in modernen Wohnumgebungen auf quasi gleichem Temperaturniveau befinden wie die Raumluft. Daher müssen selbst effektive Energiesenken, wie z. B. über längere Zeiträume geöffnete oder gekippte Fenster, nicht unmittelbar Kälteempfindungen beim Bewohner auslösen, denn die vorhandene Wärmeabstrahlung der massereichen warmen Umgebung kompensiert möglicherweise lange die Wahrnehmung einer temporär stark herabgesetzten Lufttemperatur oder auch von „Durchzug“. Der Bewohner kommt nicht oder ggf. erst spät auf die Idee, Türen und Fenster zu schließen oder möglichst geschlossen zu halten.

Eine dritte Konstellation sind ungewollte und teils unvermeidbare Überwärmungssituationen bei unvorhergesehener Energiezufuhr von außen. In erster Linie betrifft dies solare Einstrahlung durch Fensterflächen, d. h. den wirksamen Treibhauseffekt. Innerhalb gut isolierter Gebäudehüllen wird die zusätzliche Wärme *nicht unmittelbar* durch die quasi gleichwarmen, massereichen Raumbegrenzungsmassen aufgenommen und führt damit zu einem entsprechend schnelleren und höheren Anstieg der Raumtemperatur, der dann als unangenehme Überwärmung wahrgenommen werden kann. Folglich gibt es hier eher eine solche Nutzerreaktion, dass der entstandene Wärmeüberschuss durch aktives Ablüften abgeführt wird. Zum einen mag also moderne Bausubstanz durch höhere interne Pufferwirkung die Nutzung unvorhergesehen eingebrachter Zusatzenergie erschweren, zum anderen besteht bei häufiger „provozierten“ Ablüftungsaktionen auch häufiger das Risiko ungewollt andauernden Ablüftens (über die Kompensation der Überwärmung hinaus): Vergessene offen stehende Fenster und Türen über Stunden oder Tage werden sich bei modernen Gebäudehüllen im Hinblick auf die *relativen* Energieverluste weit substantieller auswirken als in Altbauten.

Eine vierte Konstellation betrifft weitergehende biologisch wirksame Effekte, die sich bei Nutzern dadurch einstellen können, dass *bis dato* in Altbauten gegebene Grundbelüftungsraten in hochversiegelten Neubauten eher gedrosselt werden oder (ungewollt) unterbleiben. Dies betrifft sowohl (a) chemoaktive Luftschadstoffanreicherungen aus Einrichtungsgegenständen und Baustoffen, (b) Geruchsentwicklung in dysfunktionalen oder verkeimten Belüftungssystemen, wie auch (c) CO_2-Anreicherung bei mangelnder Latentbelüftung. Sie können zu verschiedensten physiologischen Missempfindungen führen, die sich z. B. im spontanen „Verlangen nach frischer Luft“ Ausdruck verleihen und folglich fast immer zu direkten Ablüftungshandlungen führen. Gerade dieser Themenbereich ist interdisziplinär unzureichend untersucht und führt möglicherweise bei entsprechenden individuellen Negativerfahrungen zu Misstrauen gegenüber hochversiegelten, hochgedämmten Bauwerken.

Diese Studie soll einerseits dokumentieren, andererseits die „schwindende“ aktive Rolle des Wohnungsnutzers als im konstruktiven Sinne eingebundenes „Regelelement“ im Heizungssystem der Wohnumgebung zur Diskussion stellen wie auch ggf. neu entstehende Nutzergewohnheiten, die sich kontraproduktiv auf optimale Energieausnutzung auswirken können. Die allgemein verbreitete Auffassung, wonach mit dem Bezug bautechnisch moderner Wohnumgebungen optimale Energieeffizienz gegeben sei und weitergehende Sorge des Nutzers um angemessene Energieverwendung enden dürfe, ist offenkundig unzutreffend. Im Gegenteil sollte durch die zunehmend inhomoge-

nere und „unbeaufsichtigte“ Energieabgabe mit steigenden relativen Heizenergieverlusten im Wohnbereich gerechnet werden.

Bild 17 verdeutlicht zusammenfassend die relative Verlagerung der Energieabgabe jeweils zwischen ältester und modernster BAK sowie zwischen integraler (INT) und momentaner (MOM) Energieabgabeverteilung an den Heizflächen. Bei den *integralen* Verbrauchswerten war die signifikante Verlagerung von 8 % der abgegebenen Energiemenge von RVB < 3,5 in den Bereich oberhalb festgestellt worden (blaue Kurven). Dieser Wert jedoch liegt real, d. h. auf *momentaner* Zeitskala bei fast 20 % von REA < 4,5 nach oberhalb (rote Kurven). Zusätzlich verschieben sich die Modalwerte der zugehörigen Verteilungen um einen Faktor zwei nach oben.

Abschließend ist noch die Quantifizierung des Effekts durch den Übergang von der *integralen*- (Verbrauchssummen) auf die *momentane* Skala insgesamt für alle vier BAK erwähnenswert. Dieser „Maskierungseffekt“ lässt sich ansatzweise darstellen, indem die Energieabgabeverteilungen aus Bild 17, EA_MOM und EA_INT, der jeweils gleichen BAK, voneinander subtrahiert werden. Bild 18 enthält diese Differenzverteilungen, jeweils für die älteste und modernste BAK. Sie verdeutlicht, das selbst das Verhältnis zwischen integraler- und momentaner Energieabgabeverteilung noch einem zunehmendem Trend mit der BAK unterworfen ist. So führt der Maskierungseffekt für OLD_77 dazu, dass in der integralen Darstellung etwa 17 % der Energieabgabe virtuell unterhalb von 3 auftritt, sich real aber oberhalb von 3 abspielt. Dieser Anteil vergrößert sich bis BAK EnEV02 auf 28 % der Energiemenge (jeweils beidseitig von 4). So verstärkt sich der Maskierungseffekt *an sich* von BAK zu BAK und erwartungsgemäß auch in der Zukunft. Integrale

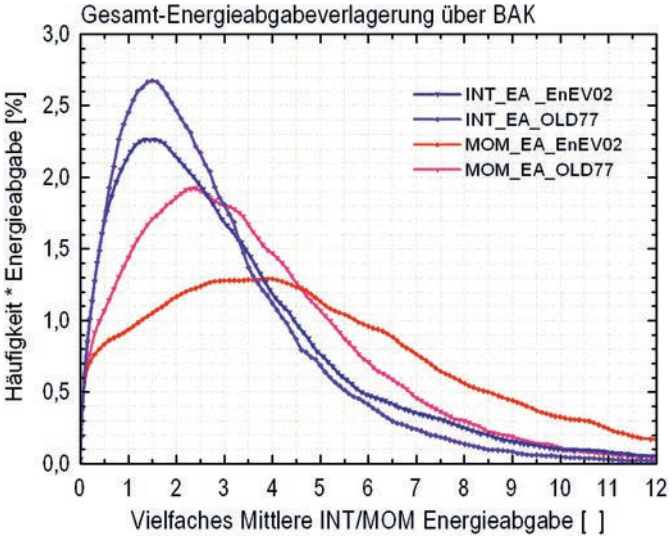

Bild 17. Maximale Variabilität relativer Energieabgabeverteilungen, Bilder 12 und 14, nach BAK (Blautöne) und zeitliche Betrachtungsweise (Rottöne), lila – integrale EA OLD_77, blau – integrale EA EnEV02, pink – momentane EA OLD_77, rot – momentane EA EnEV02
Fig. 17. Maximum variability of the relative energy-release-distributions, see Fig. 12 and 14, given by different BAK (blue colours) and by temporal scales (red colours), respectively; purple – integral EA OLD_77, blue – integral EA EnEV02, pink – instantaneous EA OLD_77, red – instantaneous EA EnEV02

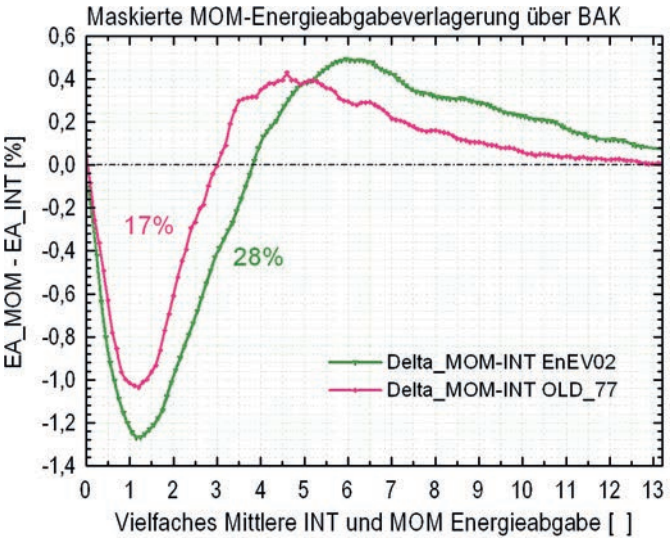

Bild 18. Entwicklung der Diskrepanz zwischen integraler (INT) und momentaner (MOM) Energieabgabeverteilung; pink – 17 % für BAK OLD_77, green – 28 % für BAK EnEV02
Fig. 18. Evolution of the discrepancy between integral and instantaneous energy release distribution; pink – 17 % for BAK OLD_77, green pink – 28 % for BAK EnEV02

Jahresverbrauchswerte verlieren also zunehmend an realer Abbildungskraft.

5 Schlussbemerkungen

Die aktuell bestehende Verteilung von Energieverbrauchskennzahlen über die wesentlich relevanten Baualtersklassen deutscher Wohngebäude wurden belastbar dokumentiert. Phänomenologisch beschrieben und quantifiziert wurden Trendentwicklungen von Wohnraum- und Heizflächentemperaturen im Übergang zu modernerer Bausubstanz. Die Konsequenz aus diesen Trends weist auf in der Praxis deutlich geringere erreichte Energieeffizienzsteigerungen durch modernes Bauen hin als prognostiziert. Die Beschreibung verändernder Energieabgabemuster in modernerer Bausubstanz deutet auf eine Änderung praktischer Nutzerverhaltensweisen hin: Die Wahrnehmungsmodalitäten von Temperaturkomfort verändern sich offenbar dergestalt, dass unbeabsichtigte Energieverluste häufiger und relativ immer wirksamer vorkommen und sich im Rahmen der EnEV-Folgeverordnungen verstärkt ausprägen. Die Zunahme extremerer, punktueller „Energieabgabeereignisse“ wird die Energiebilanz und Energieeffizienz einer „Gebäude-Heizgemeinschaft“ aller Wohnungsnutzer also immer mehr dominieren. Gleichzeitig wird sie die intuitive Wahrnehmung und eine „reaktiv sachgemäße“ Steuerung durch den Nutzer weiter erschweren.

In jedem Fall erscheint es sinnvoll, die Unmittelbarkeit von Wahrnehmung und Bewertung bestimmter Heizungsszenarien durch den Wohnraumnutzer zu unterstützen, d. h. mindestens die Erkennung von augenblicklich ungünstigen Energieabgabeereignissen zu erreichen und sowohl „Überwärmung plus Ablüftung“ als auch „Mangelbelüftung plus Ablüftung“ zu erkennen und zu kommunizieren. Dies ist noch kein Plädoyer für Energiemonitoring oder „Smart-Submetering“ aber mindestens dafür, die phänomenologi-

sche und humanphysiologische Beobachtung des Wohnens in klassischen und nichtklassischen Umgebungen und auf kurzen Zeitskalen anzugehen. Smart-Submetering für Heizenergieabgabe könnte dabei eine Einzelkomponente bilden, wobei wenigen nachhaltigen Forschungsmessreihen gegenüber zahlreichen Theorie-Diskussionen der Vorzug eingeräumt werden sollte. Dabei wäre die interdisziplinäre Koordination zwischen Wohnungswirtschaft, Messdienstleistern, Forschung (technisch wie soziologisch) sowie natürlich den Wohnungsnutzern als zentrale Voraussetzung anzusehen. Der Entwicklung und dem Betrieb moderner intelligenter IT-Infrastrukturen, die Assistenz- und Informationsfunktionen für Wohnungsnutzer als eine Aufgabe unter vielen wahrnehmen könnten, würde dabei eine neue Schlüsselrolle zuwachsen, sofern sie selbstverständlicher mit modernem Bauen und Wohnen verknüpft würden. Die ingenieurtechnische Forschung hätte zudem die Chance, Komponenten des menschlichen Verhaltens einen Schritt weit aufzunehmen. Möglicherweise verbergen sich Erfolgspotenziale beim Energiesparen gar nicht hinter der angestrebten Optimierung technischer und „aufklärerisch“ motivierter Systeme. Vielleicht liegen in der Umkehrung vermeintlicher Kausalitäten auch Lösungsansätze: Integration unbewusster, nicht notwendig technisch-rationaler Nutzersignale in intelligente Steuerungssysteme und Ersatz von direktiven Anweisungen durch neue Wahrnehmungssignale?

Literatur

[1] *Schröder, F., Greller, M., Hundt, V., Mundry, B., Papert, O.*: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 1: Differenzierte Kennzahlverteilungen nach Energieträger und wärmetechnischem Sanierungsstand. Bauphysik 31 (2009), H. 6, S. 393–402.

[2] *Greller, M., Schröder, F., Hundt, V., Mundry, B., Papert, O.*: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 2: Verbrauchskennzahlentwicklung nach Baualtersklassen. Bauphysik 32 (2010), H. 1, S. 1–6.

[3] *Greller, M., Schröder, F., Boegelein, T., Hundt, V., Güttler, P.*: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 3: Spezifischer Energieverbrauch für zentrale Warmwasserbereitung und Relation zum Heizenergieverbrauch. Bauphysik 32 (2010), H. 3, S. 154–159.

[4] *Schröder, F., Altendorf, L., Greller, M., Boegelein, T.*: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 4: Spezifischer Heizenergie – Verbrauch kleiner Wohnhäuser und Verbrauchshochrechnung für den Gesamtwohnungsbestand. Bauphysik 33 (2011), H. 4, S. 243–253.

[5] *Altendorf, L., Kühl, L., Fisch, M. N., Wilken, T.*: (Energie)-Vergleichszahlen für Verbrauch bei Wohngebäuden. Forschungs-Endbericht, Institut für Gebäude-und Solartechnik IGS, TU Braunschweig, 2010, publiziert als Online-Publikation des BBR/BBSR Nr. 11/2012.

[6] *Simons, H.* et al.: Energetische Sanierung von Ein- und Zweifamilienhäusern – Energetischer Zustand, sanierungsfortschritte und politische Instrumente. Studie im Auftrag des Verbandes der privaten Bausparkassen e. V., EMPIRICA-Forschung und Beratung, Berlin, 2012.

[7] *Felsmann, C., Schmidt, J.*: Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität. Studie der TU Dresden im Auftrag der ARGE-Heiwako, Jan 2013, Bestelladresse: info@arge-heiwako.de, Bonn.

[8] *Schröder, F., Ohlwärter, C., Erhorn, H., Reiß, J.*: Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern – Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen. EnEV aktuell 2/2010.

[9] *Schröder, F., Engler, H. J., Boegelein T., Ohlwärter, C.*: Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern – Rückwirkung des Sanierungsstandes auf den Heizenergieverbrauch. HLH 61 (2010) H. 11.

[10] *Selk, D., Gniechwitz, T.*: Unsere alten Häuser sind besser als ihr Ruf. Arbeitsgemeinschaft Zeitgemäßes Bauen e. V., Kiel, Nr. 238, Heft 1/2009.

[11] *Selk, D., Gniechwitz, T.*: Unsere neuen Häuser verbrauchen mehr als sie sollten. Arbeitsgemeinschaft Zeitgemäßes Bauen e. V., Kiel, Nr. 238, Heft 1/2010.

[12] *Casties, M.*: Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Nutzerverhalten und Heizenergieverbrauch/-bedarf von Wohngebäuden. Dissertation, TU Berlin, 1997. Verlag für Wissenschaft und Forschung, ISBN-3-89700-005-9.

Autoren dieses Beitrages

Dr. rer. nat. Franz Peter Schröder, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Olaf Papert,
Student Mathematik Tobias Boegelein
METRONA-Wärmemesser Union GmbH,
Aidenbachstr. 40, 81379 München

Hendrikus Navarro
BRUNATA Wärmemesser Hagen GmbH & Co. KG,
Doberaner Weg 10, 22143 Hamburg

Dipl.-Ing. Architekt Bernhard Mundry,
BRUNATA Wärmemesser-Gesellschaft Schultheiss GmbH + Co.,
Max-Planck-Straße 2, 50354 Hürth

BRUNATA METRONA
Einfach. Mehr. Qualität.

BRUNATA-METRONA, eines der führenden deutschen Abrechnungsservice-Unternehmen, bietet neben Erfassung und verbrauchsgerechter Abrechnung von Wärme, Wasser und Hausnebenkosten neue Dienstleistungen rund um das Energiedatenmanagement für Immobilien an.

Die wichtigen Themen Energie, Sicherheit und Gesundheit sind dabei Auftrag und Motivation. Dienstleistungen wie die Verbrauchsanalyse zur Visualisierung des Verbrauchs und innovative Produkte zur Reduzierung der Heizkosten helfen Energie und damit Kosten zu sparen. Mit Qualitätsrauchmeldern und jährlichem Rauchmelderservice sowie der Trinkwasseranalyse leisten wir einen Beitrag zu mehr Sicherheit und zum Schutz der Gesundheit der Bewohner. Online-Dienste und Kundenportal runden das Portfolio ab. BRUNATA-METRONA setzt auf langfristige Partnerschaften mit Kunden und stellt Servicequalität stets an die erste Stelle.

Informationszentrale BRUNATA-METRONA-Gruppe
Aidenbachstraße 40, 81379 München

info@brunata-metrona.de
www.brunata-metrona.de