



**INSTITUT WOHNEN
UND UMWELT GmbH**

Annastraße 15

64285 Darmstadt

Telefon: (0049) 06151/2904-0

Telefax: (0049) 06151/2904-97

eMail: info@iwu.de

Internet: <http://www.iwu.de>

Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung –

**Eine Untersuchung im Auftrag der
Viterra Energy Services AG, Essen**

Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung

Eine Untersuchung im Auftrag der
Viterra Energy Services AG, Essen

Autoren: Tobias Loga
Marc Großklos
Jens Knissel

Darmstadt, den 15. Juli 2003

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Annastraße 15
64285 Darmstadt
Fon: 06151/2904-0 / Fax: -97
Internet: www.iwu.de

Inhalt

1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung des Projekts.....	1
1.3 Methodischer Ansatz: Vergleichskosten.....	2
1.3.1 Vergleichskosten-Typ „D“ (Durchschnittliche Heizkosten).....	2
1.3.2 Vergleichskosten-Typ „E“ (Einsparung von Heizkosten durch verbrauchsabhängige Abrechnung).....	2
1.3.3 Vergleichskosten-Typ „N“ (Einfluss des Nutzers auf seinen individuellen Verbrauch).....	3
1.4 Vorgehen	3
2 Physikalisches Modell: Der Einfluss des Nutzers auf den Energiebedarf.....	4
2.1 Flächenbezug	4
2.2 Endenergiebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitung Q	4
2.3 Heizwärmebedarf Q_h	4
2.4 Nutzwärmebedarf Warmwasserbereitung Q_w	9
2.5 Parametrisierung des Nutzerverhaltens	10
2.5.1 Vom Nutzer abhängige Variablen.....	10
2.5.2 Modellierung der effektiven mittleren Raumtemperatur.....	11
2.6 Parametrisierung der energetischen Gebäudequalität / Definition des Niedrigenergiehaus-Standards	15
3 Quantifizierung der Nutzungsparameter: Auswertung messtechnischer Untersuchungen bewohnter Gebäude.....	17
3.1 Der Beitrag der Heizkostenabrechnung zur Energieeinsparung	17
3.2 Das Nutzerverhalten und seine Abhängigkeit von Gebäudeparametern.....	19
3.2.1 Ausgewertete Projekte mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung	19
3.2.2 Ausgewertete Projekte ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung	22
3.2.3 Einfluss des Wärmeschutzstandards auf den Heizwärmeverbrauch.....	23

3.2.4	Die Streuung der Nutzungsbedingungen und der Verbrauchswerte	24
3.2.5	Überprüfung des Raumtemperaturmodells.....	27
3.2.6	Fensteröffnungsdauer und Wärmeschutzstandard.....	31
3.2.7	Herleitung des effektiven Luftwechsels	31
3.2.8	Art der Lüftung, Gebäudedichtheit und Fensteröffnungsdauer.....	34
3.2.9	Raumtemperatur und Fensteröffnungsdauer mit und ohne verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung	36
3.3	Energiekosten und Verbrauchskennwert.....	37
4	Nutzermodell: Typische Werte für Durchschnitt und Streuung	39
4.1	„Durchschnittlicher Nutzer“	39
4.2	Die Streuung: „Sparer“ und „Verschwender“	39
4.3	Veränderung der Nutzungsbedingungen bei Verzicht auf verbrauchsabhängige Abrechnung	40
5	Vergleichskosten: Abhängigkeit vom energetischen Standard	42
5.1	Durchschnittliche Verbrauchskosten – Vergleichskosten-Typ „D“	43
5.2	Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung – Vergleichskosten- Typ „E“	43
5.3	Einfluss des Nutzers auf seinen individuellen Verbrauch – Vergleichskosten-Typ „N“	46
6	Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit	50
7	ANHANG	53
7.1	Quellen	53
7.2	Weitere Ergebnisse der Auswertung von Messprojekten	55
7.3	Abschätzung von nicht bekannten Gebäudeparametern.....	64

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Das Nutzerverhalten hat erfahrungsgemäß erhebliche Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch. Typisch ist eine Streuung des Verbrauchs gleichartiger Wohnungen von mehr als 50%. Dabei hängt für den einzelnen Nutzer das Niveau nicht nur vom individuellen Komfortbedürfnis, sondern auch von den daraus entstehenden Heizkosten ab. Dies belegt die Einführung der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung in den 70er und 80er Jahren, die insgesamt eine deutliche Reduktion des Heizenergieverbrauchs bewirkte.

Der Einfluss des Nutzers auf den Heizenergieverbrauch wird überlagert von dem des energetischen Standards des Gebäudes. Sowohl die verschärften gesetzlichen Rahmendaten (EnEV) als auch die technische Weiterentwicklung führen zu einem immer weiter sinkenden Verbrauch. Je niedriger die Heizkosten, desto deutlicher stellt sich die Frage nach der Sinnhaftigkeit der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Die Durchführung der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung ist dann wirtschaftlich vertretbar, wenn ihre Kosten in einem angemessenen Verhältnis zu ihrem Nutzen stehen. Im Rahmen des Projekts soll dieser Nutzen quantifiziert und seine Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard systematisch herausgearbeitet werden. Er liefert Anhaltspunkte für die maximalen Kosten der verbrauchsabhängigen Abrechnung.

Die Analyse und Bewertung von technischen Komponenten oder Methoden für die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

1.3 Methodischer Ansatz: Vergleichskosten

Es werden die folgenden drei Arten von Vergleichskosten in Abhängigkeit vom Gebäudestandard ermittelt:

Tab. 1: Vergleichskosten als Basis für die Bewertung der Kosten der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung

Vergleichskosten-Typ		
„D“	„E“	„N“
<u>D</u> urchschnittliche Heizkosten	<u>E</u> insparung von Heizkosten durch verbrauchsabhängige Abrechnung	Einfluss des <u>N</u> utzers auf seinen individuellen Verbrauch
Referenz	Maß für die Rentabilität	Maß für die Heizkostengerechtigkeit

1.3.1 Vergleichskosten-Typ „D“ (Durchschnittliche Heizkosten)

Der Vergleichkostentyp „D“ dient als Referenz für die Bewertung der anderen beiden Kriterien. Es handelt sich um die Heizkosten, die für einen durchschnittlichen Nutzer in einem Gebäude des betreffenden energetischen Standards entstehen. Dabei wird jeweils das Vorhandensein einer verbrauchsabhängigen Abrechnung vorausgesetzt.

1.3.2 Vergleichskosten-Typ „E“ (Einsparung von Heizkosten durch verbrauchsabhängige Abrechnung)

Sind die Kosten für die verbrauchsabhängige Abrechnung niedriger als die durch diese Form der Abrechnung erreichte Heizkosteneinsparung, so kann sie als betriebswirtschaftlich rentabel bezeichnet werden.

Da zur Zeit keine empirischen Untersuchungen an Niedrigenergiehäusern bekannt sind, in denen der Heizenergieverbrauch unter vergleichbaren Bedingungen mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung gemessen wurde, müssen die für den Gebäudebestand bekannten Aussagen auf verbesserte Standards übertragen werden.

1.3.3 Vergleichskosten-Typ „N“ (Einfluss des Nutzers auf seinen individuellen Verbrauch)

Die verbrauchsabhängige Abrechnung ist ein Mittel zur Herstellung von Heizkostengerechtigkeit: Sparsames Verhalten des einzelnen Nutzers sollte sich „bezahlt machen“ – ein verschwenderischer Umgang mit Energie sollte nicht von der Allgemeinheit, also der Gesamtheit der Hausbewohner, getragen werden. Als Maß für die Heizkostengerechtigkeit dient der Vergleichskosten-Typ „N“: die Differenz der Heizkosten eines typisch sparsamen und eines typisch verschwenderischen Haushalts. Als Grundlage müssen im Rahmen der Untersuchung typische Werte für ein hohes und niedriges Temperaturniveau sowie für einen hohen und niedrigen Luftwechsel gefunden werden. Hierzu werden Auswertungen von messtechnisch untersuchten Niedrigenergie- und Passivhäusern herangezogen.

1.4 Vorgehen

Das Projekt gliedert sich in vier aufeinander aufbauende Teile:

➤ **Beschreibung des energetischen Verhaltens von Gebäuden**

Im ersten Schritt wird das energetische Verhalten von Gebäuden physikalisch modelliert und die Parameter identifiziert, die das Nutzerverhalten beschreiben (Nutzungsparameter).

➤ **Auswertung von Messprojekten**

Im zweiten Schritt werden verschiedene messtechnische Untersuchungen von Wohngebäuden ausgewertet. Ziel ist die Quantifizierung der Nutzungsparameter. In Abhängigkeit vom Gebäudestandard und anderen Einflussgrößen werden typische Werte für die Streuung der Nutzungsparameter sowie Durchschnittswerte mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung ermittelt.

➤ **Erstellung eines Nutzermodells**

Als Zusammenfassung der Arbeitsschritte 1 und 2 wird ein Nutzermodell erstellt. Dieses liefert für die wesentlichen Nutzungsparametern typische Werte für sparsames, durchschnittliches und verschwenderisches Verhalten sowie Werte für das Verhalten mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung.

➤ **Bestimmung der Vergleichskosten**

Mit dem Nutzermodell werden die drei oben beschriebenen Arten von Vergleichskosten als Funktion des Gebäudestandards bestimmt. Diese liefern einen Rahmen, in dem sich die Kosten der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung nach Möglichkeit bewegen sollte.

2 Physikalisches Modell: Der Einfluss des Nutzers auf den Energiebedarf

2.1 Flächenbezug

Als Energiebezugsfläche A_{EB} wird innerhalb der vorliegenden Untersuchung generell die beheizte Wohnfläche A_{Wohn} verwendet (Definition nach II. Berechnungsverordnung [II. BV]), da diese die innerhalb der Wohnungswirtschaft relevante Größe ist (u.a. auch Grundlage für Umlegung nach §7 HeizkostenV). Der Wohnflächenbezug wird durch Kleinschreibung des Formelzeichens ausgedrückt (q_h statt Q_h).

Die durch die EnEV definierte „Gebäudenutzfläche“ A_N ist im Durchschnitt ca. 25% größer als die beheizte Wohnfläche (vgl. [IWU 2001]). Um die Wohnflächen-bezogenen Aussagen dieser Studie auf A_N -Bezug umzurechnen, müssen die Kennwerte mit dem Faktor 0,8 multipliziert werden.

2.2 Endenergiebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitung Q

Die Grundgleichung für die Bestimmung des Endenergiebedarfs von Gebäuden für Raumheizung und Warmwasser ist gemäß DIN V 4108-6 / DIN V 4701-10:

$$Q = Q_h + Q_w + Q_i - Q_r \quad [\text{kWh/a}] \quad (1)$$

Q_h	Jahresheizwärmebedarf	[kWh/a]
Q_w	jährlicher Nutzwärmebedarf Warmwasserbereitung	[kWh/a]
Q_i	jährliche Energieverluste der Anlagentechnik für Heizung und Warmwasserbereitung	[kWh/a]
Q_r	jährliche Wärmemenge, die aus der Umwelt zugeführt wird (Sonnenkollektor, Wärmepumpe etc.)	[kWh/a]

Q_h und Q_w hängen stark vom Verhalten des Nutzers ab. Dagegen werden Q_i und Q_r vorwiegend von den technischen Eigenschaften der Heizungsanlage bestimmt – sie werden im Folgenden als vom Nutzer unabhängig betrachtet.

2.3 Heizwärmebedarf Q_h

Der Jahresheizwärmebedarf ist wie folgt definiert:

$$Q_h = (H_T + H_V) \cdot F_{GT} - \eta_G \cdot (Q_i + Q_s) \quad [\text{kWh/a}] \quad (2)$$

Die einzelnen Größen werden im Folgenden erläutert und in Hinblick auf den Nutzereinfluss eingeordnet.

Temperaturbezogener Transmissionswärmeverlust H_T

$$H_T = \sum_j f_j \cdot U_j \cdot A_j + \sum_k f_k \cdot \Psi_k \cdot l_k \quad [\text{W/K}] \quad (3)$$

f_j, f_k	Temperatur-Korrekturfaktor des Bauteils j bzw. der Wärmebrücke k	[-]
U_j	Wärmedurchgangskoeffizient nach DIN EN ISO 10077 (für Fenster) bzw. DIN EN ISO 6946 (für alle anderen Bauteile) des Bauteils j	[W/(m ² ·K)]
A_j	Fläche des Bauteils j (Außenmaß)	[m ²]
Ψ_k	längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücken k	[W/(m·K)]
l_k	Länge der Wärmebrücke k	[m]

Die geometrischen Daten werden vom Nutzerverhalten nicht beeinflusst. Die Wärmedurchgangskoeffizienten hängen geringfügig vom Verhalten ab (Wohnungseinrichtung: Regale, Schränke vor Außenwänden, Vorhänge vor Fenstern usw.) – sie werden im Rahmen dieser Untersuchung als vom Nutzerverhalten unabhängig betrachtet.

Temperaturbezogener Lüftungswärmeverlust H_V

$$H_V = c_{p,Luft} \cdot n \cdot V_L \quad [\text{W/K}] \quad (4)$$

mit:	$c_{p,Luft}$	spezifische Wärmespeicherfähigkeit von Luft Standardwert = 0,34 Wh/(m ³ K)	[Wh/(m ³ K)]
	n	Luftwechsel	[1/h]
	V_L	Luftvolumen	[m ³]

Wenn keine Angaben für die Gebäude vorliegen, wird das Luftvolumen gemäß [EPHW 1997] vereinfacht wie folgt bestimmt¹:

$$V_L = h_R \cdot A_{EB} \quad [\text{m}^3] \quad (5)$$

mit:	h_R	lichte Raumhöhe; Standardwert gemäß [EPHW 1997] = 2,5 m	[m]
	A_{EB}	Energiebezugsfläche; bei Wohngebäuden = A_{Wohn} (beheizte Wohnfläche)	[m ²]

¹ Anmerkung: Das auf Basis der Wohnfläche definierte Luftvolumen ist ca. 20% kleiner als das vereinfacht gemäß EnEV ermittelte. Da die Wohnungsnutzung (Personenbelegung) von der Wohnfläche abhängt, ist diese die geeignetere Bezugsgröße. Gleiche Luftwechsel führen im Rechengang nach EnEV im Schnitt zu 25% höheren Wärmeverlusten.

Der Luftwechsel kann in die folgenden drei Bestandteile zerlegt werden (da es sich bei Lüftungsanlagen nicht um den realen sondern nur den energetisch wirksamen Luftwechsel handelt, wird er hier als „äquivalenter Luftwechsel“ bezeichnet):

$$n = n_{\text{äqui}} = (1 - \eta_{\text{WRG}}) n_{\text{Anl}} + n_x + n_F \quad [1/\text{h}] \quad (6)$$

mit:	$n_{\text{äqui}}$	äquivalenter (d.h. energetisch wirksamer) Luftwechsel	[1/h]
	η_{WRG}	Wärmebereitstellungsgrad des Wärmeübertragers	[-]
	n_{Anl}	Anlagen-Luftwechsel (Standardwert = 0,4 1/h)	[1/h]
	n_x	zusätzlicher Luftwechsel infolge Undichtigkeiten in der Gebäudehülle	[1/h]
	n_F	zusätzlicher Luftwechsel infolge Öffnen von Fenstern	[1/h]

Messtechnisch wird n_F in der Regel über die Öffnungszeit von Fenstern ermittelt:

$$n_F = \frac{1}{24} \frac{\text{d}}{\text{h}} \cdot \frac{\dot{V}_{\text{LF,offen}}}{A_{\text{EB}} h_R} t_{\text{LF}} = \frac{1}{24} \frac{\text{d}}{\text{h}} \cdot \frac{\dot{v}_{\text{LF,offen}} z_{\text{LF}} a_F}{h_R} t_{\text{LF}} \quad [1/\text{h}] \quad (7)$$

mit:	$\dot{V}_{\text{LF,offen}}$	Luftvolumenstrom für den Fall, dass alle „Lüftungsfenster“ offen sind	[m ³ /h]
	$\dot{v}_{\text{LF,offen}}$	Luftvolumenstrom pro m ² geöffnetes „Lüftungsfenster“	[m ³ /(m ² h)]
	z_{LF}	Anteil der „Lüftungsfenster“ an der gesamten Fensterfläche; typischer Wert = 50%	[-]
	a_F	Fensterfläche pro m ² Wohnfläche; typischer Wert = 0,19 (vgl. [Herbert 2001])	[m ² /m ²]
	t_F	mittlere tägliche Öffnungsdauer je Lüftungsfenster in der Heizperiode	[h/d]

Nähere Angaben und Werte für die einzelnen Größen finden sich in Abschnitt 3.2.4. Vom Nutzer beeinflusst wird der Luftwechsel durch Öffnen von Fenstern t_F , im Fall von Lüftungsanlagen in geringerem Umfang auch der Anlagen-Luftwechsel n_{Anl} (individuelle Regelung der Anlage).

Innere Wärmequellen Q_I

$$Q_I = 0,024 \frac{\text{kh}}{\text{d}} \cdot \dot{q}_i \cdot t_{\text{HP}} \cdot A_{\text{EB}} \quad [\text{kWh/a}] \quad (8)$$

mit	\dot{q}_i	nutzflächenspezifische Leistung der inneren Wärmequellen <u>Standardwerte</u> nach [EPHW 1997]: Einfamilienhäuser: 2,5 W/m ² Mehrfamilienhäuser: 3,2 W/m ²	[W/m ²]
	t_{HP}	Länge der Heizperiode	[d/a]
	A_{EB}	Energiebezugsfläche, bei Wohngebäuden = A_{Wohn} (beheizte Wohnfläche)	[m ²]

Die Höhe der inneren Wärmequellen Q_I ist stark verhaltensabhängig - insbesondere fließt die Wärmeabgabe von Personen (Aufenthaltsdauer und Anzahl) und von elektrischen Geräten (vorhandene Geräte und Intensität der Nutzung) ein. Da hierzu jedoch bei den ausgewerteten Messprojekten in der Regel keine Angaben vorliegen, wird das interne Wärmeangebot in der Heizperiode im Rahmen dieser Untersuchung nicht als vom individuellen Verhalten abhängig betrachtet.

Solares Wärmeangebot in der Heizperiode Q_S

$$Q_S = \sum_j A_{s,j} \cdot G_{s,j} \quad [\text{kWh/a}] \quad (9)$$

mit: $A_{s,j}$	Solarapertur ("effektive Kollektorfläche" nach DIN V 4108-6)	$[\text{m}^2]$
$G_{s,HP,j}$	Globalstrahlung für die Orientierung j in der Heizperiode	$[\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$

Die Solarapertur wird wie folgt bestimmt:

$$A_{s,j} = F_S \cdot F_C \cdot F_F \cdot F_W \cdot g_{\perp} \cdot A_w \quad [\text{m}^2] \quad (10)$$

mit: A_w	Fensterfläche	$[\text{m}^2]$
F_S	Abminderungsfaktor für Verschattung und Verschmutzung	$[-]$
F_C	Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen	$[-]$
F_F	Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil	$[-]$
F_W	Abminderungsfaktor für nicht-senkrechten Strahlungseinfall	$[-]$
g_{\perp}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung für senkrechten Strahlungseinfall	$[-]$

Lediglich der Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen F_C ist vom Nutzer abhängig. Da Sonnenschutzvorrichtungen innerhalb der Heizzeit bei Wohngebäuden praktisch kaum genutzt werden, wird auch dieser Einfluss hier vernachlässigt.

Ausnutzungsgrad für solare und innere Gewinne η

Der Ausnutzungsgrad η für die solaren und inneren Gewinne hängt vom Gewinn-Verlust-Verhältnis, von der thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudes und von der Art (nicht der individuellen Einstellung) der Heizungsregelung ab. Diese Größen hängen nicht direkt vom Nutzerverhalten ab.

Gradtagszahlfaktor F_{GT}

Der Gradtagszahlfaktor F_{GT} bestimmt sich aus den Differenzen zwischen den Tagesmittelwerten der Raumsolltemperatur und der Außentemperatur, aufsummiert über alle Tage der Heizperiode. Dies kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$F_{GT} = 0,024 \text{ kh/d} \cdot (\bar{\vartheta}_i - \bar{\vartheta}_e) \cdot t_{HP} \quad [\text{kKh/a}] \quad (11)$$

mit: $\bar{\vartheta}_i$ mittlere Raumtemperatur an Heiztagen $[\text{°C}]$
 $\bar{\vartheta}_e$ mittlere Außentemperatur in der Heizperiode $[\text{°C}]$
 t_{HP} Länge der Heizperiode $[\text{d/a}]$

Die Raumtemperatur $\bar{\vartheta}_i$ stellt eine wesentliche Einflussgröße des Nutzers auf den Heizenergiebedarf dar.

Mittlere Außentemperatur $\bar{\vartheta}_e$ und Länge der Heizperiode t_{HP} als Funktion der Heizgrenztemperatur ϑ_{HG}

Die Heizperioden-Bilanz nach EN 832 ist für die Bilanzierung unterschiedlicher Gebäudestandards ausreichend genau – unter der Voraussetzung, dass eine an den Gebäudestandard angepasste Heizgrenztemperatur verwendet wird. Folgende Näherungsgleichung kann für diese Abschätzung verwendet werden:

$$\vartheta_{HG} \approx \vartheta_i - 0,9 \cdot \frac{\dot{q}_i A_{EB} + A_s \cdot 120 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{H_T + H_V} \quad [\text{°C}] \quad (12)$$

mit: A_s Solarapertur für alle Fenster $A_s = \sum_j A_{s,j}$ $[\text{m}^2]$

Die für die jeweils gegebene Heizgrenztemperatur benötigte mittlere Außentemperatur $\bar{\vartheta}_e$ und die Länge der Heizperiode t_{HP} werden durch lineare Interpolation aus den Klimadaten für das Winterhalbjahr und das ganze Jahr ermittelt. Die entsprechenden Klimadaten für verschiedene Heizgrenztemperaturen gibt Tab. 2 wieder.

Das hier beschriebene Heizperiodenbilanz-Verfahren mit näherungsweise bestimmter Heizgrenze weicht über den gesamten Bereich der heute anzutreffenden Wärmeschutzstandards von Gebäuden um nicht mehr als $\pm 2\%$ vom Monatsbilanzverfahren ab [Loga 2003]. Somit ist das Verfahren für die im Rahmen der vorliegenden Studie bestehenden Aufgaben ausreichend genau.

Tab. 2: Tabellenwerte für das Standardklima Deutschland

a) ermittelt aus Monatswerten der DIN V 4108-6 für das ganze Jahr und für das Winterhalbjahr (1. Oktober – 31. März),
 b) daraus ermittelt durch lineare Interpolation: für die drei Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C

Standardklima Deutschland		Heizperiode mit Heizgrenztemperatur**			Jahr*	Winterhalbjahr* Okt-Mrz
		10 °C	12 °C	15 °C		
Heizgrenztemperatur		10 °C	12 °C	15 °C	18,3 °C	9,3 °C
Länge der Heizperiode		197 d/a	238 d/a	298 d/a	365 d/a	182 d/a
mittl. Außentemp. in der Heizperiode		3,6 °C	4,9 °C	6,8 °C	9,0 °C	3,1 °C
Globalstrahlung in der Heizperiode in kWh/(m ² a)	Horizontal	295	494	791	1119	221
	Süd	311	432	614	813	266
	Südost/Südwest	271	400	594	808	222
	Ost/West	199	323	509	714	152
	Nordost/Nordwest	138	235	380	540	102
	Nord	124	199	311	435	96
	S Neigung 45°	378	574	866	1188	305
	SO/SW Neigung 45°	345	537	826	1143	272
	O/W Neigung 45°	271	447	711	1001	205
	NO/NW Neigung 45°	202	348	567	808	147
N Neigung 45°	180	308	499	710	132	

*) ermittelt aus den Monatswerten der DIN V 4108-6

**) ermittelt mittels linearer Interpolation zwischen Werten für das Winterhalbjahr und das gesamte Jahr

Hinweis: Für die Heizgrenztemperatur 10°C stimmt die nach diesem Verfahren bestimmte Länge der Heizperiode nicht mit dem Standardwert der DIN V 4108-6 (185 d/a) überein. Die Gradtagszahl ist jedoch identisch.

2.4 Nutzwärmebedarf Warmwasserbereitung Q_w

$$Q_w = q_w A_{EB} = 1,16 \frac{kWh}{m^3 K} V_w (\vartheta_w - \vartheta_0) \quad [kWh/a] \quad (13)$$

q_w	wohnflächenbezogener Nutzwärmebedarf Warmwasser	[kWh/(m ² a)]
V_w	Jahresbedarf an warmem Wasser	[Liter/a]
ϑ_w	Zapftemperatur	[°C]
ϑ_0	Kaltwassertemperatur (Zufluss Warmwasserbereitung)	[°C]

Der Einfluss einer Verbrauchserfassung auf den Verbrauch an Warmwasser V_w ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

2.5 Parametrisierung des Nutzerverhaltens

2.5.1 Vom Nutzer abhängige Variablen

Die Bilanzgleichung für die Bestimmung des Heizwärmebedarfs lautet in einer wohnflächenbezogenen Darstellung:

$$q_h = 0,024 \frac{\text{kh}}{\text{d}} h (\vartheta_i - \vartheta_e) t_{HP} - \eta_G (q_i + q_s) \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})] \quad (14)$$

Der temperatur- und wohnflächenbezogene Wärmeverlust h ist wie folgt definiert:

$$h = h_T + h_V = \frac{H_T + H_V}{A_{EB}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (15)$$

Mit Gln. (6) und (7) wird h_V zu:

$$h_V = c_{p,\text{Luft}} \dot{h}_R \left((1 - \eta_{WRG}) n_{Anl} + \frac{1}{24} \frac{\text{d}}{\text{h}} \cdot \frac{\dot{v}_{LF,\text{offen}} z_{LF} a_F}{\dot{h}_R} t_{LF} + n_x \right) \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (16)$$

Fasst man die vom Nutzer unabhängigen Größen in Konstanten C_{LA} , C_{LF} und C_{Rest} zusammen ergibt sich:

$$h_V = C_{LA} n_{Anl} + C_{LF} t_{LF} + C_{Rest} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (17)$$

Eingesetzt in Gl. (14) ergibt sich eine Gleichung mit vom Nutzerverhalten direkt beeinflussten Variablen:

$$q_h = 0,024 \frac{\text{kh}}{\text{d}} (h_T + C_{LA} n_{Anl} + C_{LF} t_{LF} + C_{Rest}) (\vartheta_i - \vartheta_e) t_{HP} - \eta_G (q_i + q_s) \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})] \quad (18)$$

Der Anlagenluftwechsel n_{Anl} variiert in der Regel nicht sehr stark und wird im Rahmen dieser Untersuchung als vom Nutzer unabhängig angesetzt.

Als vom Nutzerverhalten stark abhängige Größen verbleiben die mittlere Raumtemperatur ϑ_i und die Fensteröffnung t_{LF} . Als Voraussetzung für eine Parametrisierung wird im Folgenden die mittlere Raumtemperatur in mehrere, vom Nutzer unabhängig festgelegte Größen zerlegt.

2.5.2 Modellierung der effektiven mittleren Raumtemperatur

Die für die Wärmeverluste verantwortliche mittlere Innentemperatur in der Heizperiode \bar{g}_i ergibt sich aus der gewählten Raumsolltemperatur g_{iSoll} und einer Reihe von Reduktionsfaktoren, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden (vgl. [Mügge 1993]):

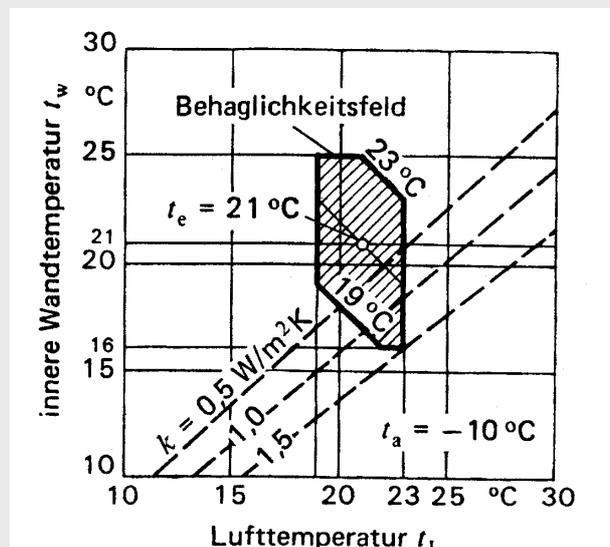
$$\bar{g}_i = \bar{g}_e + f_{ze} f_{re} f_n (g_{iSoll} - \bar{g}_e) \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})] \quad (19)$$

mit \bar{g}_e	mittlere Außentemperatur	[°C]
\bar{g}_i	mittlere Innentemperatur in der Heizperiode	[°C]
g_{iSoll}	Raumsolltemperatur	[°C]
f_{ze}	Reduktionsfaktor zeitlich eingeschränkte Beheizung	[-]
f_{re}	Reduktionsfaktor räumlich eingeschränkte Beheizung	[-]
f_n	„Nutzungsfaktor“	[-]

Raumsolltemperatur

Als Raumsolltemperatur g_{iSoll} wird im Standardfall („durchschnittlicher Nutzer“) eine empfundene (operative) Temperatur von 21°C angesetzt (Schwerpunkt des „Behaglichkeitsfeldes“ siehe Bild 1). Die operative Temperatur kann (unter der Voraussetzung geringer Luftbewegung) aus dem arithmetischen Mittel von Luft- und Strahlungstemperatur bestimmt werden. Soll die empfundene Temperatur immer gleich bleiben, so muss der Nutzer bei schlechterem Wärmeschutz die geringere Strahlungstemperatur durch eine Erhöhung der Lufttemperatur ausgleichen. Für die Energiebilanzberechnungen hat dies keine Auswirkungen, da die Bilanzierung gemäß EN 832 vereinfacht auf der Basis der operativen Temperatur erfolgt.

Bild 1: Behaglichkeitsfeld mit empfundener Temperatur als Funktion von Oberflächen- und Lufttemperatur (Quelle: [Recknagel])



Zeitlich eingeschränkte Beheizung (Nachtabsenkung)

Die Auswirkung einer Nachtabsenkung oder -abschaltung ist umso geringer, je besser der Wärmeschutz des Gebäudes ist. In einer Parameterstudie [IWU/ebök] wurde mit Hilfe der dynamischen Simulation dieser Effekt quantifiziert und als Funktion des temperatur- und wohnflächenbezogenen Wärmeverlust h dargestellt. Damit kann auch bei stationärer Bilanzierung dieser Effekt in Form des folgenden Reduktionsfaktors für zeitlich eingeschränkte Beheizung f_{ze} berücksichtigt werden [Toolbox 2002]:

$$f_{ze} = 0,9 + \frac{0,1}{1+h} \quad [-] \quad (20)$$

In der Konsequenz wird die Wirkung einer Nachtabsenkung umso geringer, je besser der Wärmeschutz des betreffenden Gebäudes ist.

Räumlich eingeschränkte Beheizung

Auch das Nichtbeheizen innerhalb der thermischen Hülle angesiedelter Räume (Treppenhäuser, Schlafzimmer, ...) wirkt sich umso geringer aus, je besser der Wärmeschutz des Gebäudes ist [IWU/ebök]. Der Reduktionsfaktor für räumlich eingeschränkte Beheizung f_{re} ist gemäß [Toolbox 2002] im Fall von Wohngebäuden definiert durch:

$$f_{re} = \frac{1}{0,5\sqrt{h} \cdot n_{re}^2 + 1} \quad [-] \quad (21)$$

n_{re} ist der nicht direkt beheizte Raumanteil innerhalb der thermischen Hülle. n_{re} nimmt im Allgemeinen mit der Zahl der Zimmer pro Wohnung bzw. mit der Wohnungsgröße zu. Auf der Basis von Erfahrungswerten wurde in [Toolbox 2002] folgende Abhängigkeit von der mittleren Wohnungsgröße eines Gebäudes A_{WE} definiert:

$$n_{re} = 0,25 + 0,2 \cdot \arctan \frac{A_{WE} - 100}{50} \quad [-] \quad (22)$$

$$A_{WE} = \frac{A_{EB}}{n_{WE}} \quad [-] \quad (23)$$

mit A_{WE} Wohnfläche je Wohnung [m²]
 n_{WE} Anzahl der Wohneinheiten des Gebäudes [-]

Für normale Wohnungsgrößen liegt n_{re} in einem Bereich zwischen 10 und 50% (Bild 2).

Bild 2: Abhängigkeit des nicht direkt beheizten Raumanteils n_{re} von der Wohnfläche

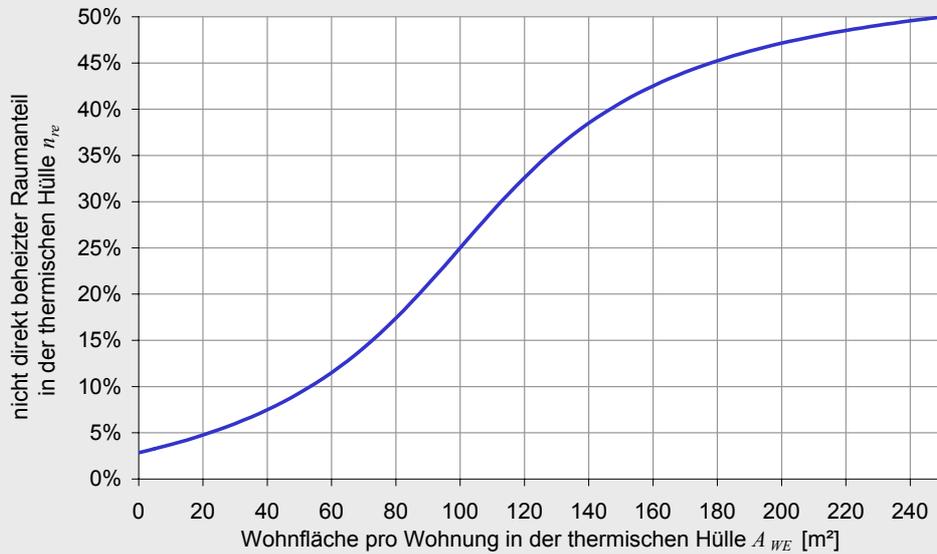
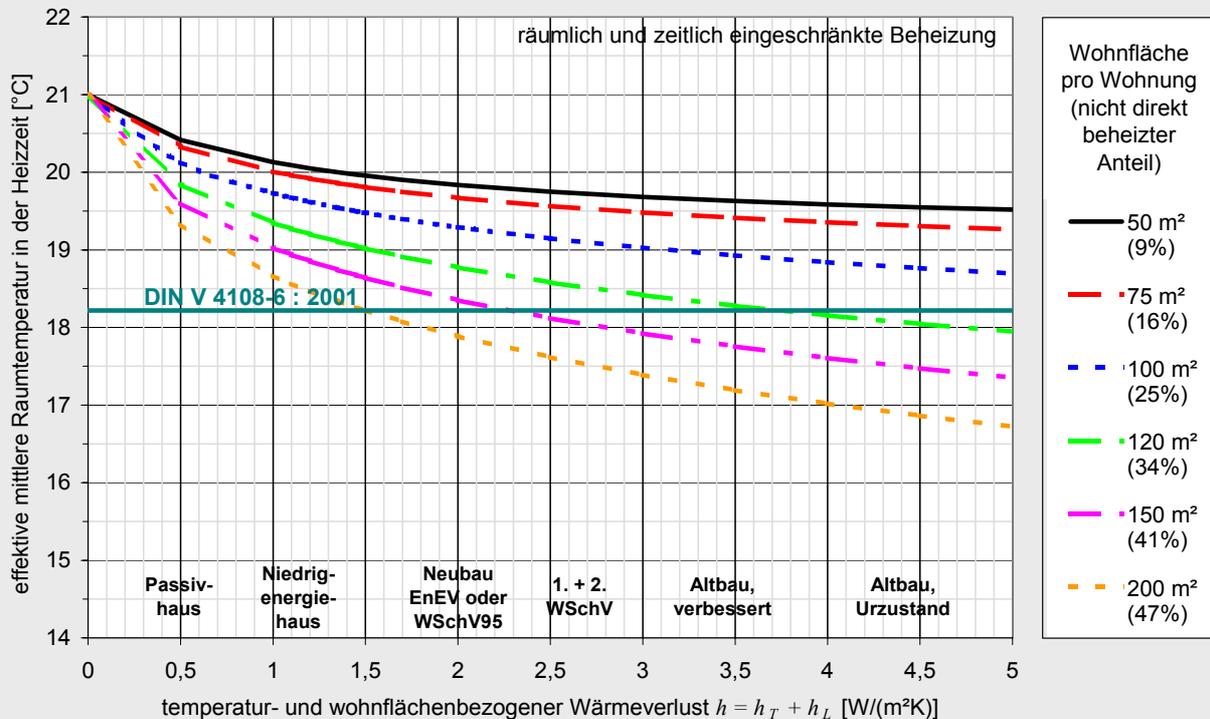


Bild 3: Mittlere Raumtemperaturen in der Heizzeit bei zeitlich und räumlich eingeschränkter Beheizung in Abhängigkeit vom Wärmeschutzstandard des Gebäudes



Normierung mit dem „Nutzungsfaktor“

Für unsanierte Bestandsgebäude liegen in Folge unterschiedlicher Auswirkungen von Nachtabsenkung und räumlicher Teilbeheizung die mittleren Raumtemperaturen bei etwa 16,5 bis 19°C (Bild 3). Die Erfahrung zeigt jedoch, dass bei Ansatz dieser Temperaturen die berechneten Werte für den Heizenergiebedarf noch deutlich höher liegen als die in der Praxis gemessenen Verbrauchswerte. Dies hat verschiedene Ursachen:

- Der Wärmeübergang an den Außen- und Innenoberflächen der Bauteile wird in der Praxis gegenüber den Standardwerten durch folgende Effekte vermindert: Schränke, Regale, mehrlagige Tapeten oder Holzverkleidungen an den Außenwänden; Teppiche, Parkett auf Fußböden; begrünte Fassaden; reduzierte Strahlungstemperatur im Bereich von Gebäudekanten.
- Bei älteren Bestandsgebäuden finden sich konstruktive Wärmebrücken meist nur im Bereich einer massiven Kellerdecke. Durch Verwendung der Außenmaße werden daher insbesondere bei kleinen Gebäuden die Verluste eher über- als unterschätzt.
- Bewohner von unsanierten Bestandsgebäuden müssen erheblich höhere Heizkosten zahlen als Bewohner von energetisch hochwertigen Häusern. Es kann daher vermutet werden, dass sie sich etwas sparsamer verhalten.

Eine Untersuchung der quantitativen Auswirkungen der genannten Effekte steht bislang noch aus. Vorläufig wird daher ein durch Vergleich von berechneten Bedarfswerten mit gemessenen Verbrauchswerten (z.B. aus Heizspiegeln) empirisch ermittelter Faktor verwendet. Dieser „Nutzungsfaktor“ wirkt wie die Reduktionsfaktoren für räumliche und zeitliche Teilbeheizung (vgl. [IWU 2001]) auf die Wärmeverluste und ist wie folgt definiert:

$$f_n = 0,5 + \frac{1}{1 + 0,5h} \quad [-] \quad (24)$$

Der Wertebereich von f_n bewegt sich zwischen ca. 0,7 (unsanierte Altbauten) und 1,5 (Passivhäuser).

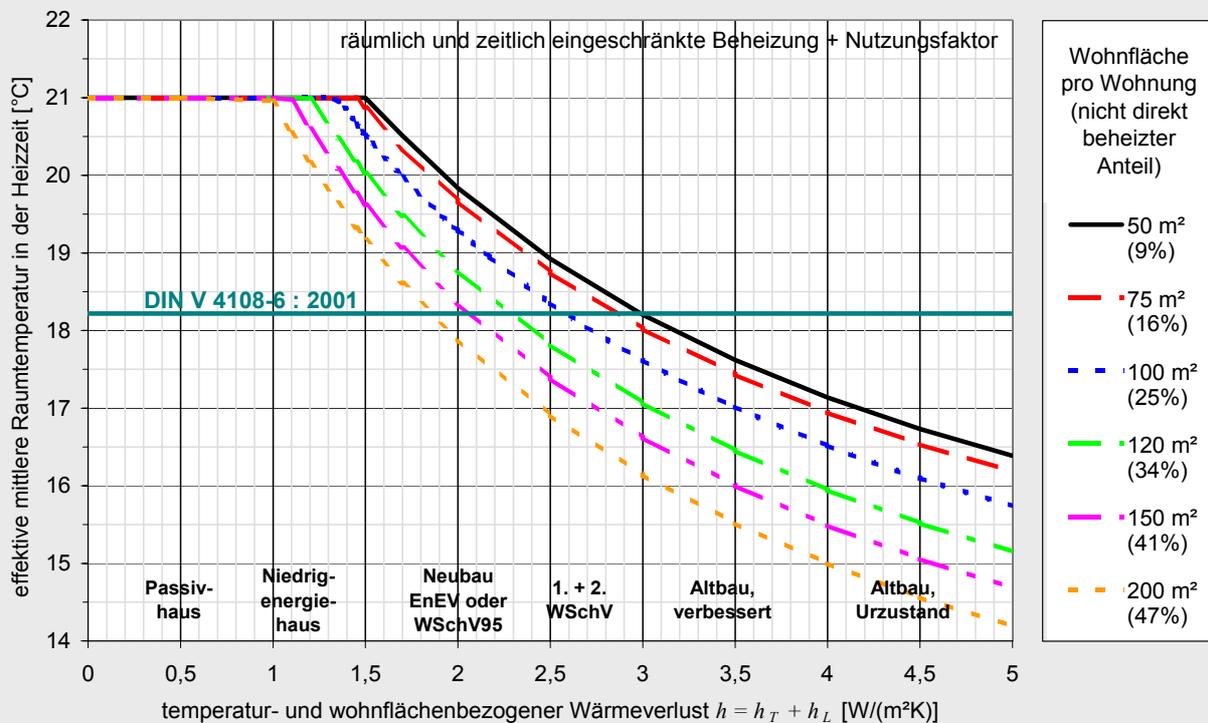
Effektive mittlere Raumtemperatur bei „typischer Nutzung“

Bild 4 zeigt die sich so als Standardrandbedingungen bei Ansatz einer Raumsolltemperatur von 21°C durch Nachtabsenkung, räumliche Teilbeheizung und Nutzungsfaktor ergebenden effektiven mittleren Raumtemperaturen in der Heizzeit. Da bei Durchführung von Maßnahmen die mittlere Raumtemperatur steigt, wird die erzielte Energieeinsparung eher konservativ abgeschätzt.

Die effektive Raumtemperatur in der Heizzeit kann nicht höher sein als die Raumsolltemperatur. Daher ist das Maximum der effektiven Raumtemperatur die Raumsolltemperatur.

Dieser Effekt konnte auch bei verschiedenen Messprojekten festgestellt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4): Ist erst einmal durch guten Wärmeschutz ein gewisses Niveau des thermischen Raumkomforts erreicht, so bringt eine weitere Verbesserung keine spürbare Erhöhung der mittleren Raumtemperatur mit sich: Passivhäuser besitzen in der Heizzeit kein signifikant höheres Temperaturniveau als Niedrigenergiehäuser.

Bild 4: Effektive mittlere Raumtemperatur – Auswirkung der Nachtabsenkung, der räumlichen Teilbeheizung und des Nutzungsfaktors



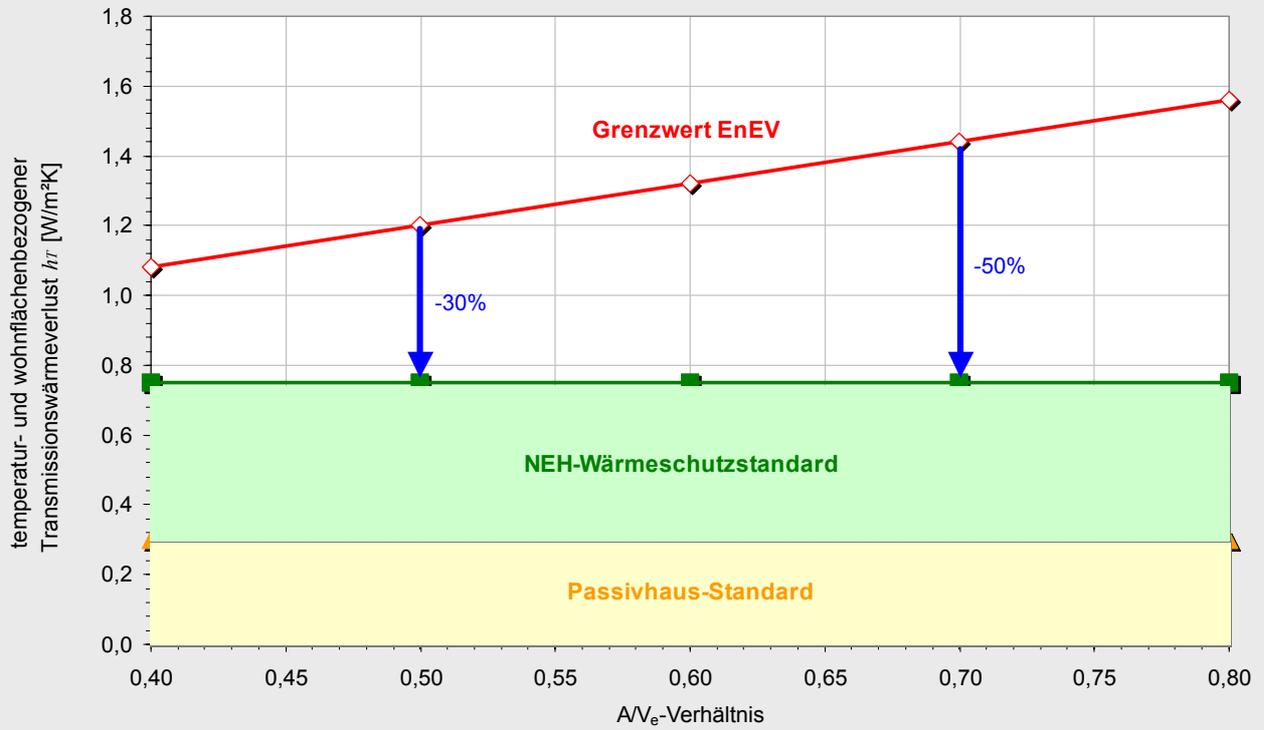
2.6 Parametrisierung der energetischen Gebäudequalität / Definition des Niedrigenergiehaus-Standards

Der Jahresheizwärmebedarf von Niedrigenergiehäusern liegt im folgendem Bereich ([LEG] und [Feist]):

- Einfamilienhäuser: 15 bis 70 kWh pro m² Wohnfläche
- Mehrfamilienhäuser: 15 bis 55 kWh pro m² Wohnfläche

Da die im Heizwärmebedarf enthaltenen Lüftungswärmeverluste vom Nutzer abhängen, dient in den folgenden Analysen nicht der Heizwärmebedarf sondern der Wärmeschutzstandard in Form des temperatur- und wohnflächenbezogenen Wärmeverlustes h_T als Parameter. Ein Mehrfamilienhaus mit Lüftungsanlage inkl. Wärmerückgewinnung hält den Niedrigenergiehaus-Standard ein, wenn h_T bei maximal 0,75 $W/(m^2K)$ liegt. Für typische A/V-Verhältnisse liegen die Transmissionswärmeverluste damit um 30 bis 50% unter den Grenzwerten nach EnEV (Bild 5). Als untere Grenze wird der Passivhaus-Standard betrachtet, bei dem h_T den Wert 0,3 $W/(m^2K)$ erreicht.

Bild 5: Niedrigenergiehaus-Standard und Grenzwert nach EnEV



3 Quantifizierung der Nutzungsparameter: Auswertung messtechnischer Untersuchungen bewohnter Gebäude

Im Folgenden werden verschiedene messtechnische Untersuchungen von Wohngebäuden ausgewertet. Ziel ist die Quantifizierung der in Abschnitt 2 dargestellten Nutzungsparameter. In Abhängigkeit vom Gebäudestandard und anderen Einflussgrößen werden Durchschnittswerte mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung sowie typische Werte für die Streuung der Nutzungsparameter ermittelt.

3.1 Der Beitrag der Heizkostenabrechnung zur Energieeinsparung

Eine grundlegende Arbeit zur Frage der Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung wurde in der Schweiz durchgeführt [Schweiz 1977]. Darin wurden zahlreiche Untersuchungen zu diesem Thema gesammelt und ausgewertet. Folgende Projekte zur verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung wurden evaluiert:

- 16-Familienhaus in Embrach (Schweiz) 1973 auf Heizkostenverteiler (HKV) umgerüstet. Endenergieeinsparung 16 %. Quelle: Unterlagen der Wärmezähler AG, Zürich
- 40 Wohnhäuser in Hamburg 1973/74 mit HKV ausgestattet. 22 % Fernwärmeeinsparung gegenüber einer Vergleichsgruppe mit 450 nicht abgerechneten Wohngebäuden. Quelle: D. Dommann in „Fernwärme International“ FWI 1975/1
- 4000 Wohnungen in Wien-Kagran 1970/71 auf HKV umgestellt. Mittlere Einsparung bis 1974/75 gegenüber Zeitraum vor verbrauchsabhängiger Abrechnung 20,7 %. Quelle: E. Kraus in Tagung „Neues Bauen“, Berlin 2.9.1975
- Ab 1962 wurde ein Großteil des Bestandes der Stadtwerke Wolfsburg (ca. 85000 WE) mit HKV ausgestattet, die durchschnittlichen Einsparungen danach lagen bei 20 %. Quelle: F. Ackermann in Tagung „Neues Bauen“, Berlin 26.11.1974 und Fernwärme International 1976/3
- 476 Wohnungen mit HKV in Leyden in den Niederlanden erreichten 1972/73 bis 1974/75 eine Einsparung von 19-20 % gegenüber 252 Vergleichswohnungen. Quelle: Unterlagen Clorius AG, Brugg

Weitere Projekte, die in dem Literaturanhang der obigen Untersuchung aufgeführt sind:

- 50 baugleiche Wohnungen in Stockholm mit HKV für Heizung und Warmwasser und 50 WE ohne HKV ergab 40 - 50 % Einsparung bei Warmwasser. Quelle: „Der Gesundheitsingenieur“ 1958/1: Adamson, B. und Reijner, E.: Wärmeverteilungszählung in Wohnhäusern; Untersuchung von 1954, Einsparungen durch Abrechnung 10%-25%, Daten zu Wärmeverbräuchen einzelner Wohnungen
- weitere Untersuchungen aus Skandinavien und der CSSR mit 23 % - bis 51 % Einsparungen beim Warmwasserverbrauch

Im Vorfeld der Einführung der ersten Heizkostenverordnung (HeizkostenV) im Jahre 1981 wurden von verschiedenen Seiten die Möglichkeiten zur Heizenergie- und somit zur Heizkosteneinsparung durch eine verbrauchsabhängige Abrechnung untersucht. Bei einer vorbereitenden wissenschaftlichen Studie [RWTH 1980] im Vorfeld der Verordnung wurden Untersuchungen zum Thema verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung gesammelt. Neben den oben bereits genannten, wurden zusätzlich noch folgende Studien herangezogen:

- Die NEUE HEIMAT Hamburg erzielt nach Einführung von HKV Einsparungen von 15 % - 20 %. Quelle: NEUE HEIMAT, „Heizungs- Warmwasserkosten und ihre Abrechnung“, Hamburg 1975
- Die Stadtwerke Wolfsburg haben die Entwicklung der Einsparung im Verlauf von 4 Jahren untersucht. Die Einsparungen seien im Laufe der Jahre noch gestiegen. Quelle: Angaben der Stadtwerke Wolfsburg 1978

Von den Autoren wurde eine mittlere Heizenergieeinsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung von 20 % bestimmt.

Bei einer Haushaltsbefragung [Rouvel 1981] wurde eine Einsparung von 4 % ermittelt, wobei jedoch der Autor betont, dass aufgrund der geringen Anzahl und der nicht identischen Vergleichswohnungen die errechnete Einsparung nicht gesichert ist.

Tab. 3 zeigt die in den genannten Untersuchungen nachgewiesenen Energieeinsparungen im Überblick. Die Einsparungen liegen größtenteils nahe an 20%. Dieser Wert wird daher im Folgenden als Referenzwert für die mögliche Heizenergieeinsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung bei Bestandsgebäuden verwendet.

Tab. 3: Auswertung der Literatur zur Einsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung

Jahr	Ort	Methode	Heizkosten- erfassung	Anzahl Gebäude		Anzahl Wohn- einheiten		Energie- einsparung
				mit HKA	ohne HKA	mit HKA	ohne HKA	
1962	Stadtwerke Wolfsburg	Umstellung	HKV			85000	85000	21%
1973	Embrach (Schweiz)	Umstellung	HKV	1	1	16	16	16%
1975	NEUE HEIMAT Hamburg	Umstellung	HKV	?				15-20%
1970/1971	Wien-Kagran	Umstellung	HKV	4000	4000			21%
1972-1975	Leyden (Niederlande)	Vergleich	HKV			476	252	20%
1973/1974	Hamburg	Vergleich	HKV	40	450			22%
1980	Deutschland	Vergleich	HKV			42	27	4%

3.2 Das Nutzerverhalten und seine Abhängigkeit von Gebäudeparametern

Im folgenden Abschnitt soll auf der Basis von messtechnisch untersuchten Gebäuden das Nutzerverhalten und seine Abhängigkeit von Gebäudeparametern untersucht werden. Zunächst werden die ausgewerteten Projekte kurz beschrieben (Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2). Es folgt eine Zuordnung des gemessenen Heizwärmeverbrauchs der Gebäude zu ihrem Wärmeschutzstandard (Abschnitt 3.2.3). Dann werden die Streuungen für Raumtemperatur und Lüftungsverhalten ermittelt, um Anhaltspunkte für „sparsames“ und „verschwenderisches“ Verhalten zu gewinnen (3.2.4). Darüber hinaus werden die gefundenen Abhängigkeiten der mittleren Raumtemperatur von den Gebäudeparametern mit dem Raumtemperaturmodell verglichen (3.2.5). Es folgt eine Auswertung der gemessenen Fensteröffnungszeiten im Hinblick auf die Abhängigkeit von den Gebäudeparametern und eine Zuordnung zu Luftwechselraten (3.2.6 bis 3.2.8). Zuletzt werden Indizien für den Einfluss der verbrauchsabhängigen Abrechnung auf das Nutzerverhalten (3.2.9) gesammelt.

3.2.1 Ausgewertete Projekte mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung

Die größte Gruppe von Projekten, die ausgewertet werden konnten, umfasst naturgemäß Wohneinheiten mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung. Niedrigenergiehäuser waren dabei am häufigsten vertreten. Weiterhin wurde eine Passivhaussiedlung und ein Mehrfamilienhaus ausgewertet, letzteres wurde Anfang der 80iger Jahre errichtet. Für einen Teil der Auswertungen konnten zusätzlich Daten aus Altbauten berücksichtigt werden.

Es wurden die in Tab. 4 aufgelisteten Projekte ausgewertet. Dabei standen 128 Einzelwohneinheiten und zusätzlich aus drei Altbauprojekten Mittelwerte, die in insgesamt 114 Wohneinheiten gemessen wurden, zur Auswertung zur Verfügung. Davon besaßen 39 Wohneinheiten eine Wärmehintergewinnung, 80 eine Abluftanlage und in 9 wurde über die Fenster gelüftet. Wenn mehrere Messjahre vorlagen, wurde ein typisches Jahr ausgewählt. Aufgrund der relativ geringen Anzahl der Wohneinheit pro Projekt wurden alle verfügbaren Messwerte mit einbezogen, somit auch die extremen Ausreißer.

Nicht bei allen Projekten standen alle ausgewerteten Parameter zur Verfügung. Besonders Messdaten zu Fensteröffnungszeiten waren nur begrenzt zugänglich, so dass die Projekte, für die eine Auswertung der Fensteröffnungsgewohnheiten durchgeführt werden konnte, in der Tabelle besonders vermerkt sind.

Besonders interessant sind die Ergebnisse, die die Abrechnungsfirma Techem über einen Zeitraum von Oktober 1988 bis Mai 1989 in 66 Wohneinheiten aufgezeichnet hat. Für den gesamten Zeitraum wurden im Bericht die Mitteltemperaturen der einzelnen Zimmer ausgegeben. Da keine weiteren Gebäudedaten bekannt sind, wurden diese Temperaturen mit mittleren Flächen und Wärmeverlusten aus der Gebäudetypologie für die Bundesrepublik Deutschland ergänzt und in die Auswertung mit aufgenommen.

Tab. 4: Ausgewertete Messdaten von Wohneinheiten mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung

Projekt	Anzahl WE	Standard	Heizsystem	Messzeitraum	Art der Lüftung	Fensteröffnung gemessen?	Literatur
MFH Essen-Kraienbruch	11	NEH	Wärmepumpe mit Fußbodenheizung, Bad: elektrisch	1997/98	Abluft	Nein	[Riedel]
MFH Wien-Leopoldstadt	5	NEH	Fernwärme	1996/97	Zentrale Abluft	Ja	[Reiß 1999]
DH Heidenheim	12	NEH, 2 x WSchV 1984	Gasthermen mit versch. Verteilungen	1992/93	1 x Fensterlüftung 8 x WRG	Ja	[Reiß 1994]
RH Bochum-Werne	9	NEH	Gas-Brennwert	1996/97	1 x WRG 2 x Abluft 6 x Fenster	Ja	[Kluttig]
MFH Mannheim	12	NEH	Gas-Brennwert	1996/97	6 x WRG, 6 x Abluft	Ja	[Reiß 1997]
MFH Nordstedt	8	NEH	Fernwärme	1993/94	Abluft	Nein	[Busching]
RH Niedernhausen	41	NEH	Nahwärme	1995	Abluft	Nein	[Loga 1997]
RH Wiesbaden-Dotzheim	22	PH	Nahwärme	2001/02	WRG	Ja	[LUM 2003]
RH Wiesbaden-Dotzheim	8	NEH	Nahwärme	2001/02	Abluft	Ja	[LUM 2003]
MFH Hameln und HH Karlsruhe	12 + 36	Altbau	Gas / Fernwärme	nur Gesamtverbräuche	Fensterlüftung	Nein	[WWF]
Techem Untersuchung 1988/89	66	Altbau		1988/89 nur Mittelwert aller WEs	Fensterlüftung	Nein	[Techem] Fehlende Angaben wurden mit dem Mittelwert des deutschen Gebäudebestands ergänzt

Im Folgenden sind die wichtigsten Projekte aus Tab. 4 kurz beschrieben.

Reihenhäuser Wiesbaden

Für die Reihenhäuser in Wiesbaden-Dotzheim mit 22 Passiv- und 8 Niedrigenergiehäusern liegen sehr detailliert Daten zu allen wichtigen Nutzerparametern vor. Die gesamte Siedlung wurde 1997 errichtet und die Häuser werden überwiegend von Familien als Eigentum bewohnt. Die Niedrigenergiehäuser weisen einen, auch für diesen Baustandard, überaus guten Wärmeschutz auf. Alle Passivhäuser besitzen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die Niedrigenergiehäuser Abluftanlagen.

Reihenhäuser Bochum-Werne

Bei diesen zwei Reihenhauszeilen in Ziegelbauweise wurde 9 Häuser nach Niedrigenergiestandard 1996 errichtet. Obwohl der Wärmeschutz der Gebäudehülle und die Anlagentechnik variiert wurde, liegt der Heizwärmebedarf aller Gebäude in der gleichen Größenordnung. Bei den Häusern wird überwiegend über die Fenster gelüftet, es existieren aber auch zwei Abluftanlagen und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Doppelhäuser Heidenheim

Die sechs Doppelhäuser mit 12 Haushälften wurden 1990/91 errichtet. Zwei Doppelhäuser wurden nach dem Standard der WSchV '84 geplant, die übrigen nach dem Niedrigenergiehausstandard. Auch hier variieren Wärmeschutzstandard und Anlagentechnik, außer bei den Referenzhäusern wird der Niedrigenergiehaus-Standard mehr oder weniger deutlich unterschritten. Die beiden Referenzhäuser und eine Doppelhaushälfte werden über die Fenster gelüftet, alle anderen mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Mehrfamilienhaus Mannheim

Die beiden 1994 errichteten Mehrfamilienhäuser in Mannheim mit insgesamt 12 Wohneinheiten besitzen einen einheitlichen Wärmeschutz und je zur Hälfte Abluftanlagen und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Häuser erreichen den Niedrigenergiehausstandard und sind vermietet.

3.2.2 Ausgewertete Projekte ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung

Es konnten ebenfalls einige Projekte gefunden werden, bei denen keine verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung vorgenommen wird (Tab. 5). Die Auswertung dieser Gebäude konnte einige Hinweise auf die Veränderungen des Nutzerverhaltens gegenüber Nutzern liefern, die für die durch sie verursachten Heizkosten aufkommen müssen.

Tab. 5: Ausgewertete Messdaten von Wohneinheiten ohne verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung

Projekt	Anzahl WE	Standard	Heizsystem	Messzeitraum	Art der Lüftung	Fensteröffnung gemessen?	Literatur
MFH Berlin	7	WSchV 1978	Fernwärme	1982/83		(Ja)	[Rouvel]
Zürich Limmatviertel	30	Altbau, teilweise modernisiert	Fernwärme	1980/81	Fensterlüftung	(nur einzelne Tage)	[Brunner]
Studentenwohnheim Jülich	11	Neubau WschV bis PH		2001/02	Fenster, Abluft und WRG	Ja	bisher unveröffentlichte Messdaten des Solarinstituts Jülich

Im Folgenden sind die Projekte zur besseren Interpretation kurz beschrieben.

MFH Berlin

Das Mehrfamilienhaus in der Bülowstraße 96/97 in Berlin wurde 1982 fertiggestellt. Von den 9 vermessenen Wohneinheiten waren 7 bewohnt und sind in die Auswertung eingeflossen. In der ersten Heizperiode waren noch keine Heizkostenverteiler montiert und die Kosten wurden pauschal umgelegt. Aus diesem Grund wurde diese Heizperiode für die Auswertungen herangezogen. Die meisten Wohnungen besaßen Lüftungsanlagen, teilweise mit Wärmerückgewinnung.

Zürich Limmatstraße

In der Wohnkolonie Limmatstraße in Zürich wurden 1980/81 in einer größeren Siedlung in unterschiedlichem Umfang Gebäude modernisiert. In drei Gebäuden wurde ein Messprogramm durchgeführt, in einem wurde auch vor der Modernisierung bereits eine Untersuchung zu den Raumtemperaturen und den Fensteröffnungszeiten durchgeführt, so dass hier ein Vorher-Nachher-Vergleich möglich ist. Die Fensteröffnungszeiten wurden durch manuelle Auswertung der Fensteröffnung zu bestimmten Zeitpunkten typischer Wintertage bestimmt. Die Öffnungszeiten dieser (kalten) Tage wurden mit einem aus den ausgewerteten NEH-Projekten bestimmten Gewichtungsfaktor von 1,2 für die gesamte Heizzeit hochgerechnet (anstelle einer Verbrauchsgewichtung).

Bei dem Projekt Limmatstraße wurden die Fensteröffnungszeiten am 23.02.1983 und am 01.03.1983 erhoben, so dass die Messwerte mit einem Faktor von 1,2 auf die Heizperiode umgerechnet wurden.

Solarcampus Jülich

In diesem Neubau einer Studentensiedlung an der Fachhochschule Jülich wurden Reihenhäuser nach WSchV 1995, EnEV und als Passivhaus errichtet. Die Studenten zahlen eine pauschale Warmmiete – es findet somit keinerlei Verbrauchsabrechnung statt. Bei diesem Projekt muss einschränkend berücksichtigt werden, dass die Reihenhäuser mit bis zu sechs Zimmern eine untypische Nutzung aufweisen – Aufenthalts- und Schlafbereich sind hier räumlich nicht getrennt. Die Daten stammen aus unveröffentlichten Messdaten, die das Solarinstitut Jülich freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

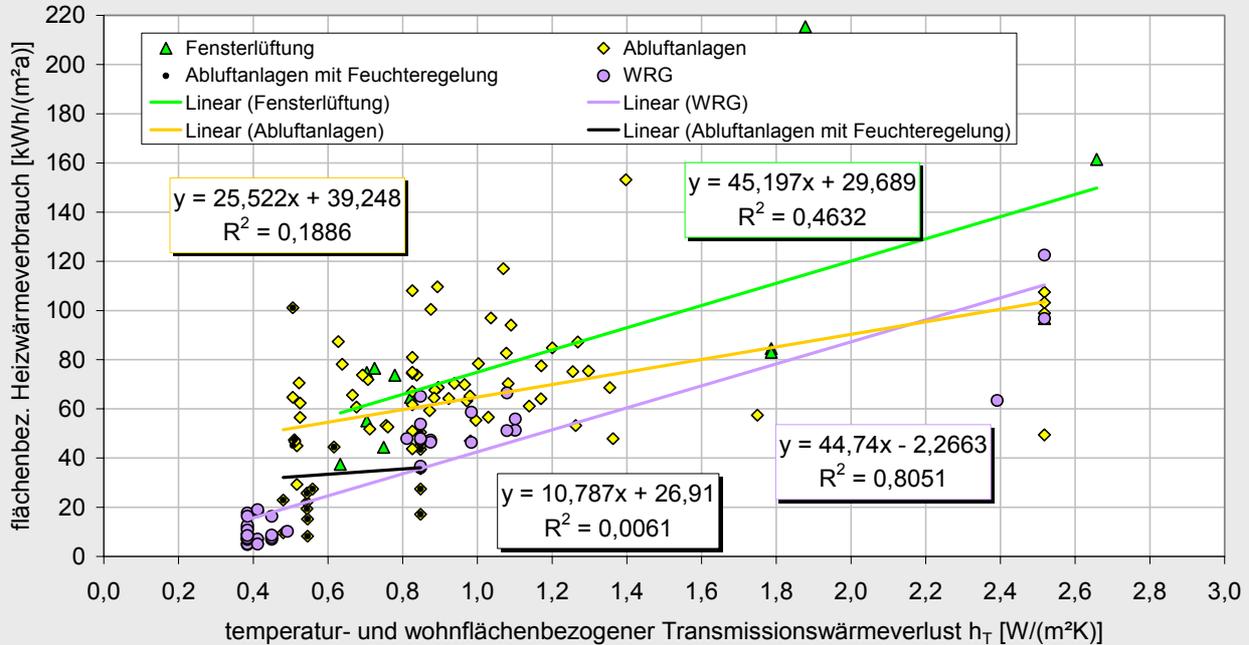
3.2.3 Einfluss des Wärmeschutzstandards auf den Heizwärmeverbrauch

Bild 6 zeigt den Heizwärmeverbrauch der unterschiedlichen vermessenen Wohneinheiten in Abhängigkeit vom temperatur- und wohnflächenspezifischen Wärmeverlust h_T – getrennt für verschiedene Arten der Lüftung. Man erkennt trotz der starken Streuung der Einzelwerte, dass bei der Fensterlüftung ein signifikanter, bei Wohneinheiten mit Wärmerückgewinnung sogar ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen h_T und dem Heizwärmeverbrauch besteht. Für Abluftanlagen wird dieser Zusammenhang in Bild 6 nicht signifikant, was an den Objekten mit feuchtegeregelten Abluftanlagen liegt, die aus diesem Grund in der Darstellung besonders markiert sind. Nimmt man diese feuchtegeregelten Abluftanlagen aus der Auswertung der Verbräuche aller Abluftanlagen heraus, so wird für die verbleibenden Wohneinheiten der Zusammenhang zwischen h_T und Heizwärmeverbrauch ebenfalls signifikant. Die Gründe für die Abweichungen der feuchtegeregelten Abluftanlagen wurden in [LUM 2003] und [NRW 1999] untersucht und dokumentiert.

Für den NEH-Wärmeschutzstandard $h_T = 0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergibt sich für Gebäude ohne Wärmerückgewinnung im Mittel ein wohnflächenbezogener Heizwärmebedarf von ca. $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, für Gebäude mit Wärmerückgewinnung ca. $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Differenz ist durch die zurückgewonnene Wärme gut zu erklären.

Die Steigung der Kurven gibt den effektiven Gradtagszahl-Faktor F_{GT} wieder. Sie liegt für die signifikanteren Graden (Fensterlüftung und Wärmerückgewinnung) bei $45 \text{ kWh}/\text{a}$ (die gute Übereinstimmung der beiden Steigungen ist wohl Zufall). Nach dem theoretischen Modell aus Abschnitt 2 sollte der Wert für das gewählte Durchschnittsklima etwa bei $70 \text{ kWh}/\text{a}$ liegen. Mögliche Ursachen für die Differenz sind gegenüber dem deutschen Durchschnittsklima deutlich mildere Winter in den Messjahren, Abweichungen bei den Gebäudedaten sowie eventuell unterschiedliches Nutzerverhalten – insbesondere bei den Gebäuden mit geringerem Wärmeschutzstandard ist die Zahl der eingeflossenen Projekte ja sehr gering und der Kurvenverlauf Zufälligkeiten unterworfen.

Bild 6: Zusammenhang zwischen dem temperatur- und wohnflächenbezogenem Wärmeverlust h_T und dem Heizwärmeverbrauch (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)



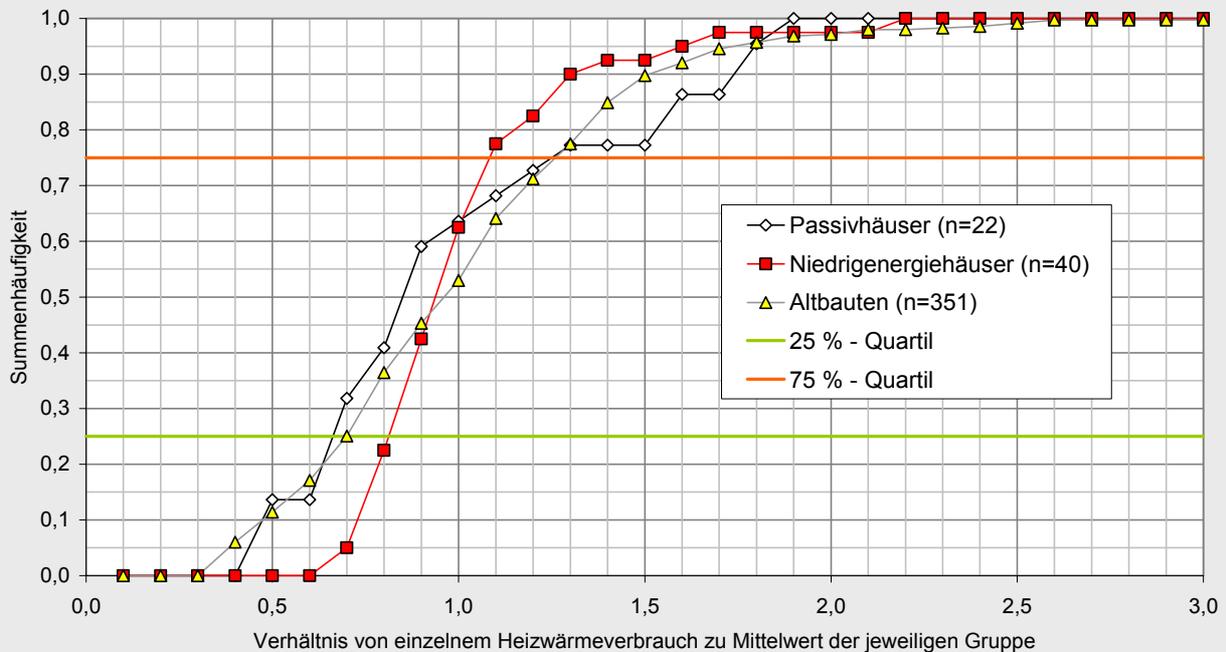
3.2.4 Die Streuung der Nutzungsbedingungen und der Verbrauchswerte

Bild 7 zeigt die aufsummierte relative Häufigkeit des Heizwärmeverbrauchs im Verhältnis zum mittleren Verbrauch des jeweiligen Bauprojekts für drei verschiedene energetische Standards. Dargestellt sind die Ergebnisse aus 22 Passivhäusern, 40 Niedrigenergiehäusern und 351 Altbauwohneinheiten – jeweils aus dem gleichen Bauprojekt. Man erkennt, dass trotz des sehr unterschiedlichen absoluten Verbrauchs (Maximum der Passivhäuser: 19 kWh/(m²*a), Maximum der Altbauwohneinheiten 655 kWh/(m²*a)), der relative Verlauf der Verteilungen ähnlich ist. Bei allen drei Projekten werden die einzelnen Wohneinheiten verbrauchsabhängig abgerechnet.

Dabei sind für die weitere Auswertung der Median (50 %-Quartil) für typisches Nutzerverhalten und der Mittelwert des unteren (25 %) bzw. oberen (75 %) Quartils für sparsames bzw. verschwenderisches Verhalten besonders interessant. Extreme Ausreißer kommen überall vor, verfälschen durch die Betrachtung der Quartilmittelwerte jedoch nicht das Ergebnis.

Bild 8 zeigt die Verteilung der Summenhäufigkeit der Raumtemperaturen aller untersuchten Neubauprojekten, getrennt nach Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der Niedrigenergiehäuser diskutiert, die Passivhäuser sind als zusätzliche Information in den beiden Diagrammen ebenfalls dargestellt.

Bild 7: Summenhäufigkeit des relativen Heizwärmeverbrauchs für Passivhäuser, Niedrigenergiehäuser und Altbauten (Projekte PH Wiesbaden, NEH Niedernhausen, Altbauten Berlin-Märkisches Viertel [Weidlich])



Der Medianwert² der Raumtemperaturen erreicht 20,2 °C, wobei berücksichtigt werden muss, dass die mittlere Wohnfläche mit 115 m² vergleichsweise groß ist. Bei 19,3 °C wird das 25 %-Quartil erreicht. Der zugehörige arithmetische Mittelwert aller Messwerte zwischen dem Minimum und dem 25 %-Quartil liegt bei 18,6 °C. Entsprechend beträgt der 75 %-Quartilswert 21,0 °C und der Mittelwert dieses oberen Quartils 21,8 °C.

Für die Fensteröffnungszeiten ist in Bild 9 die entsprechende Verteilung dargestellt. Der Medianwert liegt bei 1,5 Stunden Öffnungsdauer pro Fenster und Tag, das untere Quartil bei 0,5 Stunden, der Mittelwert des unteren Quartils bei 0,2 Stunden. Das obere Quartil entspricht 3 Stunden und der Mittelwert des oberen Quartils 4,7 Stunden Öffnung pro Fenster und Tag.

In Tab. 6 sind die statistischen Kenndaten der ausgewerteten Projekte zusammengefasst.

In Abschnitt 4 werden zur Beschreibung der Wenig- und der Vielverbraucher Randbedingungen festgesetzt, die an die Mittelwerte der unteren und oberen Quartile aus den Messprojekten angelehnt sind.

² d. h. der 50te Wert einer aufsteigend geordneten Reihe von 100 Werten, der bei einer idealen Gauß'schen Verteilung dem arithmetischen Mittel entspricht

Bild 8: Summenhäufigkeiten für die mittlere Raumtemperatur für 22 Passivhäuser und 104 Niedrigenergiehäuser

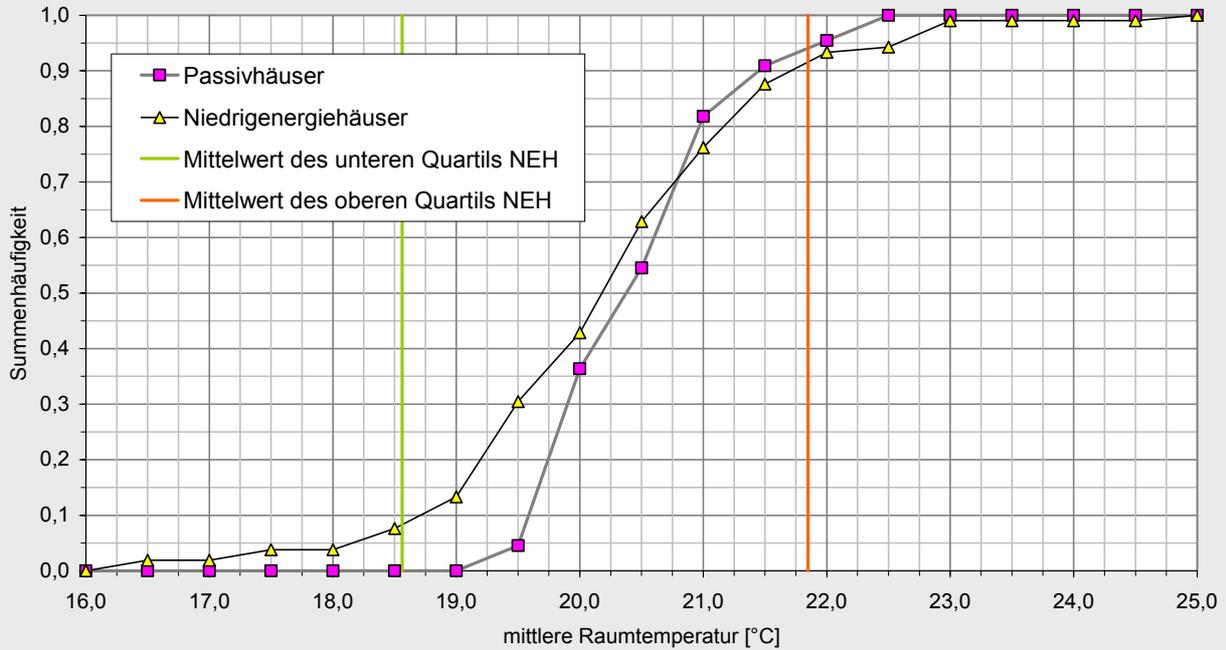
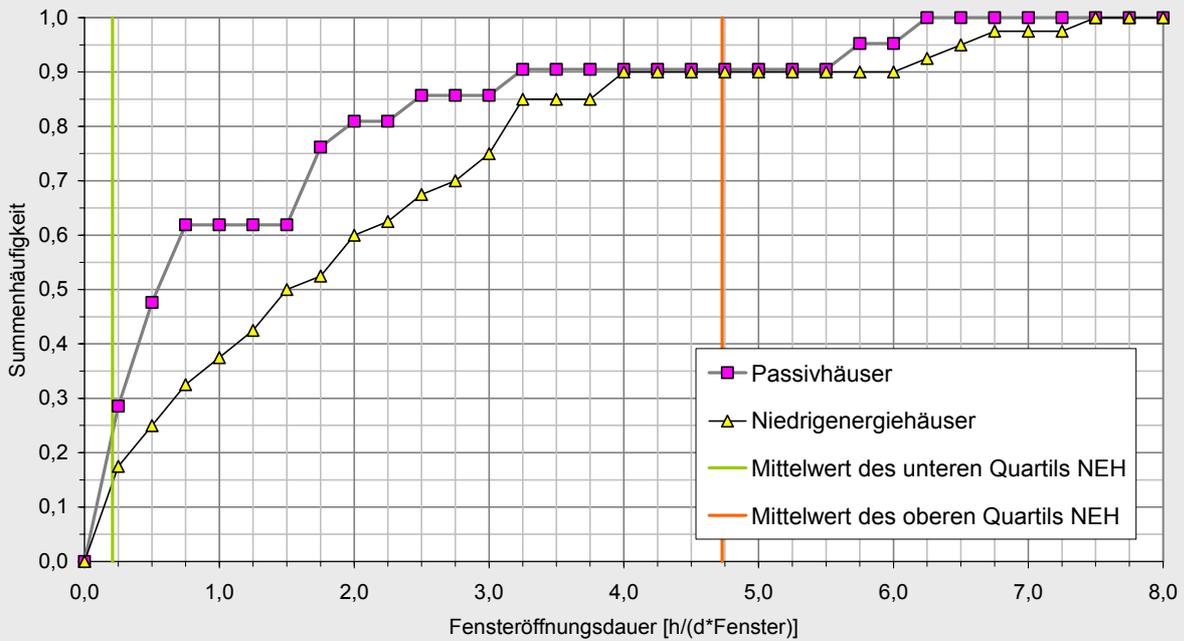


Bild 9: Summenhäufigkeit der mittleren Fensteröffnungsdauer für 22 Passivhäuser und 40 Niedrigenergiehäuser



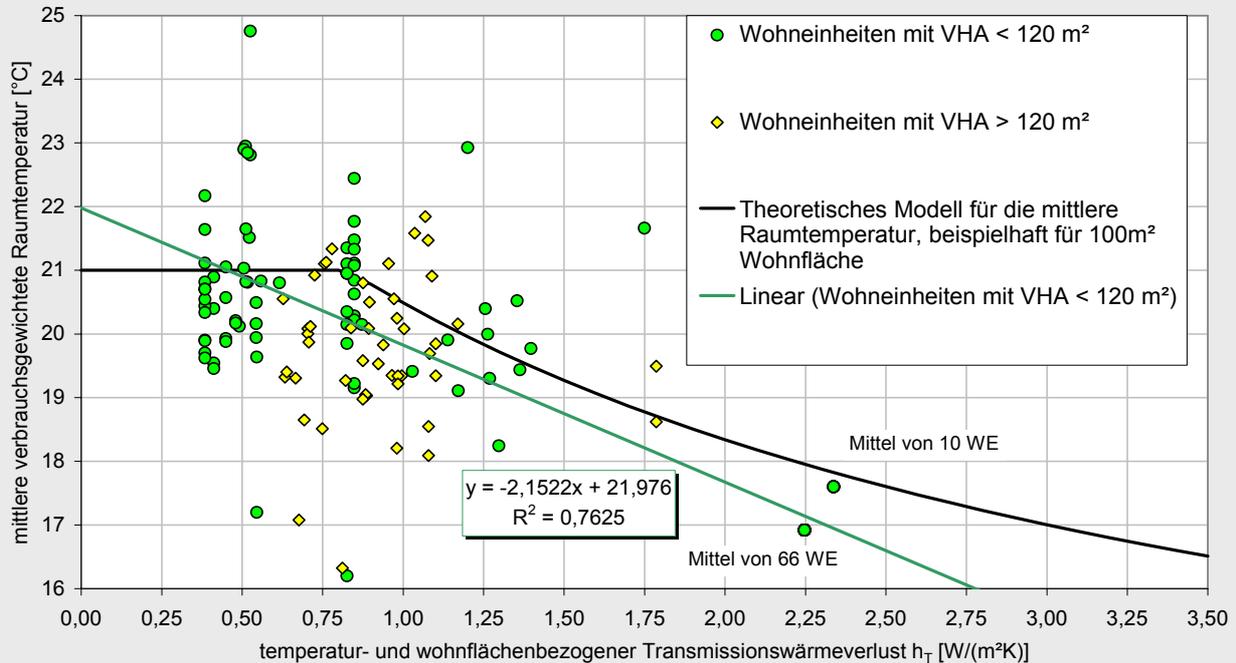
Tab. 6: Kennwerte des Nutzerverhaltens für die Passivhäuser Wiesbaden und alle ausgewerteten Niedrigenergie-Neubauten

	Minimum	Mittelwert des 25 %-Quartil	Median (50 %-Quartil)	Mittelwert	Mittelwert des 75 %-Quartil	Maximum
Passivhäuser Wiesbaden						
Heizwärmeverbrauch [kWh/(m ² a)]	4,9	5,8	9,0	10,5	17,6	19,0
verbrauchsgewichtete Raumtemperatur [°C]	19,5	19,7	20,4	20,4	21,3	22,2
verbrauchsgewichtete Fensteröffnungsdauer [h/(d*Fenster)]	0,07	0,15	0,52	1,34	3,85	6,12
Niedrigenergiehäuser (alle Neubauprojekte)						
Heizwärmeverbrauch [kWh/(m ² a)]	8,2	30,8	60,0	60,3	91,7	155,2
verbrauchsgewichtete Raumtemperatur [°C]	16,2	18,6	20,2	20,2	21,8	24,8
verbrauchsgewichtete Fensteröffnungsdauer [h/(d*Fenster)]	0,03	0,21	1,48	2,04	4,73	7,46

3.2.5 Überprüfung des Raumtemperaturmodells

Wird die mittlere Raumtemperatur über dem temperatur- und wohnflächenbezogenen Wärmeverlust h_T aufgetragen, so ergibt sich das Diagramm in Bild 10. Dabei wurden nur Wohneinheiten mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung berücksichtigt und zwischen Wohneinheiten größer und kleiner 120 m² Wohnfläche unterschieden. Die Raumtemperaturen reichen von 16 °C bis 25 °C. Die Messwerte der verbrauchsabhängig abgerechneten Altbau-Wohneinheiten sind zwar nur in zwei Punkten dargestellt, diese repräsentieren jedoch 76 Wohneinheiten. Die Raumtemperaturen liegen mit ca. 17 °C deutlich unter dem Mittel aller anderen ausgewerteten Wohnungen. Für Wohnungen kleiner 120 m² wurde die Ausgleichsgerade eingezeichnet. Für nicht modernisierte Altbauten ($h_T = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ergeben sich 15,5°C, für den Niedrigenergiehaus-Standard ($h_T = 0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) 20,4 °C.

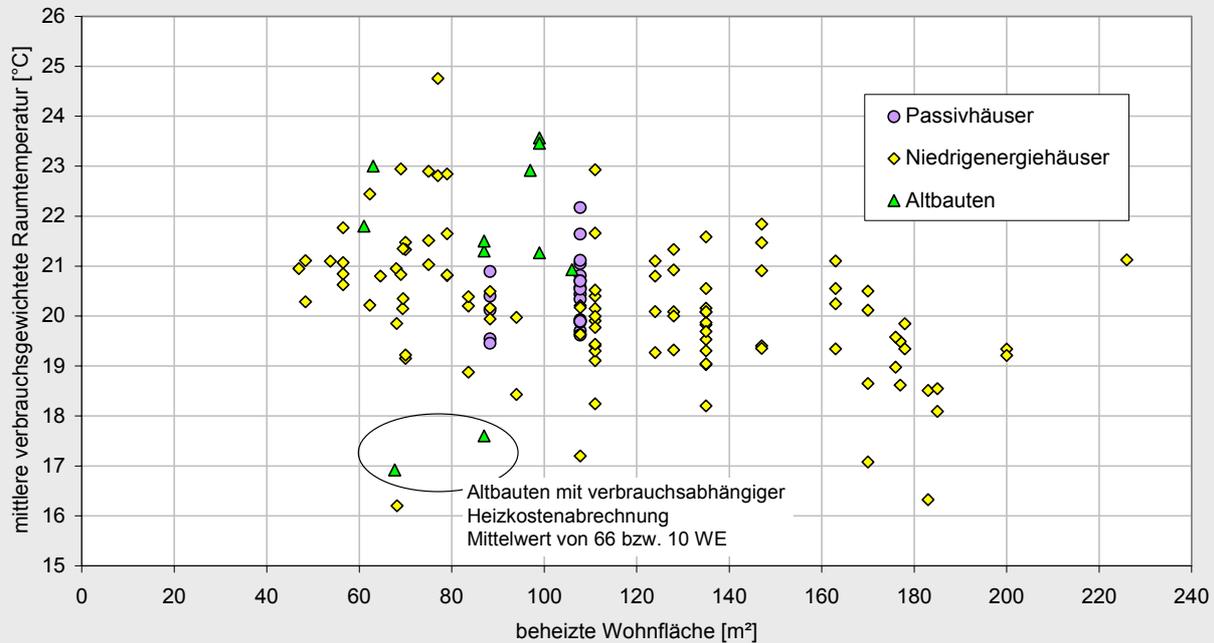
Bild 10: Zusammenhang zwischen der gemessenen Raumtemperatur und dem temperatur- und wohnflächenbezogenen Verlusten h_T



Gleichzeit ist in Bild 10 beispielhaft auch der sich aus dem Raumtemperaturmodell (Abschnitt 2.5.2) ergebende Verlauf für eine 100 m² Wohnung bei typischer Nutzung dargestellt. Die Kurve liegt relativ nahe an der Ausgleichsgeraden.

Bild 11 zeigt den Zusammenhang zwischen der beheizten Wohnfläche und der mittleren Raumtemperatur. Hier ist trotz der starken Streuung der Einzelwerte eine Abhängigkeit in der Art zu erkennen, dass bei ansteigender Wohnfläche die Raumtemperatur abnimmt. Dies ist durch die Teilbeheizung einzelner Zimmer auch plausibel. In kleineren Wohneinheiten hingegen werden alle Zimmer gleichmäßiger beheizt, so dass die mittlere Raumtemperatur ansteigt. Würde eine Ausgleichskurve für alle dargestellten Punkte eingezeichnet, wäre das Bestimmtheitsmaß dieser Ausgleichsgerade jedoch gering, da auch Altbauten (sowohl nicht abgerechnete als auch abgerechnete) mit enthalten sind.

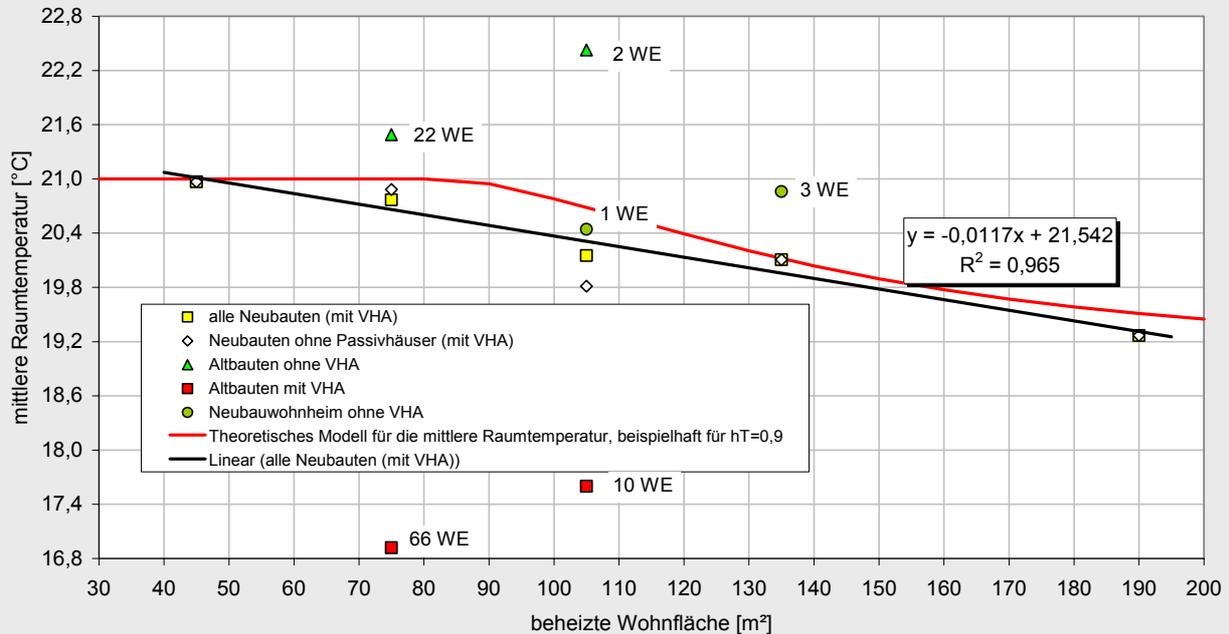
Bild 11: Zusammenhang zwischen (mittlerer) Wohnungsgröße und gemessener Raumtemperatur (Einzelmesswert, nicht aggregiert)



Deutlicher wird der Zusammenhang von beheizter Wohnfläche und Raumtemperatur, wenn die Mittelwerte von Klassen der Wohnungsgrößen betrachtet werden (Bild 12). Die Quadrate zeigen jeweils den Mittelwert der Raumtemperatur für die zugehörige Klasse der Wohnungsgrößen (im Mittelwert der Klasse). Es zeigt sich im untersuchten Bereich eine lineare Abhängigkeit der Raumtemperatur von der Wohnungsgröße. Bei kleinen Wohneinheiten nähert sich die Kurve bei 21 °C ihrem Maximum. Das Bestimmtheitsmaß liegt sehr nahe an 1,0 und bestätigt die im Bild dargestellte Kurvengleichung, wenn auch die geringe Anzahl von nur fünf Punkten in dieser Darstellungsart berücksichtigt werden muss.

Auch hier ist zum Vergleich wieder der Verlauf des theoretischen Modells für die mittlere Raumtemperatur eingetragen. In Anbetracht der gesamten Unsicherheit ist die Übereinstimmung des Temperaturniveaus und der Abhängigkeit von der Wohnungsgröße wiederum recht hoch. Damit scheint es gerechtfertigt, das Raumtemperaturmodell als Grundlage für die weiteren Untersuchungen in Abschnitt 4 und 5 zu verwenden.

Bild 12: Zusammenhang zwischen der (mittleren) Wohnungsgröße einer Klasse und der zugehörigen Raumtemperatur

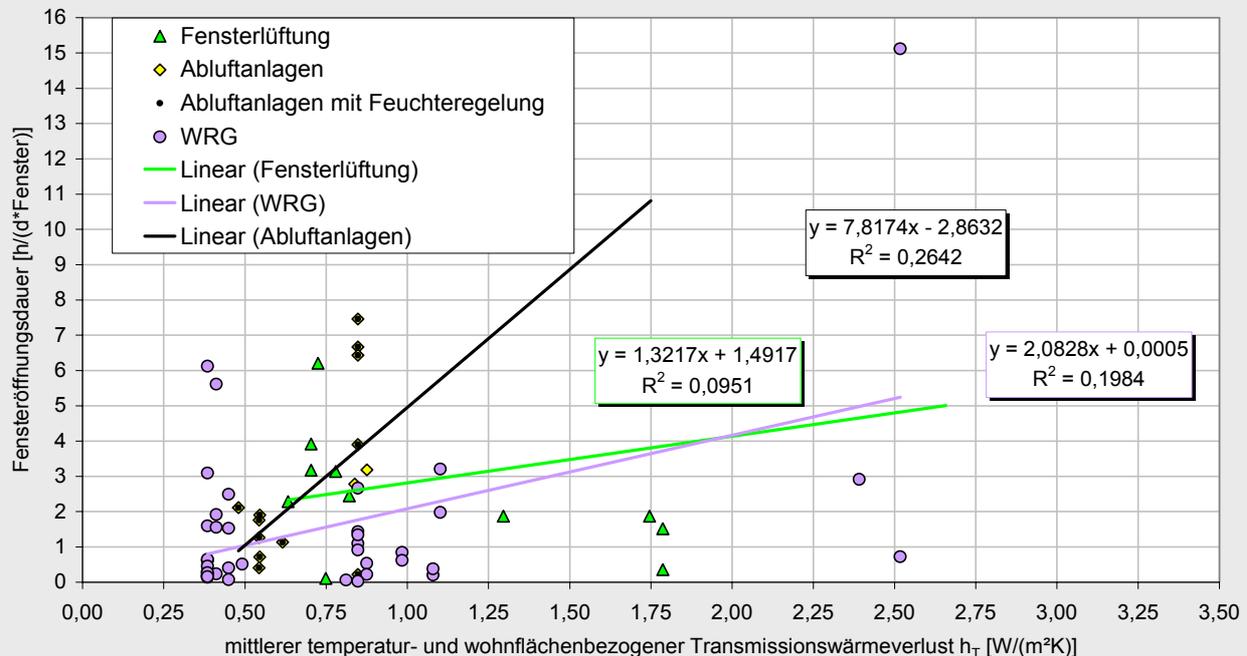


Zum Vergleich sind in Bild 12 die Werte der jeweiligen Gruppe von Wohneinheiten ohne Berücksichtigung der Passivhäuser dargestellt (Rauten). Dadurch sinkt der Wert der mittleren Gruppen (90 m² bis 120 m²) leicht ab – an der grundsätzlichen Aussage ändert sich dadurch jedoch nichts.

Gleichzeitig sind in Bild 12 auch die Raumtemperaturen aus Altbauten mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung (rote Quadrate) zu sehen, die deutlich unter denen der Neubauten liegen sowie Temperaturen aus Wohneinheiten, in denen keine verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung vorgenommen wird. Die grünen Dreiecke zeigen Altbauten, die grünen Kreise Neubauten ohne verbrauchsabhängiger Abrechnung und mit teilweise deutlich höheren Raumtemperaturen. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nur eine begrenzte Anzahl von Messdaten aus nicht verbrauchsabhängig abgerechneten Wohneinheiten vorliegen, bestätigt sich die Annahme, dass bei fehlender Abrechnung bei Neubauten die Raumtemperaturen bis zu 1 K über denen von verbrauchsabhängig abgerechneten Wohneinheiten liegen.

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen auch die Auswertungen aus [Rouvel 1981]. Für die Gruppe der Mehrfamilienhäuser mit mehr als zwei Stockwerken wurden in ca. 60 Wohneinheiten sowohl die Raumtemperaturen in der Nutzungszeit als auch der Anteil der beheizten Fläche an der Wohnfläche mit und ohne verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung ermittelt. Bei einer Heizkostenabrechnung nach Wohnfläche lagen die Raumtemperaturen bei 21,1 °C und 85 % der Wohnfläche wurde beheizt. Bei verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung wurde Raumtemperaturen von 20,5 °C erreicht und nur 76 % der Wohnfläche beheizt. Diese Resultate bestätigen die Ergebnisse aus Bild 12.

Bild 13: Zusammenhang zwischen Wärmeschutzstandard und gemessener Fensteröffnung



3.2.6 Fensteröffnungsdauer und Wärmeschutzstandard

Bild 13 zeigt den Zusammenhang zwischen dem temperatur- und wohnflächenbezogenen Wärmeverlust h_T und der Fensteröffnungsdauer. Es ist ein breites Streuband der Fensteröffnungszeiten über den Wärmeverlust zu erkennen. Die eingezeichneten linearen Trendlinien lassen weder für Wohneinheiten mit mechanischer Lüftung noch für solche mit Fensterlüftung einen funktionalen Zusammenhang erkennen.

3.2.7 Herleitung des effektiven Luftwechsels

Die genaue Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Fensteröffnung und Luftwechsel bzw. tatsächlichem Wärmeverlust ist nur für ein konkretes Gebäude und dann auch nur mit großem Aufwand möglich. An dieser Stelle soll jedoch versucht werden, zumindest grobe Anhaltswerte für den Luftwechsel zu ermitteln. Hierzu wird auf ein Raumdurchströmungsmodell zurückgegriffen, das unter bestimmten Voraussetzungen (ideale Dichtheit des Gebäudes, ein Fenster geöffnet) für spezifische Randbedingungen (Temperaturen innen und außen, Winddruck, Fensterprofil, -größe, -öffnungswinkel) die Bestimmung des Luftaustauschs für jede Stunde des Jahres ermöglicht. Die Herleitung und Validierung des Modells ist in [LUM 2003] ausführlich beschrieben.

Eingangsdaten für dieses Modell waren in den Projekten [LUM 2003], [Reiß 1994], [Reiß 1997] und [Kluttig] gemessenen Zeitprofile für die Fensteröffnung (Bild 14) sowie Ansätze für typische Fensterprofile und Fenstergrößen. Das Modell liefert als Ergebnisse zusätzliche Wärmeverluste

infolge der Öffnung eines Modellfensters. Diese wurden unter Verwendung zugehöriger Gradtagszahlen in einen zugehörigen Luftvolumenstrom umgerechnet (Tab. 7). Der Luftvolumenstrom für einen Quadratmeter gekipptes Fenster $\dot{v}_{LF,offen}$ nach Gl. (7) bewegt sich je nach Ausbildung des Fensterfalzes und des Jahresverlaufs der Fensteröffnung in einem Bereich zwischen ca. 40 m³/h und 80 m³/h.

Unter Ansatz der typischerweise zur Lüftung verwendeten Fensterfläche („Lüftungsfenster“) von 0,07 bis 0,1 m² pro m² Wohnfläche lassen sich die Tab. 7 dargestellten Luftwechsel ermitteln. Aufgetragen über der Fensteröffnungszeit ergibt sich eine relativ breite Streuung (Bild 15).

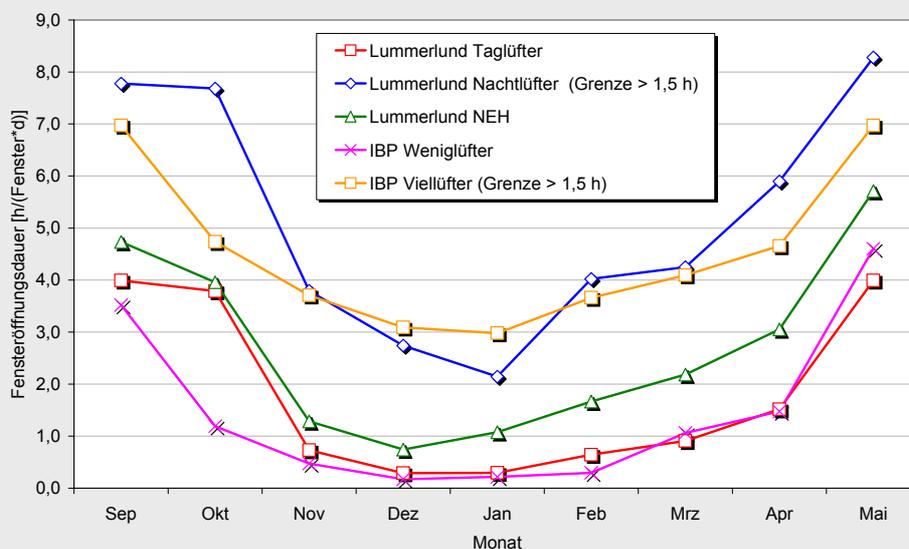
Gleichung (7) für den Fensterluftwechsel n_F kann jetzt also durch folgende typische Werte spezifiziert werden (vgl. Steigung der Trendlinie in Bild 15):

$$n_F = \frac{1}{24} \frac{\text{d}}{\text{h}} \frac{\dot{v}_{LF,offen} z_{LF} a_F}{h_R} t_{LF} \approx 0,1 \frac{\text{d}}{\text{h}^2} t_{LF} \quad [1/\text{h}] \quad (25)$$

mit:

$\dot{v}_{LF,offen}$	Luftvolumenstrom pro m ² geöffnetes „Lüftungsfenster“ typischer Wert = 60 m ³ /(m ² h)	[m ³ /(m ² h)]
z_{LF}	Anteil der „Lüftungsfenster“ an der gesamten Fensterfläche typischer Wert = 50%	[-]
a_F	Fensterfläche pro m ² Wohnfläche typischer Wert = 0,19 m ² /m ²	[m ² /m ²]
h_R	lichte Raumhöhe; Standardwert = 2,5 m	[m]
t_F	mittlere tägliche Öffnungsdauer je Lüftungsfenster in der Heizperiode	[h/d]

Bild 14: Monatsgänge der angesetzten Fensteröffnungszeiten (Messwerte)



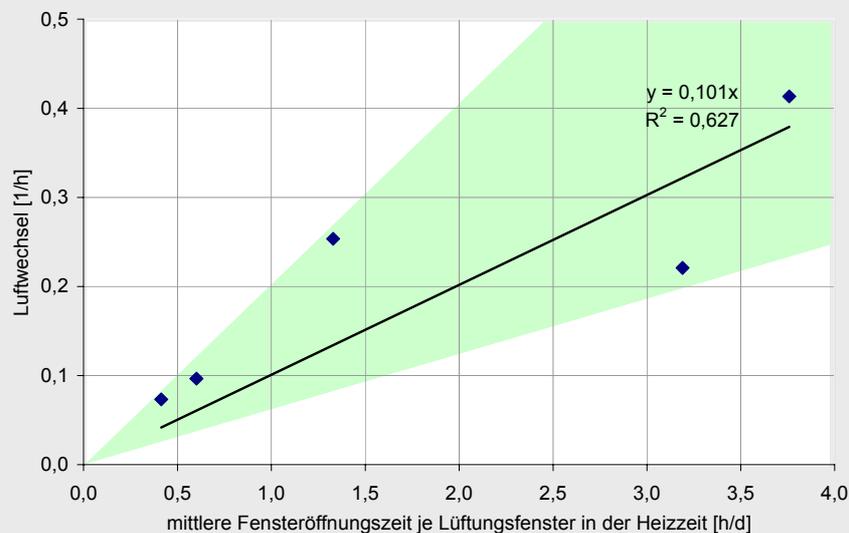
Tab. 7: Zusammenhang zwischen Fensteröffnung und mittlerem Luftwechsel
Ergebnisse dynam. Simulation (TRJ Frankfurt/M. / Beschreibung des Modells in [LUM 2003])

Variante			LUM-Tag	LUM-Nacht	LUM-NEH	IBP-wenig	IBP-viel	
Simulation Modellfenster	Mittelwert Sep-Mai	h/d	1,80	5,18	2,71	1,44	4,54	
	tägliche Fensteröffnungszeit pro Modellfenster	Mittelwert Okt-Mrz	h/d	1,11	4,10	1,82	0,57	3,71
		Mittelwert Nov-Feb	h/d	0,49	3,17	1,19	0,29	3,36
		verbrauchsgewichtet	h/d	0,41	3,19	1,33	0,60	3,76
	Heizgrenztemperatur	[°C]	10	10	10	15	15	
	Gradtagszahlfaktor	[kKh/a]	79,5	79,5	79,5	92,1	92,1	
	Größe Modellfenster (Bruttofläche/Rohbaumaß)	[m²]	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	
	Reduktionsfaktor Fensterfalz		0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	
	zusätzlicher Lüftungswärmeverlust an Heiztagen	[kWh/a]	93,3	383,6	322,9	145,3	621,3	
	mittlerer Luftstrom pro Modellfenster	[m³/h]	3,5	14,2	11,9	4,6	19,9	
	mittlerer Luftstrom pro m² "Lüftungsfenster"	[m³/(m²h)]	1,80	7,39	6,22	2,42	10,33	
mittlerer Luftstrom pro m² geöffnetes "Lüftungsfenster"	[m³/(m²h)]	39	43	82	40	55		
Übertragung auf Messprojekte	Anzahl "Lüftungsfenster"		7	7	7			
	mittlere Größe "Lüftungsfenster"	[m²]	1,5	1,1	1,5			
	Wohnfläche pro Wohnung	[m²]	103	103	103			
	zu öffnende Fensterfläche pro m² Wohnfläche	[m²/m²]	0,10	0,07	0,10	0,10	0,10	
	Luftstrom pro m² Wohnfläche	[m³/(m²h)]	0,18	0,55	0,63	0,24	1,03	
	Luftvolumen pro m² Wohnfläche	[m³/m²]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	
	Luftwechsel	[1/h]	0,07	0,22	0,25	0,10	0,41	
zusätzlicher Lüftungswärmeverlust an Heiztagen pro m² Wohnfläche	[kWh/(m²a)]	5,0	14,9	17,1	7,6	32,3		

Erläuterungen:

"Lüftungsfenster" = typisches offenbares Fenster pro Raum bzw. Bereich

Bild 15: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungszeit und Luftwechsel in der Heizzeit



3.2.8 Art der Lüftung, Gebäudedichtheit und Fensteröffnungsdauer

Neben den Gewohnheiten der Bewohner ist auch die Gebäudedichtheit ein weiterer bestimmender Faktor für die Fensteröffnungsdauer.

Bild 16 zeigt den Zusammenhang zwischen Gebäudedichtheit und Fensteröffnungsdauer für verschiedene Arten der Lüftung. Es zeigt sich bei den Fensterlüftern ein deutlicher Abfall der Fensteröffnungsdauer mit steigendem n_{50} -Wert – also mit größerer Gebäudedichtheit. Bei undichten Gebäuden muss somit kaum noch über die Fenster gelüftet werden, da der für die Bewohner erforderliche Luftaustausch bereits über die Fugen stattfindet. Bei den Gebäuden mit Abluftanlagen steigt die Fensteröffnungsdauer mit zunehmender Undichtigkeit der Gebäudes an, wobei die einzelnen Punkte stark streuen. Anders verhalten sich die Bewohner der Wohneinheiten mit mechanischer Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Hier ist nur noch ein leichtes Absinken der Fensteröffnungszeiten mit steigendem n_{50} -Wert zu erkennen. Die Werte streuen hier jedoch stark und das Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsgeraden ist gering.

Die Ergebnisse sind für Wohneinheiten mit Fensterlüftung und Wärmerückgewinnung plausibel, bei Abluftanlagen sollte jedoch ein Grundluftwechsel wie bei den Anlagen mit Wärmerückgewinnung vorhanden sein, so dass möglicherweise nicht von einer ordnungsgemäßen Funktion der Abluftanlagen ausgegangen werden kann (wie auch bei einer Reihe von Lüftungsanlage in Nordrhein-Westfalen festgestellt wurde [NRW 2000]).

Bild 16: Zusammenhang zwischen Art der Lüftung (Fenster, Abluft, LA mit WRG), Gebäudedichtheit und gemessener Fensteröffnung
(jeweils Mittelwert eines Gebäudetyps mit gleiche Wohnfläche)

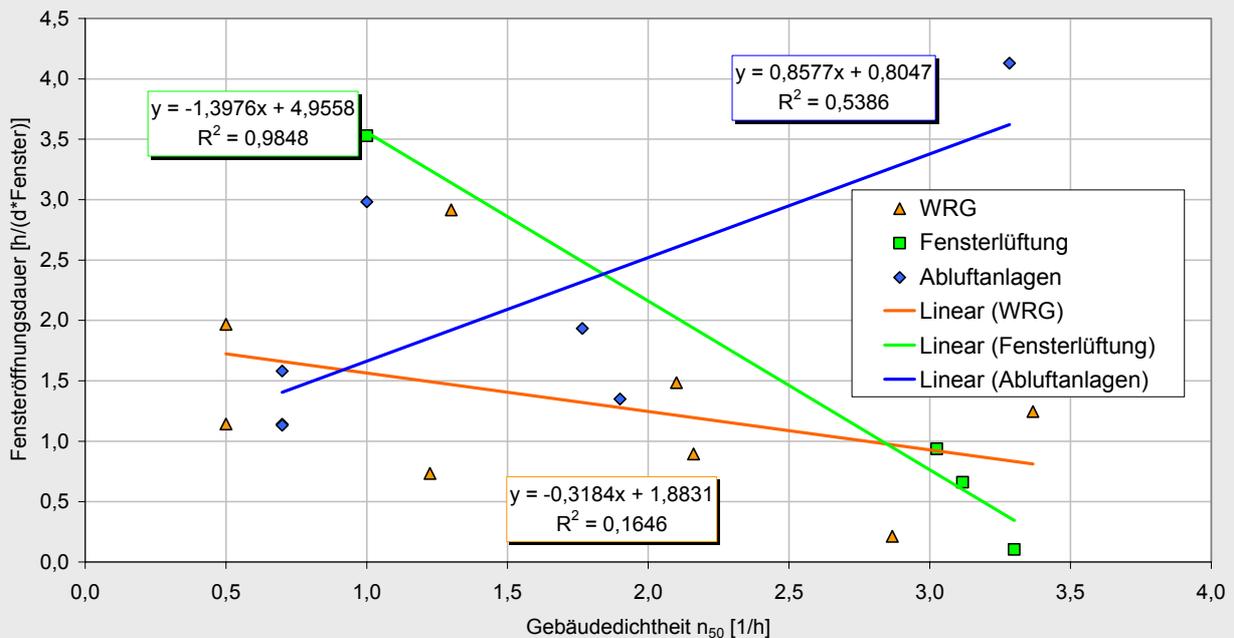


Bild 17: Abgeschätzter Gesamtluftwechsel über Fensterlüftung und Gebäudedichtheit (n_F+n_x) in Abhängigkeit der von der Gebäudedichtheit (n_x)

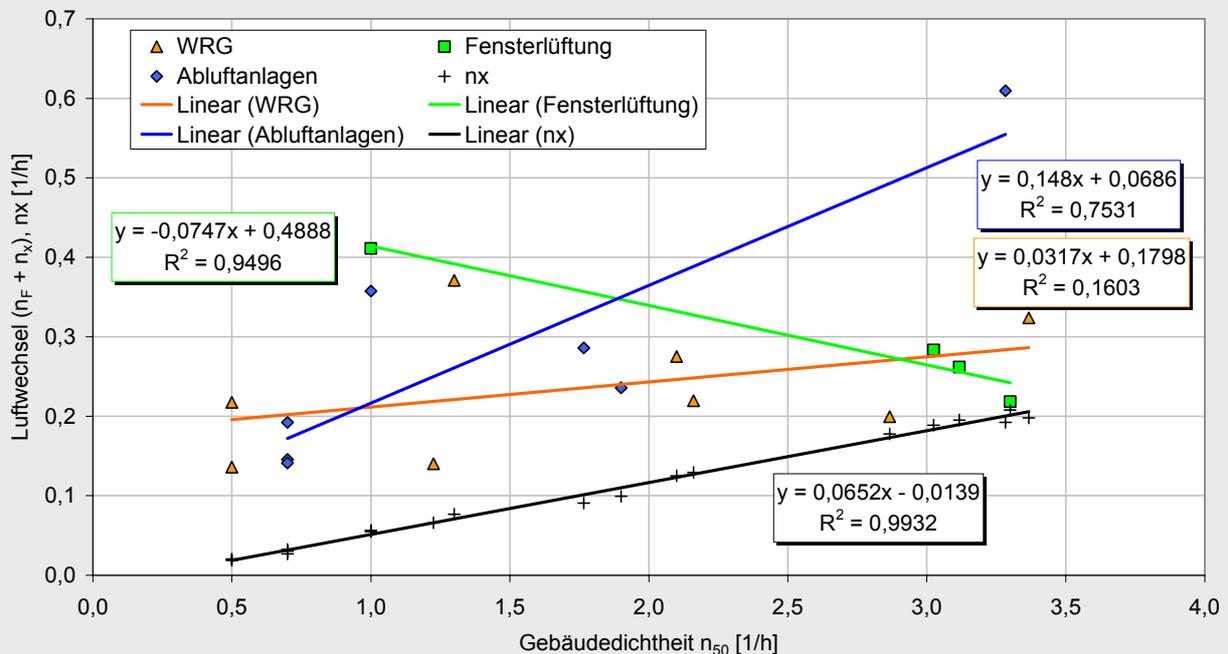


Bild 17 stellt den Fensterluftwechsel zusammen mit dem nach EN 832 bestimmten Luftwechsel durch Gebäudeundichtigkeiten dar. Die Ausgleichsgeraden verläuft in Bild 17 für die Fensterlüftung deutlich flacher, bei den Wohneinheiten mit Wärmerückgewinnung ist bei einem sehr geringen Bestimmtheitsmaß ein leichter Anstieg des Zusatzluftwechsels mit steigender Gebäudeundichtigkeit festzustellen. Wohneinheiten mit Abluftanlagen weisen auch in dieser Darstellung einen Anstieg des Luftwechsels mit der Gebäudedichtheit auf.

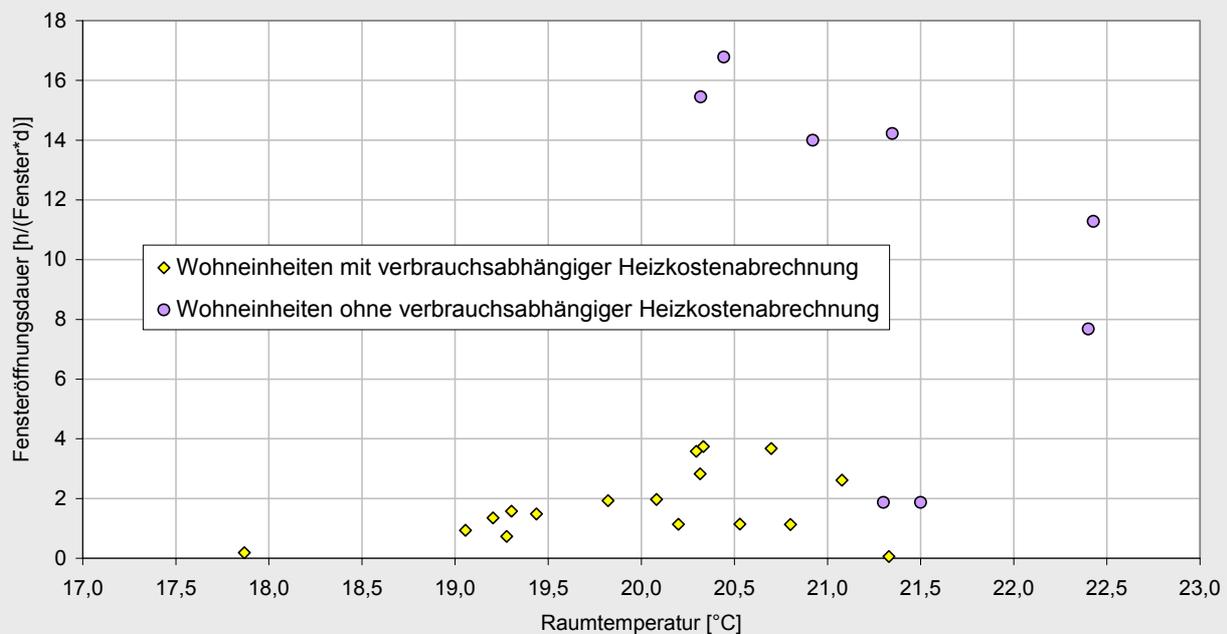
Zusammenfassend kann für Wohneinheiten mit Fensterlüftung ein deutlicher Einfluss der Gebäudedichtheit festgestellt werden. Wohneinheiten mit Wärmerückgewinnung zeigen kaum einen Zusammenhang zwischen Dichtheit und Fensterlüftung. Für Projekte mit Abluftanlagen muss ein ähnlicher Einfluss wie bei Anlagen mit Wärmerückgewinnung unterstellt werden, der abweichende Verlauf in Bild 16 bis Bild 17 ist hauptsächlich auf ein Projekt (6 Wohneinheiten) mit möglicherweise nicht richtig funktionierenden Abluftanlagen zurückzuführen.

3.2.9 Raumtemperatur und Fensteröffnungsdauer mit und ohne verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung

Die vorliegenden Daten aus Projekten ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung lassen keine allgemeingültigen Aussagen zum Verhalten dieser Bewohner zu. Dennoch ist in

Bild 18 zu erkennen, dass bei den Wohneinheiten ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung die Fensteröffnungszeiten deutlich höher liegen und auch die Raumtemperaturen sich im oberen Bereich ansiedeln. Dies liefert somit Indizien, dass die beiden Größen Raumtemperatur und Fensteröffnungsdauer tatsächlich durch den Nutzer bei fehlender verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung anders beeinflusst werden, als bei einer verursachergerechten Verteilung.

Bild 18: Raumtemperatur und Fensteröffnung mit und ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung



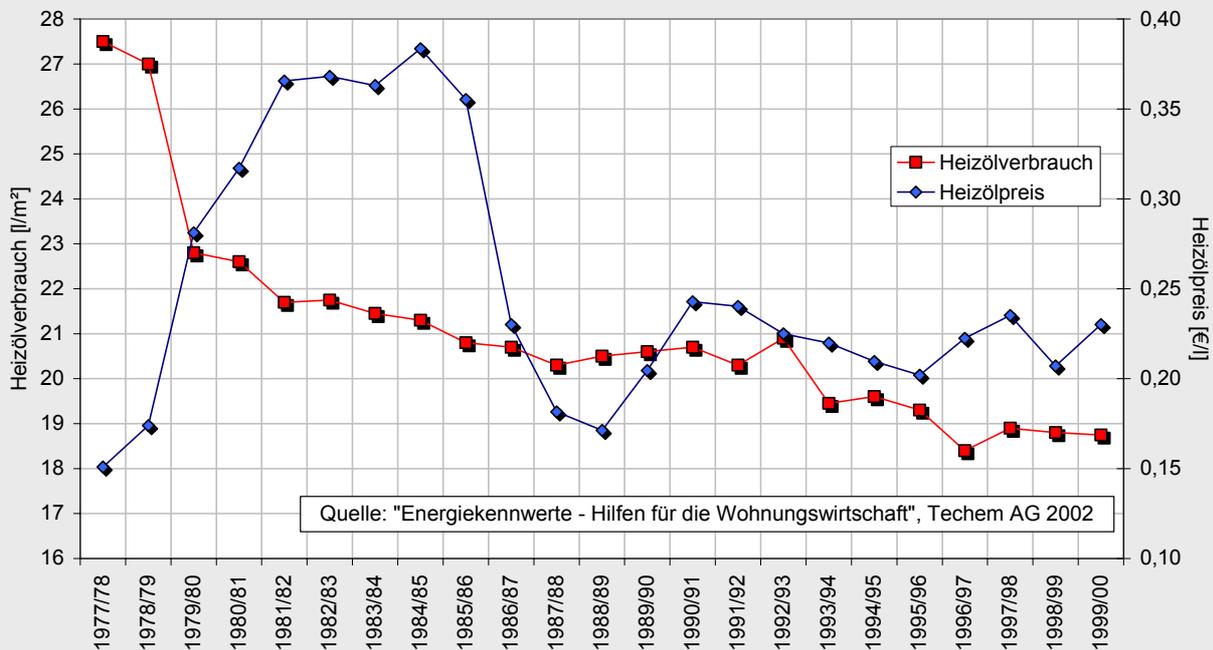
3.3 Energiekosten und Verbrauchskennwert

Die Energiepreise wirken sich über den Endenergieverbrauch direkt auf die Energiekosten für die Bewohner aus. Aus diesem Grund sollte erwartet werden, dass auch ein funktionaler Zusammenhang zwischen Heizwärmeverbrauch und Energiepreis zu finden ist. In [Techem] sind die Entwicklung des Heizölpreises und die Heizölverbräuche von abgerechneten Wohneinheiten einander gegenüber gestellt.

Bild 19 zeigt exemplarisch die auf Euro umgerechneten Heizölpreise zusammen mit der Entwicklung der Heizwärmeverbräuche.

Anfang der 80er-Jahre steigt durch die zweite Ölkrise der Heizölpreis um über 100 % an. Gleichzeitig fällt der Heizölverbrauch um 25 %. In den folgenden Jahren sinkt der Heizölverbrauch fast kontinuierlich weiter, wohl der Heizölpreis erst stark abfällt und anschließend Schwankungen nach oben und unten unterworfen ist. Somit ist ab Mitte der 80er-Jahre kein direkter Einfluss von Energiepreis und Heizölverbrauch mehr feststellbar.

Bild 19: Energiekosten und Verbrauchskennwerten aus abgerechneten Wohneinheiten
(Quelle: [Techem])



Erklärt werden kann dieser scheinbar fehlende Zusammenhang mit einer Reihe von Faktoren:

- **Energetische Modernisierungen:** Durch groß angelegte Öffentlichkeitsarbeit wurde Ende der 70er-Jahre die Bevölkerung für das Thema Energiesparen sensibilisiert. 1978 trat die Heizungsanlagenverordnung in Kraft, in der Heizungsmodernisierungen und der Einbau von Thermostatventilen vorgeschrieben wurden. Dadurch konnte der Endenergiebedarf reduziert werden.
- **Veränderungen im ausgewerteten Bestand des Auswertungsunternehmens durch Heizkostenverordnung:** Durch das Inkrafttreten der Heizkostenverordnung im März 1981 hat sich der Bestand an auswertbaren Wohneinheiten bei Techem sicherlich vergrößert, so dass nicht auszuschließen ist, dass dadurch auch andere Gebäudetypen in die Auswertung von Bild 19 eingeflossen sind und so zu einer 'scheinbaren' Verbrauchsreduktion geführt haben.
- **Nachhaltige Änderung von Gewohnheiten der Bewohner:** Die durch den deutlichen Preisanstieg begünstigte Verhaltensänderung (z. B. Nutzung der Thermostatventile oder der Nachtabsenkung und bewusstere Fensterlüftung) war nach Senkung der Energiepreise nach 6 Hochpreisjahren eingeübt und wurde nicht wieder aufgegeben. Dadurch ergaben sich keine Verbrauchsanstiege bei niedrigen Energiepreisen.
- **Zeitverzögerung:** Die Energiekosten steigen bei den Bewohnern nicht zeitnah mit dem Verbrauch, sondern erst mit einigen Monaten Verzögerung, so dass bei einer deutlichen Heizkostennachzahlung nicht direkt durch ein veränderte Verhalten gegengesteuert werden kann. Erst nach ein bis zwei Jahren haben die Bewohner neue Energiespartechniken eingeübt, so dass der in Bild 19 direkte erkennbare Zusammenhang zwischen starker Preissteigerung und Verbrauchsreduktion nicht zwingend ausschließlich auf eine Verhaltensänderung zurückzuführen ist.

Die aufgeführten Faktoren verhindern eine konkrete Aussage über den Zusammenhang von Energiepreis und Heizwärmeverbrauch – auch wenn dieser zweifelsohne besteht – so dass im Nutzermodell in dieser Studie der Energiepreis nicht als Einflussgröße berücksichtigt wird.

4 Nutzermodell: Typische Werte für Durchschnitt und Streuung

Als Zusammenfassung der Abschnitte 2 und 3 soll nun ein Nutzermodell erstellt werden. Dieses liefert für die wesentlichen Nutzungsparameter typische Werte für sparsames, durchschnittliches und verschwenderisches Verhalten sowie Werte für das Verhalten mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung.

4.1 „Durchschnittlicher Nutzer“

Die Definition des „durchschnittlichen Nutzer“ entspricht der aus Abschnitt 2.5. Es wird angenommen, dass er die Raumsolltemperatur für den direkt beheizten Bereich tagsüber auf einen Wert von 21°C einstellt. Es findet eine Nachtabsenkung statt („zeitlich eingeschränkte Beheizung“). Außerdem wird der in Abschnitt 2.5.2 festgelegte von der Wohnungsgröße abhängige Anteil nicht direkt beheizt („räumlich eingeschränkte Beheizung“).

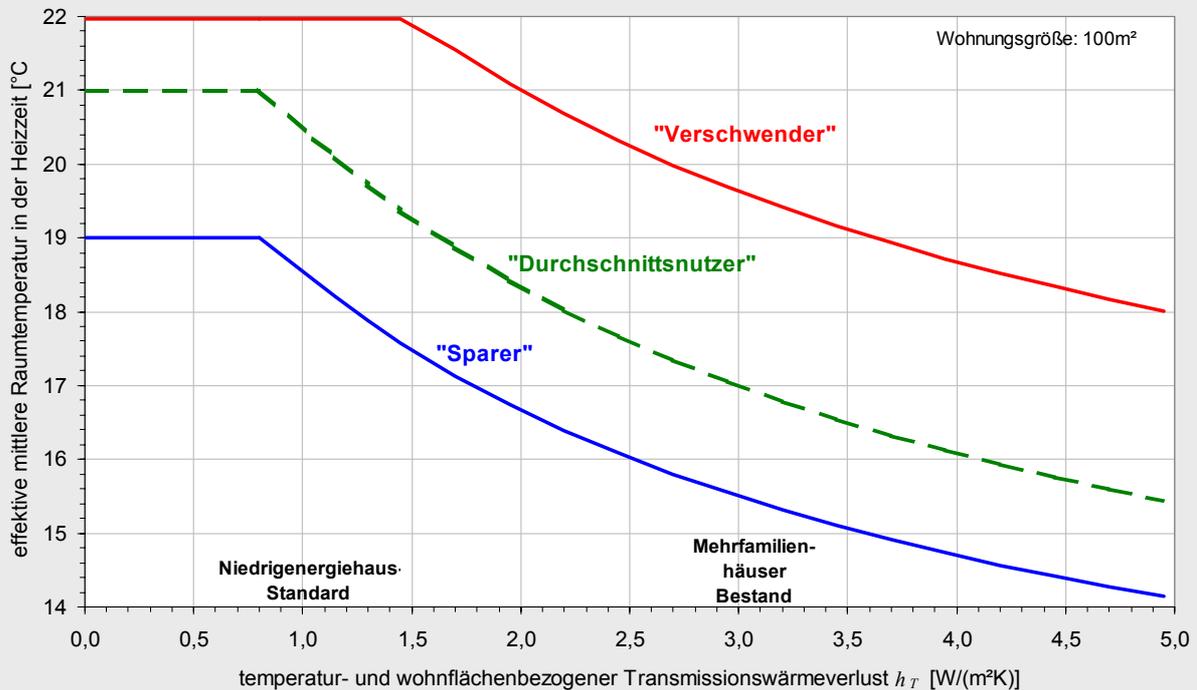
Der Luftwechsel durch Fensteröffnung und Fugen beträgt bei Gebäuden ohne Lüftungsanlage 0,6 1/h, mit Lüftungsanlage 0,2 1/h. Hinzu kommt in diesem Fall ein Anlagenluftwechsel von 0,4 1/h.

4.2 Die Streuung: „Sparer“ und „Verschwender“

Tab. 8 zeigt die aus den Messprojekten hergeleitete Definition eines „Sparers“ und eines „Verschwenders“ im Vergleich zum „durchschnittlichen Nutzer“. Die sich aus den Ansätzen für die Raumtemperatur und Reduktionsfaktoren effektiv ergebende mittlere Raumtemperatur zeigt Bild 20. Die Übereinstimmung mit den für Niedrigenergiehäuser messtechnisch ermittelten Werten für die mittlere Raumtemperatur in der Heizzeit und deren Streuung (Tab. 6) ist recht gut.

Tab. 8: Definition von „Sparern“ und „Verschwendern“ im Vergleich zum „durchschnittlichen Nutzer“

Nutzung	"Sparer"	"durchschnittlicher Nutzer"	"Verschwender"
Raumsolltemperatur	19°C	21°C	22°C
Reduktionsfaktoren			
Nachtabsenkung	ja	ja	nein
räumliche Teilbeheizung	ja	ja	nein
Nutzungsfaktor	ja	ja	ja
Luftwechsel Fenster und Fugen			
ohne Lüftungsanlage	0,3 1/h	0,6 1/h	1,0 1/h
mit Lüftungsanlage	0,1 1/h	0,2 1/h	0,5 1/h

Bild 20: Effektive mittlere Raumtemperatur in der Heizzeit für die drei Nutzergruppen

4.3 Veränderung der Nutzungsbedingungen bei Verzicht auf verbrauchsabhängige Abrechnung

Aus der in Abschnitt 3.1 bestimmten Energieeinsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung kann man Rückschlüsse auf die Änderung des durchschnittlichen Nutzerverhaltens ziehen. Zu diesem Zweck wurden Energiebilanzberechnung für ein typisches Mehrfamilienhaus im Bestand mit $h_t = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ durchgeführt.

Das Nutzerverhalten wird gemäß Abschnitt 2.5 durch die mittlere Raumtemperatur und den Luftwechsel parametrisiert. Da nicht klar ist, welche Aufteilung auf diese beiden Größen tatsächlich vorliegt, werden Rückschlüsse auf das Nutzerverhalten für drei Annahmen gezogen:

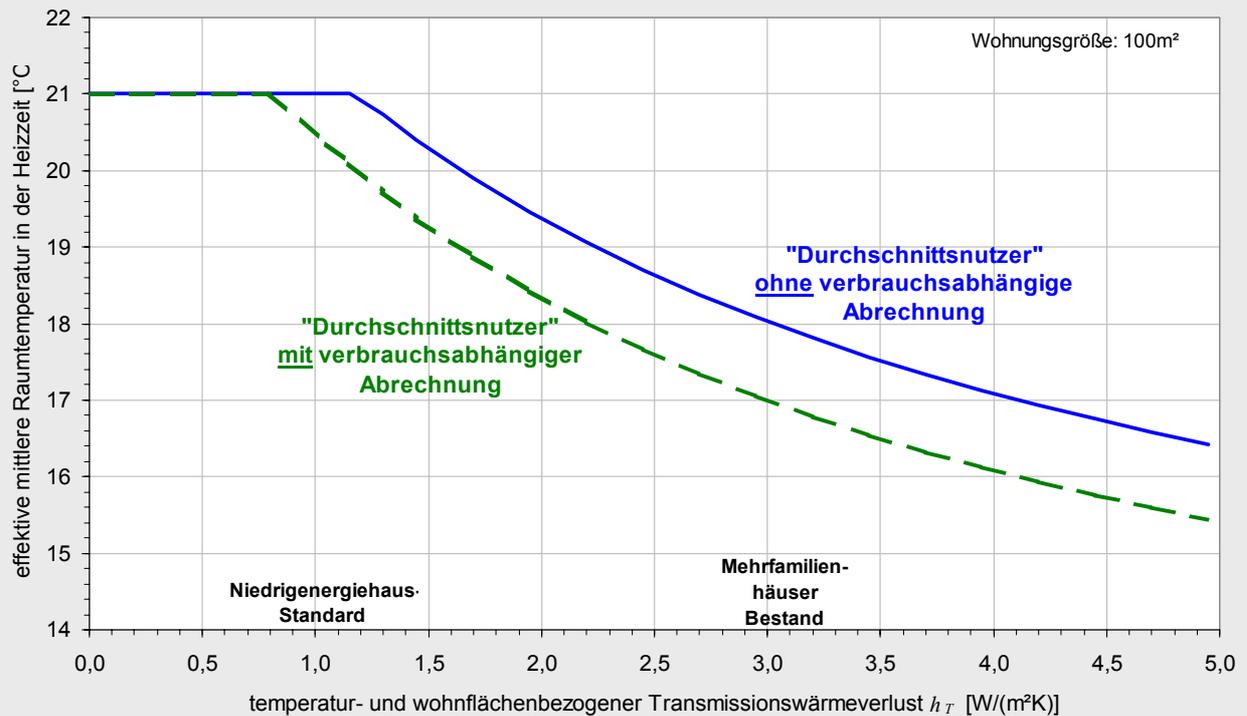
- Grenzfall 1: Die Einsparung erfolgt allein durch Minderung der Raumtemperatur;
- Grenzfall 2: Die Einsparung erfolgt allein durch weniger Fensterlüftung;
- „50/50-Mix“: Die Einsparung erfolgt zu gleichen Teilen durch Minderung der Raumtemperatur und weniger Fensterlüftung;

In Tab. 9 sind die Ansätze für die Nutzungsbedingungen dargestellt, unter denen sich jeweils eine 20%-ige Reduktion des Heizwärmebedarfs ergibt. Dabei werden in allen Fällen die gleichen Nutzungsbedingungen („durchschnittliche Nutzer“) für die Berechnung mit verbrauchsabhängiger Heizkostenabrechnung zu Grunde gelegt. Die sich für den 50/50-Mix effektiv einstellende mittlere Raumtemperatur zeigt Bild 21: Für fast den gesamten Parameterbereich ergibt sich eine Temperaturdifferenz von ca. 1K.

Tab. 9: Nutzungsbedingungen bei Verzicht auf verbrauchsabhängige Abrechnung im Vergleich zum „durchschnittlichen Nutzer“

Nutzung	"durchschnittlicher Nutzer" (mit VHA)	ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung (VHA)		
		Auswirkung nur auf: Raumtemperatur	Fensteröffnen	50/50-Mix
Raumsolltemperatur	21°C	22,3°C	21°C	21°C
Reduktionsfaktoren				
Nachtsabsenkung	ja	nein	ja	nein
räumliche Teilbeheizung	ja	ja	ja	ja
Nutzungsfaktor	ja	ja	ja	ja
Luftwechsel Fenster und Fugen				
ohne Lüftungsanlage	0,6 1/h	0,6 1/h	1,88 1/h	1,26 1/h
mit Lüftungsanlage	0,2 1/h	0,2 1/h	1,48 1/h	0,86 1/h

Bild 21: Ansatz für die effektive mittlere Raumtemperatur in der Heizzeit mit und ohne verbrauchsabhängige Abrechnung



5 Vergleichskosten: Abhängigkeit vom energetischen Standard

Mit dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Nutzermodell ist es nun möglich, die in der Einführung (Abschnitt 1.3) genannten drei Arten von Vergleichskosten als Funktion des Gebäudestandards zu ermitteln:

- Durchschnittliche Verbrauchskosten (Vergleichskosten-Typ „D“)
- Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung (Vergleichskosten-Typ „E“)
- Einfluss des Nutzers auf seinen individuellen Verbrauch (Vergleichskosten-Typ „N“)

Diese liefern einen Rahmen, in dem sich die Kosten der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung nach Möglichkeit bewegen sollte.

Tab. 10 gibt eine Übersicht über die Ansätze der Berechnungen. Die Betrachtung erfolgt auf der Ebene „Nutzenergie“. Entsprechend wird mit einem Wärmepreis gerechnet, in dem auch die Verluste der Heizungsanlage pauschal enthalten sind. Der Wärmepreis wird auf ein heute typisches Niveau von 4 Ct pro kWh festgelegt. In Zukunft evtl. anstehende reale Energiepreissteigerungen sind also hier nicht berücksichtigt.

Tab. 10: Ansätze für die Berechnungen

Wärmepreis	0,04 €/kWh
Bilanzierungsverfahren	Heizperiodenbilanzverfahren gemäß [EN 832] mit variabler Heizgrenze gemäß Abschnitt 2.3
Klimadaten	Standardklima Deutschland gemäß DIN V 4108-6, siehe Abschnitt 2.3
Standardnutzung	gemäß [LEG], [EPHW 1997] [Toolbox 2001], siehe Abschnitt 2.5.1
Nutzermodell	gemäß Abschnitt 4

Zur Identifikation der Randbedingungen für die Bilanzierung werden in den Legenden der folgenden Diagramme Kürzel verwendet (z.B. t₂₁-r_{zn}-L_{0,6}-i_{3,2}-s_{4%}). Diese stehen für folgende Ansätze:

t... → Raumsolltemperatur in °C

r_{zn} → räumlich und zeitlich eingeschränkte Beheizung, Nutzungsfaktor (siehe Abschnitt 2.5.1)

L... → energetisch wirksamer Luftwechsel in 1/h

i... → flächenbezogene Leistung der inneren Wärmequellen in W/m²

s... → relative Solarapertur (siehe Abschnitt 2.3)

5.1 Durchschnittliche Verbrauchskosten – Vergleichskosten-Typ „D“

Zunächst werden die jährlichen Verbrauchskosten in Abhängigkeit vom Wärmeschutzstandard für einen durchschnittlichen Nutzer bestimmt. Bild 22 zeigt den bei Reduktion des Wärmeschutzstandards erreichten Heizwärmebedarf, Bild 23 die zugehörigen Heizkosten. Für Mehrfamilienhäuser im Bestand liegen die monatlichen Heizkosten bei etwa 70 Ct pro m², bei Wärmeschutz nach EnEV-Neubau-Grenzwert ($h_T = \text{ca. } 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ca. 40 Ct pro m². Für einen Wärmeschutz nach Niedrigenergiehaus-Standard ($h_T = 0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) werden ohne Wärmerückgewinnung 29 Ct, mit Wärmerückgewinnung 17 Ct pro m² erreicht. Für Passivhäuser mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a) liegen die monatlichen Heizkosten nur noch bei 5 Ct/m².

5.2 Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung – Vergleichskosten-Typ „E“

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung sind die in Abschnitt 3.1 dargestellten empirischen Untersuchungen. Hier wurde für Gebäude des Bestands eine Heizenergieeinsparung von ca. 20% nachgewiesen.

Für Gebäude mit Niedrigenergiehaus-Standard liegen keine entsprechenden Ergebnisse vor. Daher müssen die bei Bestandsgebäuden erzielten Ergebnisse auf Gebäude mit verbessertem energetischen Standard übertragen werden. Hierfür werden folgende Annahmen getroffen:

- Für ein typisches Mehrfamilienhaus im Bestand mit $h_i = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ beträgt die Einsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung 20%.
- Das Verhalten der Bewohner entspricht bei verbrauchsabhängiger Abrechnung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen „durchschnittlichen Nutzung“.
- Das Verhalten der Bewohner ist unabhängig vom energetischen Standard des Gebäudes. Damit sind die in Abschnitt 4.3 für Bestandsgebäude ermittelten Ansätze für Nutzungsbedingungen ohne verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung auch auf verbesserte Gebäudestandards übertragbar.

Bild 24 zeigt den wohnflächenbezogenen Heizwärmebedarf für die drei in Abschnitt 4.3 definierten Fälle von Nutzungsbedingungen. Für $h_i = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Mehrfamilienhäuser Bestand) ergibt sich gemäß Ansatz in allen drei Fällen eine 20%-ige Energieeinsparung durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung.

Bild 22: Wohnflächenbezogener Heizwärmebedarf als Funktion des Wärmeschutzstandards

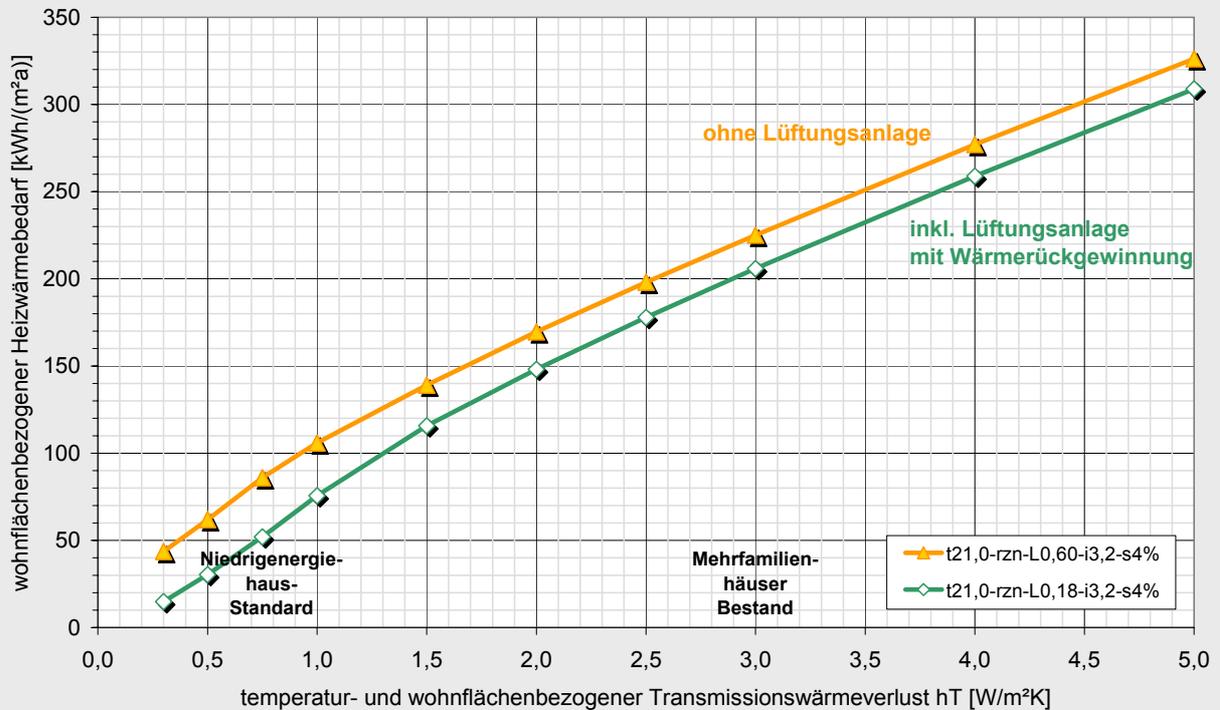


Bild 23: Heizkosten pro m² Wohnfläche als Funktion des Wärmeschutzstandards (Vergleichskosten-Typ „D“)

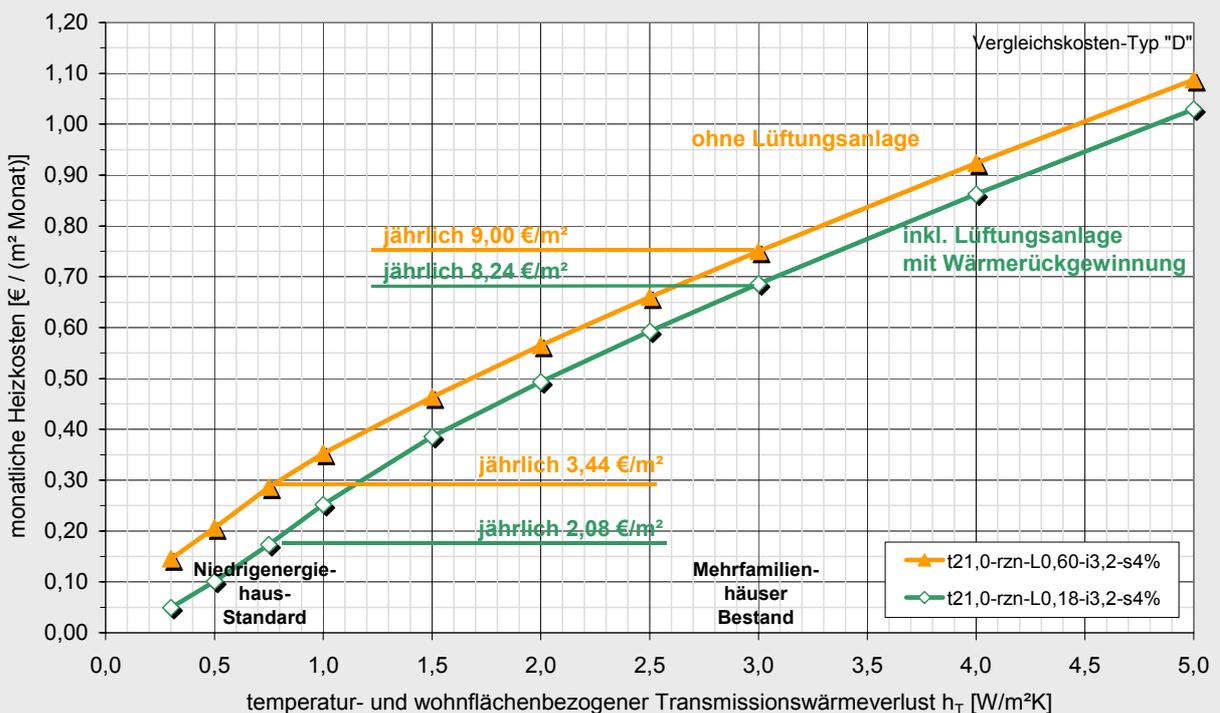


Bild 24: Reduktion des Heizwärmebedarfs durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung

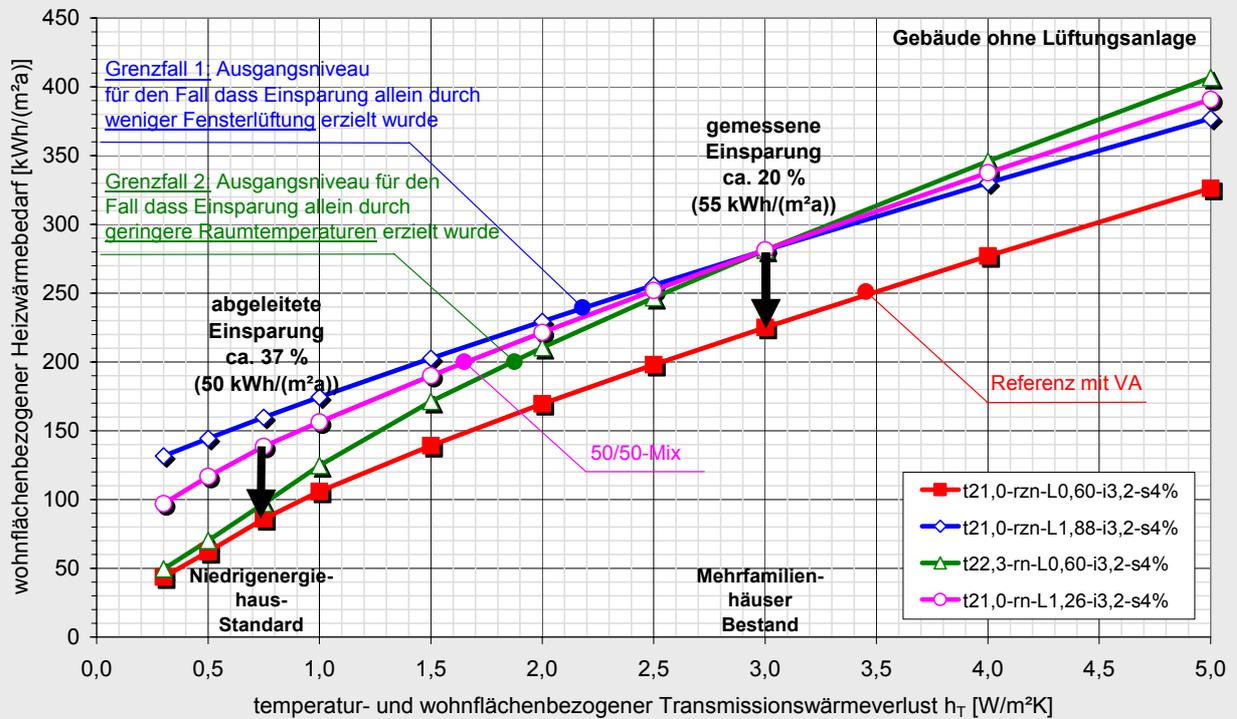
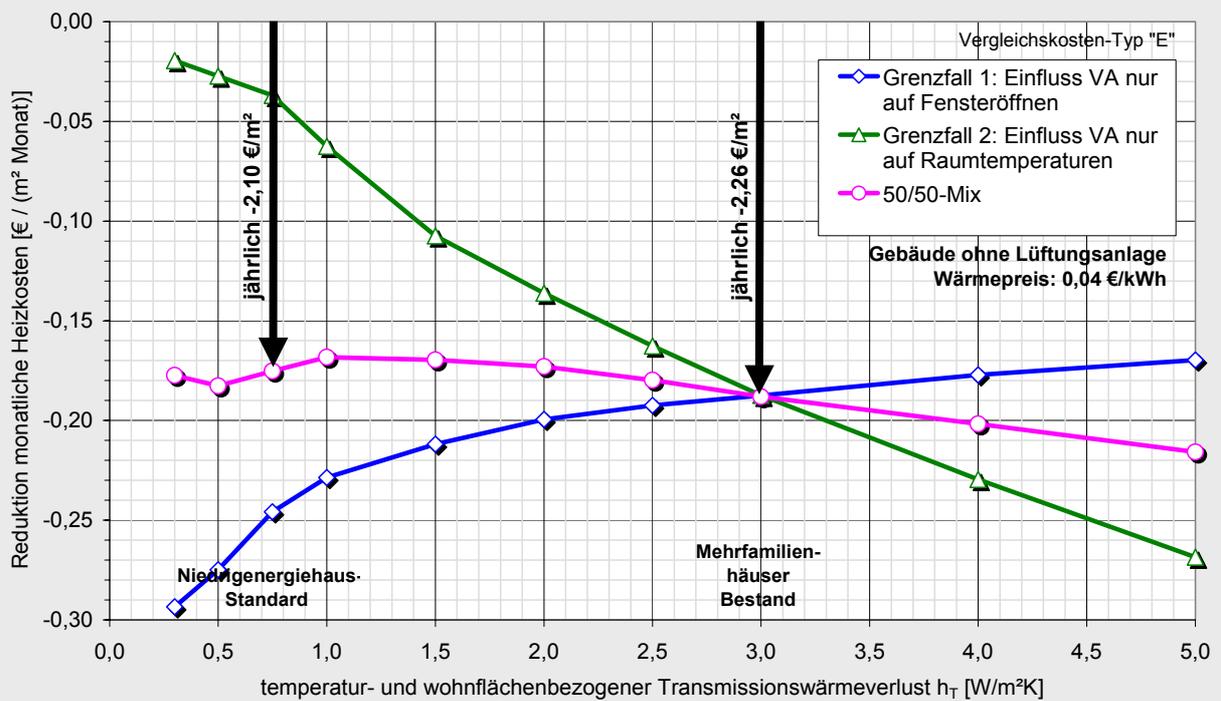


Bild 25: Reduktion der Heizkosten durch verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung (Vergleichskosten-Typ „E“)



Unter der Annahme, dass diese Einsparung allein durch längeres Geschlossenhalten von Fenstern erreicht worden ist, ergibt sich eine Übertragung auf andere Gebäudestandards gemäß der Kurve „Grenzfall 1“: Da die Lüftungswärmeverluste in erster Näherung nicht vom Gebäudestandard abhängen bleibt die durch verbrauchsabhängige Abrechnung erzielte absolute Einsparung etwa konstant. Die bei sehr hohen Wärmeschutzstandards festzustellende geringfügige Zunahme ist eine Folge des höheren mittleren Temperaturniveaus bei diesen Häusern.

Ganz anders sieht es aus für den „Grenzfall 2“: Hier wird angenommen, dass die Einsparung bei Bestandsgebäuden allein durch Absenkung der mittleren Raumtemperatur erzielt worden ist. Ausgangspunkt hierfür ist eine Raumsolltemperatur von 22,3°C und der Verzicht auf eine Nachtabsenkung. Bei Verbesserung des Wärmeschutzes sinkt hier der absolute Wert der Einsparung erwartungsgemäß deutlich ab. Aber auch die relative Einsparung sinkt, da die Auswirkung der Nachtabsenkung bei besseren Gebäudestandards geringer ist.

Unter der Annahme, dass die 20%-ige Einsparung durch beide Effekte zu gleichen Anteilen verursacht wird, ergibt sich die Kurve „50/50-Mix“. Die Heizwärmeeinsparung bleibt mit ca. 50 kWh/(m²a) absolut annähernd gleich, die relative Einsparung steigt auf 37%. Die Tatsache, dass der absolute Wert etwa gleich bleibt, ist zunächst erstaunlich. Die Ursache ist jedoch klar: Durch Verbesserung des Wärmeschutzes sinken zwar die Transmissionswärmeverluste, es ergeben sich aber gleichzeitig höhere Werte für die mittleren Raumtemperaturen. Damit steigt der Absolutwert der Lüftungswärmeverluste bei gleichen Fensteröffnungszeiten.

Bild 25 zeigt die resultierende Heizkosteneinsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung für die drei betrachteten Fälle.

Für den Fall „50/50-Mix“ bleibt die jährliche Einsparung auch bei Verbesserung des Wärmeschutzes oberhalb von 2 € pro m² Wohnfläche. Allerdings reagiert das Ergebnis sehr stark auf den Ansatz für die Aufteilung zwischen Temperatur und Lüftung: Die Grenzfälle spannen einen Bereich zwischen jährlich 0,50 und 3,00 € pro m² auf.

Das reale Verhalten wird sich sicherlich auf beide Größen auswirken, so dass der Verlauf des „50/50-Mix“ wahrscheinlich der Realität am nächsten kommt.

Die Betrachtung muss hier auf Gebäude ohne Lüftungsanlage beschränkt bleiben, da es für Gebäude mit Lüftungsanlage keine Hinweise aus Messprojekten gibt, wie sich eine pauschale Umlage der Heizkosten auf das Fensteröffnen auswirkt.

5.3 Einfluss des Nutzers auf seinen individuellen Verbrauch – Vergleichskosten-Typ „N“

Als Maß für die Heizkostengerechtigkeit dient der Vergleichskosten-Typ „N“. Gemäß Abschnitt 1.3.3 wird er definiert als die Differenz der Heizkosten eines typisch sparsamen und eines typisch verschwenderischen Haushalts. Die Ansätze für die entsprechenden Nutzungsbedingungen finden sich in Abschnitt 4.3.

Der für einzelne Wohnungen entstehende Verbrauch an Heizwärme kann in der Praxis noch sehr viel stärker streuen, da in Wohnungen mit hohem Temperaturniveau auch Wärmeströme in die Nachbarwohnungen auftreten. Der Ansatz der HeizkostenV ist, nach Möglichkeit nur die tatsächlich nach außen auftretenden Wärmeverluste abzurechnen – was sich u.a. in der Umlage eines Fixkostenanteils von 30 bis 50% ausdrückt. Entsprechend werden bei den hier durchgeführten Berechnungen nur die tatsächlich wirksamen Verluste der Wohnungen nach außen berücksichtigt. Wärmeströme zwischen Nachbarwohnungen werden nicht bilanziert.

Bild 26 zeigt den Verlauf des Heizwärmebedarfs für den „Sparer“ und den „Verschwender“ im Vergleich zum durchschnittlichen Nutzer. Gegenüber Bestandsgebäuden sinkt die Differenz zwischen den beiden extremen Nutzergruppen von 140 bei Bestandsgebäuden auf 80 kWh/(m²a) bei Niedrigenergiehäusern ab. Die relativen Abweichungen gegenüber dem Durchschnitt liegen für Bestandsgebäude bei +41% („Verschwender“) bzw. –22% („Sparer“), bei Niedrigenergiehäusern steigt die relative Abweichung auf +52% bzw. –41%. Die Verteilung ist relativ symmetrisch.

Bei Gebäuden mit Lüftungsanlagen inkl. Wärmerückgewinnung (Bild 27) liegt der zusätzliche Energiebedarf für die Gruppe der „Verschwender“ ähnlich hoch wie bei Gebäuden ohne Lüftungsanlage. Da für den Durchschnittsnutzer jedoch schon geringe Fensteröffnungszeiten angesetzt sind, liegt der „Sparer“ nur wenig tiefer als der Durchschnitt. Die Verteilung ist stark asymmetrisch.

Die sich damit ergebenden Heizkostendifferenzen zeigt Bild 28 (Vergleichskostentyp „N“). Für Bestandsgebäude liegen die Unterschiede bei mehr als 5 € pro m², für Niedrigenergiehäuser fallen sie auf ca. 3,2 € pro m² für Gebäude ohne Lüftungsanlage und auf ca. 2 € pro m² für Gebäude mit Lüftungsanlage.

Für den „Sparer“ erscheint die verbrauchsabhängige Abrechnung dann als sinnvoll, wenn die Kosten für die Verbrauchsmessung kleiner sind als der Betrag, den er gegenüber einem *durchschnittlichen* Haushalt einspart – für die Niedrigenergiehäuser ohne Lüftungsanlage entspricht dies etwa 50% der hier bestimmten Vergleichskosten (Bild 26). Für diese Gebäude ergibt sich damit unter dem Kriterium der „Heizkostengerechtigkeit“ eine Obergrenze für die Mehrkosten der Verbrauchsabrechnung von ca. 1,6 € pro m² Wohnfläche.

Aufgrund der asymmetrischen Verteilung ergibt sich für Gebäude mit Lüftungsanlage ein anderes Bild (vgl. Bild 27). Da der „Durchschnittsnutzer“ nach den vorliegenden Untersuchungen die Fenster relativ wenig öffnet, kann der „Sparer“ den Heizwärmebedarf nur noch wenig reduzieren. Etwa um den Faktor 5 größer ist dagegen beim „Verschwender“ die Abweichung vom Durchschnitt. Ohne Heizkostenabrechnung müsste sein Mehrverbrauch von allen Bewohnern getragen werden. Für Gebäude mit Lüftungsanlage ist also das Thema Heizkostengerechtigkeit komplexer. Hinzu kommt die Tatsache, dass der Mittelwert des Verbrauchs bei der hier vorliegenden asymmetrischen Verteilung höher ist als der Verbrauch des „Durchschnittsnutzers“ (abgeleitet aus dem Median).

Zur Vereinfachung wird daher vorgeschlagen, auch hier als Kriterium 50% der Vergleichskosten des Typs „N“ zu verwenden – also der Spanne zwischen „Verschwender“ und „Sparer“. Damit ergibt sich für diese Gebäude aus Sicht der „Heizkostengerechtigkeit“ eine Obergrenze für die Mehrkosten der Verbrauchsabrechnung von jährlich ca. 1 € pro m² Wohnfläche. Für energetisch noch einmal verbesserte Passivhäuser sinkt dieser Wert auf ca. 0,7 € pro m² Wohnfläche.

Bild 26: Vergleich von „Sparern“ und „Verschwendern“ (Gebäude ohne Lüftungsanlage)

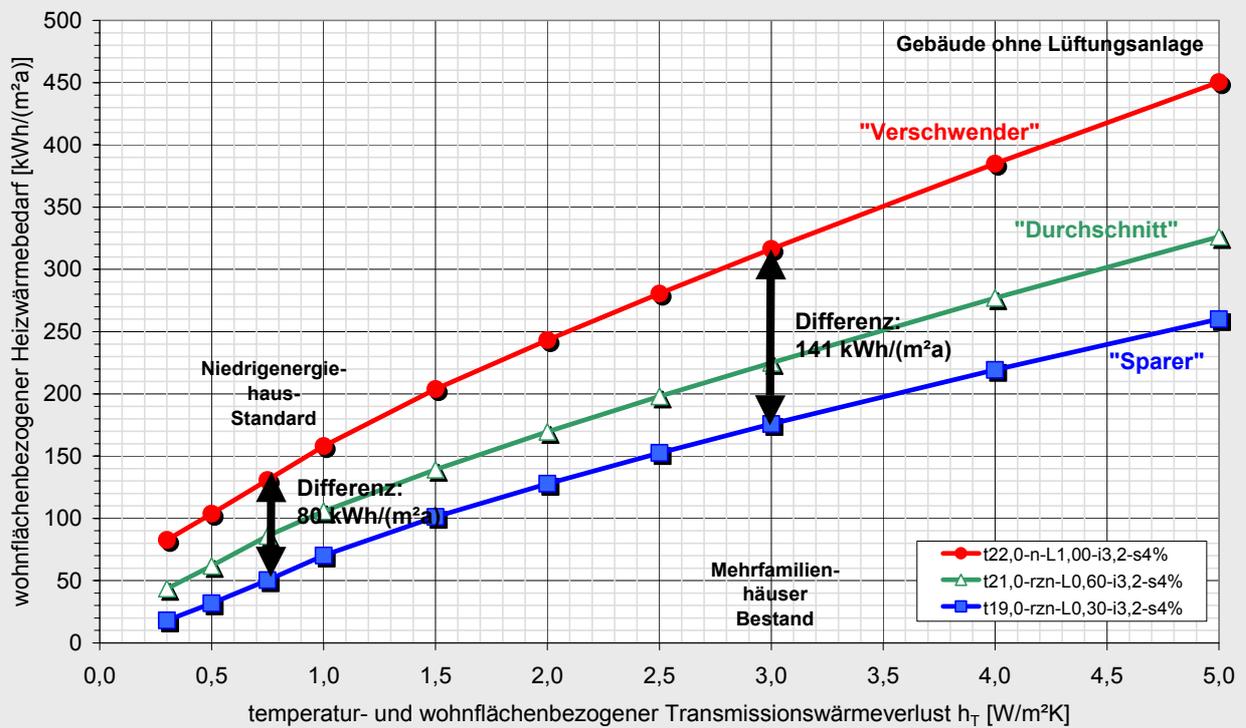


Bild 27: Vergleich von „Sparern“ und „Verschwendern“ (Gebäude mit Lüftungsanlage)

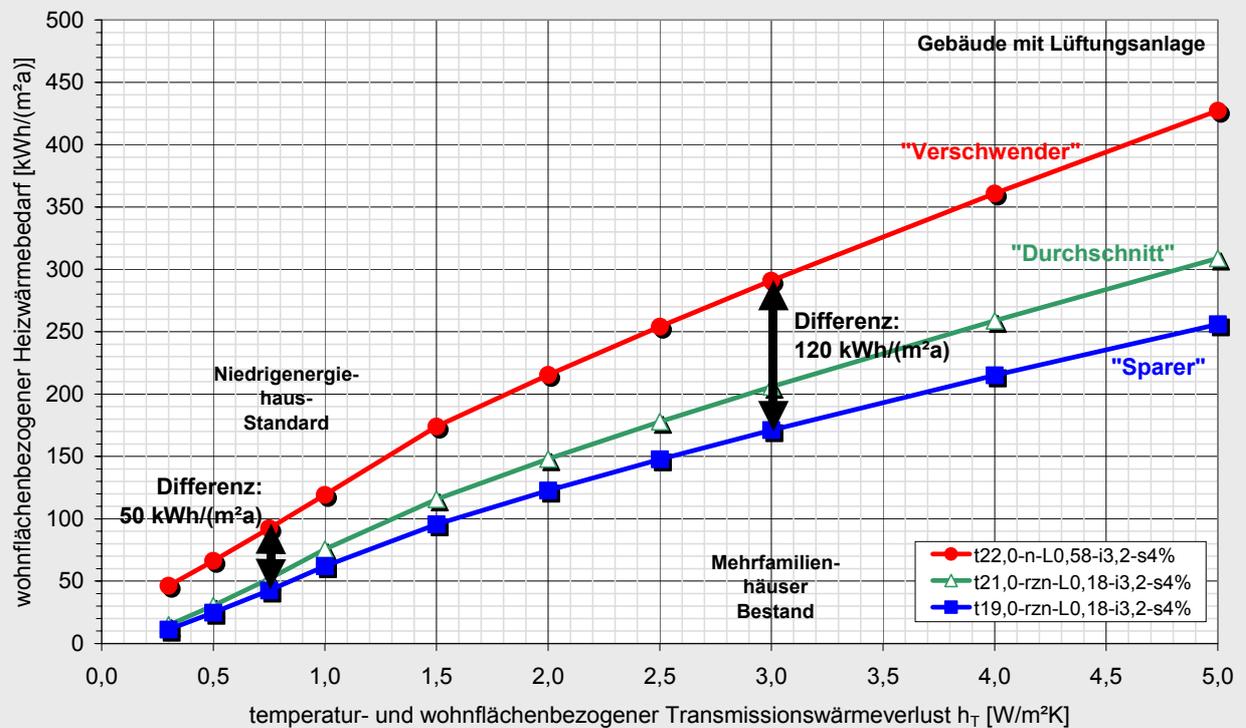
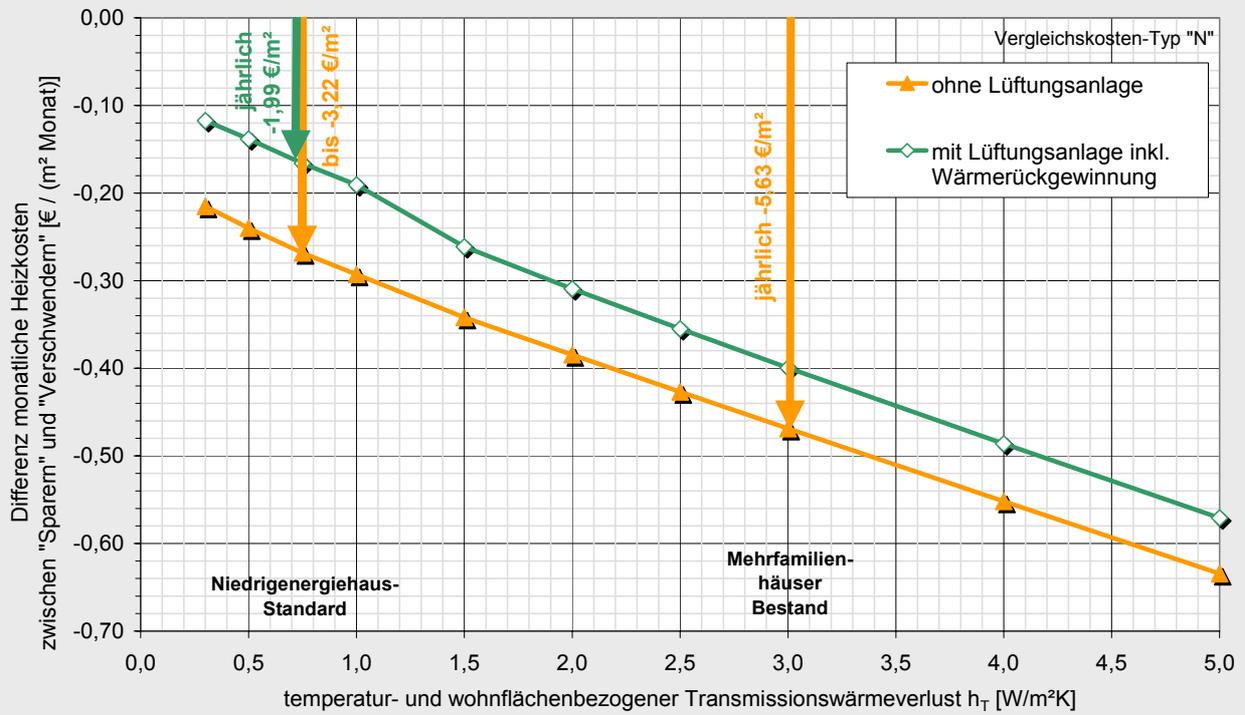


Bild 28: Differenz der Heizkosten zwischen „Sparern“ und „Verschwendern“ (Vergleichskosten-Typ „N“)



6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit

Der Heizenergieverbrauch einer Wohnung wird bei durchschnittlicher Nutzung maßgeblich durch den energetischen Standard des betreffenden Gebäudes bestimmt – insbesondere durch den baulichen Wärmeschutz. Dennoch hat der einzelne Nutzer immer einen Einfluss auf seinen Verbrauch. Besonders sparsames oder besonders verschwenderisches Verhalten führt auch bei unterschiedlichsten Gebäudestandards typischerweise zu Verbrauchsänderungen von über $\pm 50\%$.

In der vorliegenden Studie werden die das Nutzerverhalten typischerweise bestimmenden Parameter ermittelt. Grundlage ist die Auswertung verschiedener messtechnischer Untersuchungen von Wohngebäuden. Damit wird ein „Nutzermodell“ erstellt, das Randbedingungen enthält für durchschnittliches sowie für typisch „sparsames“ und „verschwenderisches“ Verhalten. Darüber hinaus liefert es Aussagen zur Verhaltensänderung durch Umlage der individuell verursachten Heizkosten gegenüber einer pauschalen Abrechnung.

Tab. 11: Übersicht über die Höhe der unterschiedlichen Arten von Vergleichskosten in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard

Vergleichskosten-Typ		Bestand	EnEV-Grenzwert	NEH-Wärmeschutzstandard		Passivhaus	
				ohne Lüftungsanl.	mit Lüftungsanl.		
Wärmeschutz	$h_T =$	3,0 W/m ² K	1,3 W/m ² K	0,75 W/m ² K	0,75 W/m ² K	0,3 W/m ² K	
Lüftung		Fenster	Fenster	Fenster	LA mit WRG	LA mit WRG	
wohnflächenbezogener Heizwärmebedarf		225 kWh/(m ² a)	125 kWh/(m ² a)	85 kWh/(m ² a)	55 kWh/(m ² a)	15 kWh/(m ² a)	
"D"	Durchschnittliche Heizkosten		8,4 €/m²	5,0 €/m²	3,4 €/m²	2,0 €/m²	0,6 €/m²
"E"	Heizkosten-Einsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung	obere Grenze	2,3 €/m ²	2,6 €/m ²	2,9 €/m ²		
		untere Grenze	2,3 €/m ²	1,2 €/m ²	0,5 €/m ²		
		50/50-Mix	2,3 €/m²	2,0 €/m²	2,0 €/m²	*)	*)
"N"	Nutzereinfluss auf individuellen Verbrauch (Differenz zwischen typischem "Sparer" und typischem "Verschwender")		5,6 €/m²	3,9 €/m²	3,2 €/m²	2,0 €/m²	1,4 €/m²

*) auf der Grundlage der vorhandenen Daten keine Aussage möglich

Auf dieser Basis sind verschiedene Aussagen zum Nutzen der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung bei verbessertem energetischen Gebäudestandard möglich. Im Fokus steht dabei vor allem der Niedrigenergiehaus-Standard (NEH) mit Transmissionswärmeverlusten, die 30 bis 50% unter dem EnEV-Grenzwert liegen.

Der Nutzen der verbrauchsabhängigen Abrechnung wird in dieser Studie in Form von drei Arten von Vergleichskosten definiert, die – in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard – Hinweise auf die vertretbaren Kosten der Verbrauchserfassung geben. Für den NEH-Wärmeschutzstandard ergeben sich die folgenden wohnflächenbezogenen Kennwerte (Übersicht in Tab. 11):

Vergleichskosten-Typ „E“ – Heizkosten-Einsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung:

Durch Umlage des gemessenen Verbrauchs gehen Nutzer sparsamer mit Energie um. Für Bestandsgebäude wurden empirisch ca. 20 % Einsparung nachgewiesen – das entspricht einer Reduktion des Heizwärmebedarfs von etwa 50 bis 60 kWh/(m²a) und damit einer Heizkosteneinsparung von über 2 € pro m² Wohnfläche. Diese Einsparung wird sowohl durch eine reduzierte Raumtemperatur als auch durch sparsameres Fensteröffnen erreicht. Auf der Basis des Nutzermodells können daraus für Niedrigenergiehäuser Einsparungen abgeleitet werden, die relativ bei etwa 30 bis 40%, absolut etwa in der gleichen Größenordnung wie bei Bestandsgebäuden liegen.

Damit ergibt sich unter dem Kriterium der „**Rentabilität**“ eine Obergrenze für die Mehrkosten der Verbrauchsabrechnung bei Niedrigenergiehäusern von **ca. 2 € pro m² Wohnfläche**.

Vergleichskosten-Typ „N“ – Nutzereinfluss auf den individuellen Verbrauch:

Ziel der verbrauchsabhängigen Abrechnung ist nicht nur die Einsparung von Energie, sondern auch die Herstellung von „Heizkostengerechtigkeit“. Gemäß dem hier entwickelten Nutzermodell liegen die durch verschwenderisches Verhalten verursachten jährlichen Heizkosten im Gebäudebestand typischerweise um ca. 5 bis 6 € pro m² Wohnfläche höher als bei sehr sparsamem Verhalten. Bei Niedrigenergiehäusern ohne Lüftungsanlage sinkt diese Spanne auf ca. 3 € pro m² (Tab. 11). Für den „Sparer“ erscheint die verbrauchsabhängige Abrechnung dann als sinnvoll, wenn die Kosten für die Verbrauchsmessung kleiner sind als der Betrag, den er gegenüber einem durchschnittlichen Haushalt einspart – dies entspricht etwa 50% der hier bestimmten Vergleichskosten.

Damit lassen sich zur Herstellung von „**Heizkostengerechtigkeit**“ Mehrkosten der Verbrauchsabrechnung bei Niedrigenergiehäusern von jährlich max. **ca. 1,5 € pro m² Wohnfläche** rechtfertigen.

Werden durch den Einsatz einer **Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung** auch die Lüftungswärmeverluste reduziert, so ergibt sich unter den gleichen Annahmen ein Wert von **ca. 1 € pro m² Wohnfläche**. Für energetisch noch einmal verbesserte **Passivhäuser** sinkt dieser Wert auf **0,7 € pro m² Wohnfläche**.

Insgesamt kann damit die Empfehlung abgeleitet werden, dass sich die Kosten der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung bei Niedrigenergiehäusern in einem Rahmen von jährlich 1 bis 1,5 € pro m² Wohnfläche bewegen sollten.

Bei Passivhäusern mit einem Heizwärmebedarf unter 15 kWh/(m²a) sollten Messkosten von weniger als 0,7 € pro m² und Jahr angestrebt werden.

Diese Ergebnisse wurden auf der Grundlage des heutigen Energiepreisniveaus bestimmt. Im Falle von realen Energiepreissteigerungen würden sich natürlich auch die hier berechneten Vergleichskosten erhöhen, was sich günstig auf die Angemessenheit und Rentabilität der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung auswirken würde.

7 ANHANG

7.1 Quellen

- [Brunner et al. 1984] Brunner, C. U.; Graa, J.: „Wärmetechnische Sanierung Wohnkolonie Limmatstraße“, NEFF-Projekt 41, EMPA-Bericht 11102, Dübendorf und Zürich 1984
- [Busching et al. 1994] Busching, S.; Herbert, W.; Dittmann, W.; Wiontzek, M.: Ermittlung des Wärmeverbrauchs in ausgewählten Niedrig-Energie-Häusern in Schleswig-Holstein – Erster Zwischenbericht, Forschungsgesellschaft für umwelt-schonende Energieumwandlung und –nutzung, Kiel 1994
- [EPHW 1997] Loga, T.; Imkeller-Benjes, U.: „Energiepaß Heizung/Warmwasser – Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem“, IWU, Darmstadt 1997
- [Feist 1997] Feist, W. (Hrsg.): „Das Niedrigenergiehaus – Neuer Standard für energiebewußtes Bauen“, 4. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1997
- [Herbert 2001] Herbert, Carsten: Entwicklung eines Schätzverfahrens zur vereinfachten Bestimmung der Fensterflächen für die energetische Bilanzierung von Wohngebäuden; IWU, Darmstadt 2001
- [IWU/ebök 1999] Loga, T.; Kahlert, C.; Laidig, M.; Lude, G.: Räumlich und zeitlich eingeschränkte Beheizung. Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung in stationären Bilanzverfahren; IWU, Darmstadt 1999
- [IWU 2001a] Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R.: Guter Ansatz - schwache Standards: die neue Energieeinsparverordnung; Stellungnahme zum Referentenentwurf vom 29. November 2000 bzw. Kabinettsbeschluss vom 7. März 2001; IWU Darmstadt, März 2001
- [IWU 2001b] Loga, T.; Born, R.; Großklos, M.; Bially, M.: „Energiebilanz-Toolbox – Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepaß Heizung/Warmwasser“, IWU, Darmstadt, 2001
- [Kluttig/Erhorn 1998] Kluttig, H.; Erhorn, Hans: Niedrigenergiehäuser in Ziegelbauweise, IBP-Bericht WB 199/1998, Stuttgart 1998
- [LEG 1999] „Heizenergie im Hochbau – Leitfaden energiebewußte Gebäudeplanung“, Hessisches Umweltministerium, 6. Auflage, Wiesbaden 1999
- [Liepelt/Wiesner 1984] Liepelt, K.; Wiesner, W.: „Erste Stufe der Entwicklung eines Informationssystems, das die Energieverwendung der privaten Haushalte in Abhängigkeit von den Determinanten der Energieverwendung laufend mengenmäßig und wertmäßig registriert und darüber bedarfsgerecht berichtet“, Forschungsbericht des BMFT Nummer T 84-280, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Eggenstein-Leopoldshafen, 1984
- [Loga et al. 1997] Loga, T.; Müller, K.; Menje, H.: „Die Niedrigenergiesiedlung Diestelweg in Niedernhausen – Ergebnisse des Messprogramms“, IWU, Darmstadt 1997
- [Loga 2003] Loga, T.: Heizgrenztemperaturen für Gebäude unterschiedlicher energetischer Standards – Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6; Bauphysik 25 / Heft 1 / Feb. 2003
- [LUM 2003] Ebel, W.; Großklos, M.; Loga, T.; Knissel, J.; Müller, K.: „Wohnen in Niedrigenergie- und Passivhäusern – Endbericht“, IWU, Darmstadt 2003
- [Mügge 1993] Mügge, Günter: Die Bandbreite des Heizenergieverbrauchs – Analyse theoretischer Einflussgrößen und praktischer Verbrauchsmessungen; Diss. am FB 21 der TU Berlin; VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 19 / Nr. 69; Düsseldorf 1993

- [NRW 2000] Michael, K., Eichhorn, S.; Lux, S.; Schmid, K.; Kramp, M.: „Effizienz von Lüftungsanlagen in Niedrigenergie-Häusern in NRW“, Niedrig-Energie-Institut GbR, Detmold bzw. Fachhochschule Lippe, Detmold, 2000
- [Recknagel 2001] Recknagel, Sprenger, Schramek: „Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik“, Ausgabe 2001/2002, Oldenbourg Industrieverlag, München 2001
- [Reiß/Erhorn 1994] Reiß, J.; Erhorn, H.: Niedrigenergiehäuser Heidenheim, IBP-Berichte WB 75/1994, Stuttgart 1994
- [Reiß/Erhorn 1997] Reiß, J.; Erhorn, H.: Mehrfamilien-Niedrigenergiehaus Mannheim, IBP-Berichte WB 96/1997, Stuttgart 1997
- [Reiß/Erhorn 1999] Reiß, J.; Erhorn, H.: Mehrfamilien-Niedrigenergiehaus Wien-Leopoldstadt, IBP-Berichte WB 105/1999, Stuttgart 1999
- [Riedel 1996] Riedel, M.: Analyse des Heizwärmeverbrauchs von sechs Niedrigenergie-Mehrfamilienhäusern im Wohnpark Kraienbruch, Essen, Diplomarbeit an der FH Münster, 1996 und Messdaten der Uni Siegen unter [http:// nesa1.uni-siegen.de/EnergetischeDiagnose/](http://nesa1.uni-siegen.de/EnergetischeDiagnose/)
- [Rouvel 1981] Rouvel, L.: „Einfluss von Nutzergewohnheiten und Abrechnungsart auf den Heizenergieverbrauch“, in Dokumentation zur Tagung „Einfluss des Verbraucherverhaltens auf den Energiebedarf privater Haushalte“ am 16.10.1981 in München, S. 109-120, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1982
- [Rouvel/Nikolic 1986] Rouvel, L.; Nikolic, V. : „Lüftung im Wohnungsbau, Demonstrationsvorhaben Mehrfamilienhaus Berlin“, Forschungsbericht T 86-188 des Bundesforschungsministeriums, 1986
- [RWTH 1980] Leberling, H.: „Wirtschaftliche und technische Möglichkeiten der Energieeinsparung durch Einführung einer umfassenden verbrauchsorientierten Heizkostenabrechnung“, Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft, Durchführung: Institut für Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Unternehmensforschung der RWTH Aachen, Aachen ca. 1980
- [Schweiz 1977] J. Nipkow u.a.: „Individuelle Heizkostenabrechnung – eine Möglichkeit zum Energiesparen“, Report Nr. 3, Schweizer Energie-Stiftung, Zürich 1977
- [Techem 2002] Techem: „Energiekennwerte – Hilfen für die Wohnungswirtschaft“, Techem AG, Frankfurt 2002
- [Vormbusch et al. 2002] Vormbusch, U.; Beckmann, F; Weber, J.: „Sozialwissenschaftliche Begleituntersuchung zur Einführung eines Energieverbrauchsausweises in Frankfurter Haushalten durch das Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main im Jahr 2002“, Institut für sozialwissenschaftliche Untersuchungen e. V. Frankfurt a.M. 2002
- [Weidlich 1987] Ingenieurgesellschaft Weidlich: „Energiegutachten Wohnhausgruppe 906“, im Auftrag des Senators für Wirtschaft und Arbeit, Berlin 1987
- [WWF 2001] Großklos, M.; Hinz, E.; Enseling, A.: „Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus – Über die Machbarkeit ehrgeiziger Klimaschutzziele im Gebäudebestand von Wohnungsunternehmen“, WWF und IWU, Frankfurt 2001

7.2 Weitere Ergebnisse der Auswertung von Messprojekten

Die folgenden Auswertungen der vermessenen Projekte ergaben keinen verwertbaren Zusammenhang mit den in der Studie untersuchten Parametern. Dennoch sind einige interessante Zusammenhänge, oder auch fehlenden Zusammenhänge in den Diagrammen zu erkennen, so dass sie an dieser Stelle in Diagrammform wiedergegeben werden sollen.

Einflussgrößen auf die Raumtemperatur

Bild 29: Zusammenhang zwischen Verbrauchskennwert und gemessener Raumtemperatur (für WE gleicher EBF und aus dem gleichen Bauprojekt)

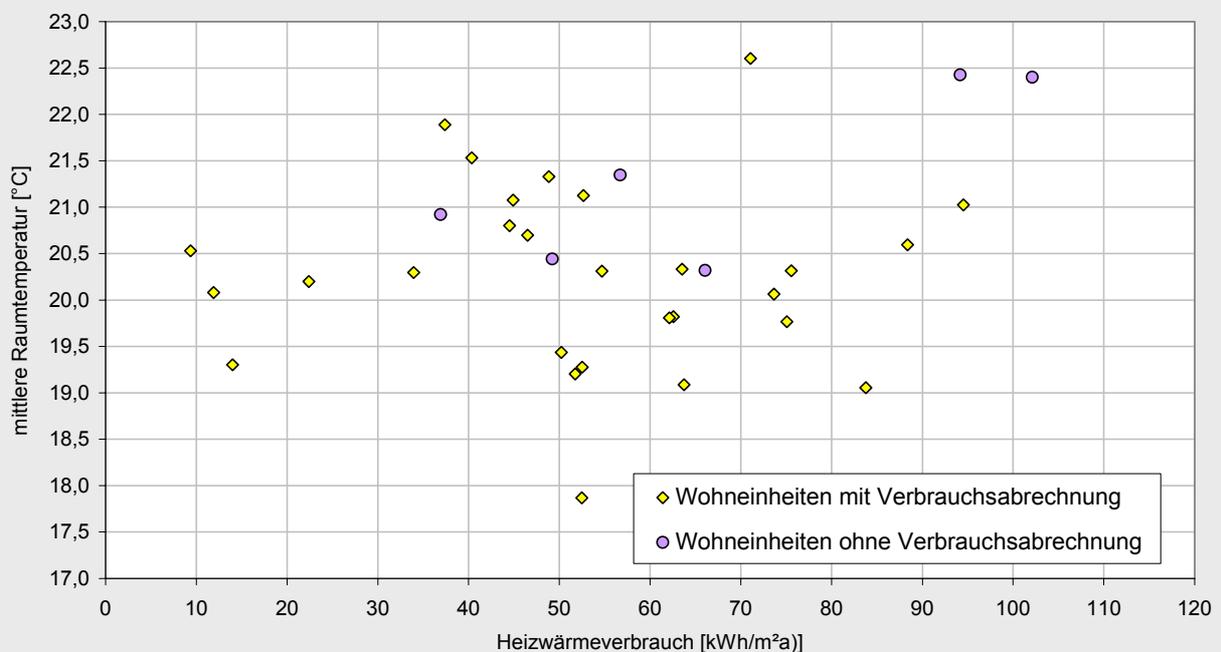


Bild 30: Heizwärmeverbrauchskennwert und Raumtemperatur bei verschiedenen Arten der Lüftung (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

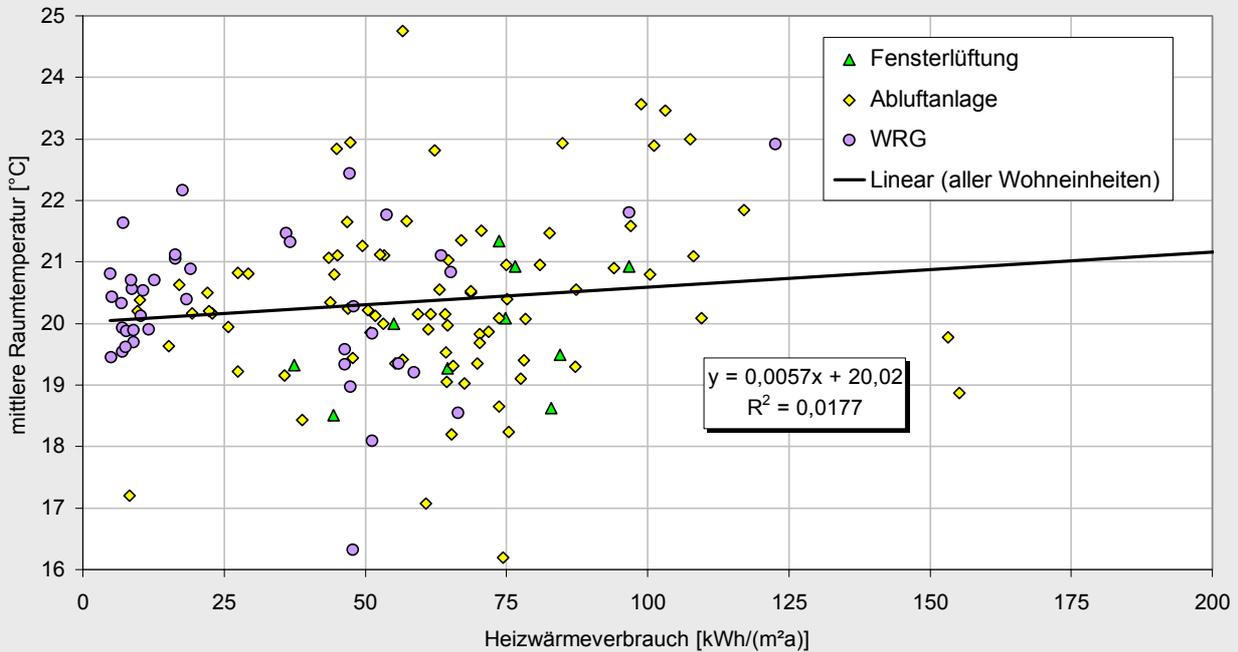


Bild 31: Flächenbezogener Wärmeverlust h und Raumtemperatur (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

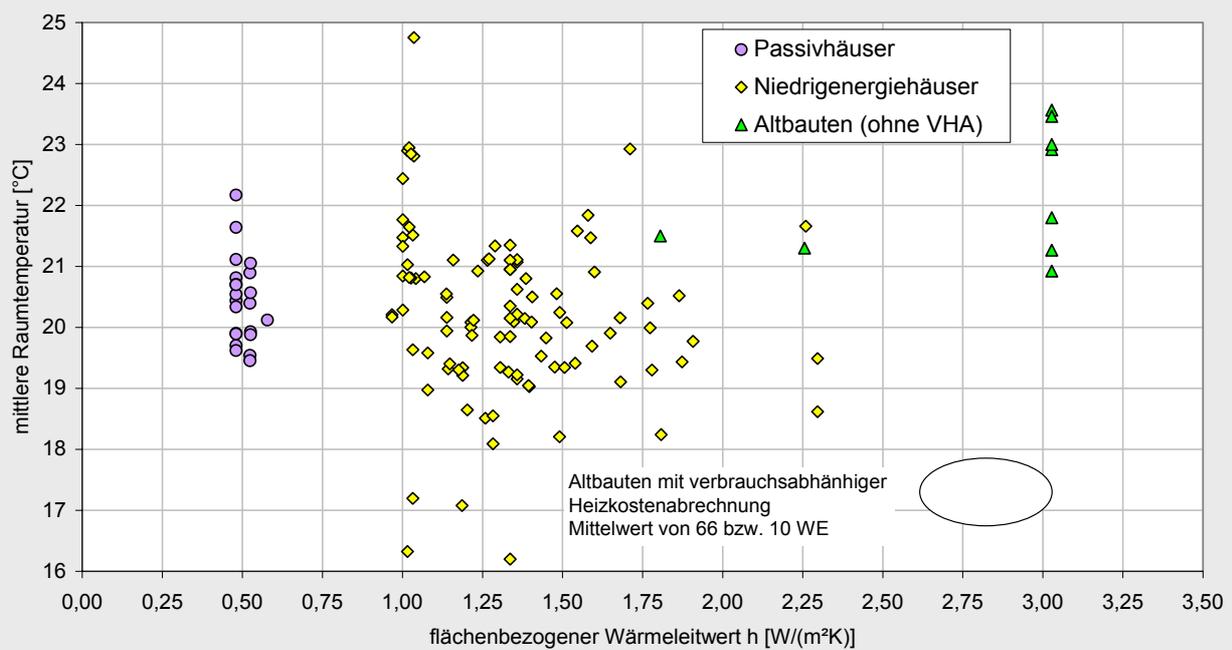


Bild 32: Zusammenhang zwischen temperatur- und wohnflächenbezogenem Wärmeverlust h_T und der Raumtemperatur für Wohneinheiten mit und ohne VHA (für Wohneinheiten gleicher A_{EB} aus dem gleichen Bauprojekt)

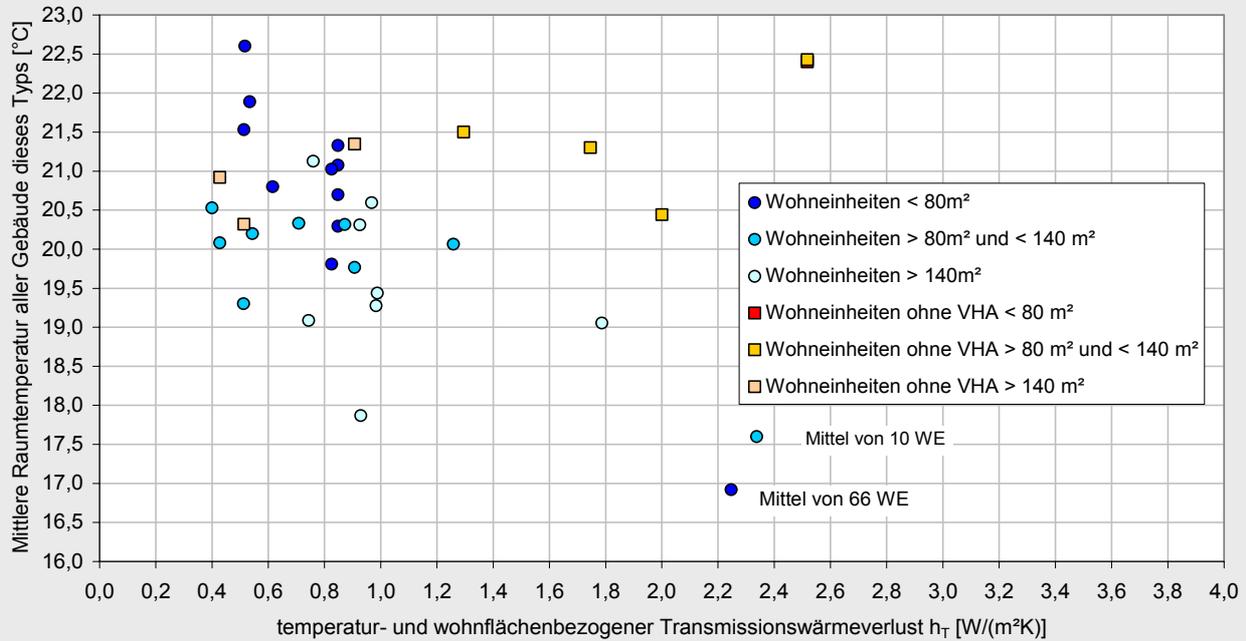


Bild 33: Zusammenhang zwischen mittlerem k-Wert der Gebäudehülle und der Raumtemperatur (für Wohneinheiten gleicher A_{EB} und dem gleichen energetischen Standard)

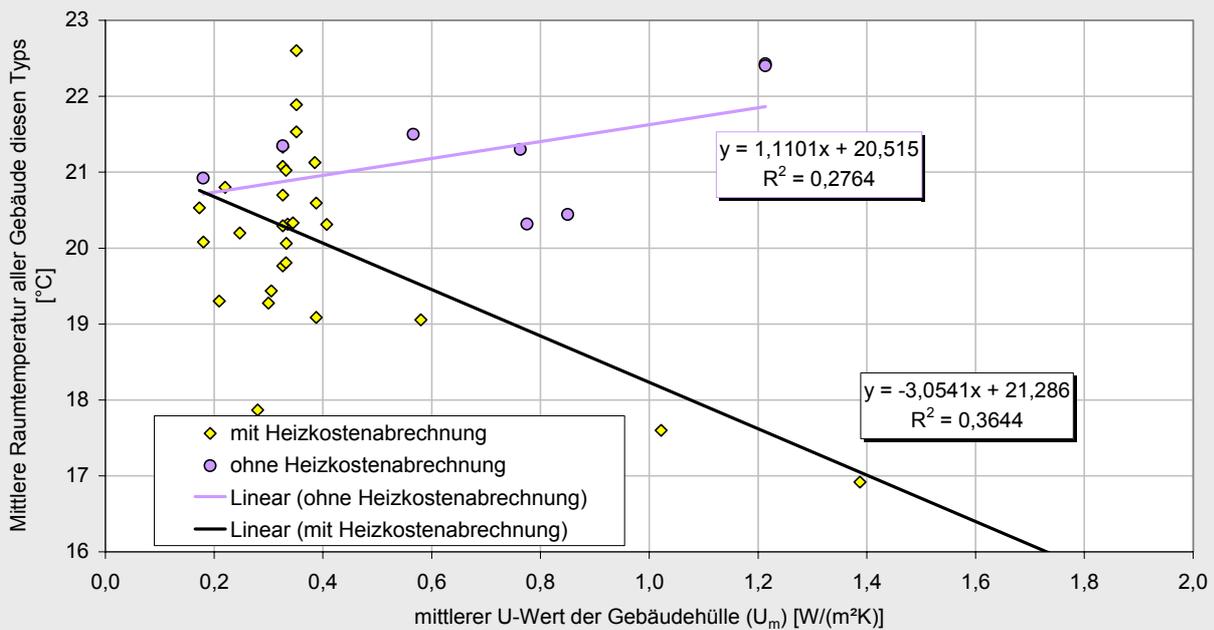


Bild 34: Zusammenhang zwischen mittlerem k-Wert der Gebäudehülle und Raumtemperatur
(für Wohneinheiten gleicher A_{EB} und dem gleichen energetischen Standard)

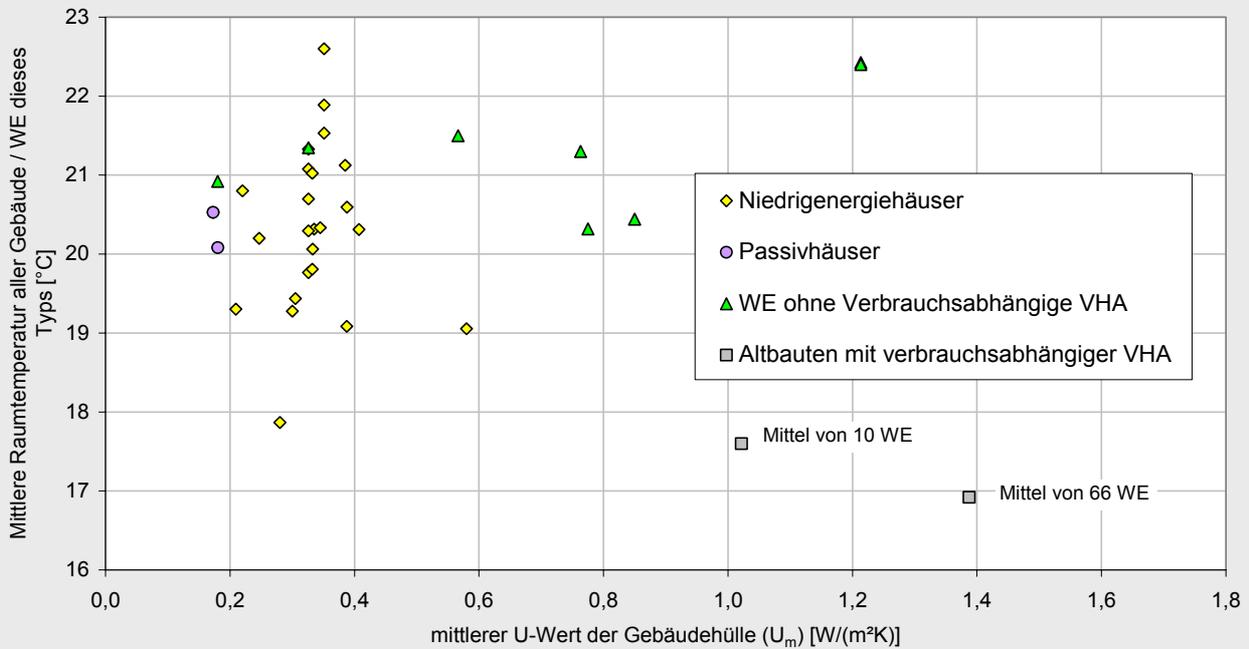


Bild 35: Zusammenhang zwischen der beheizten Wohnfläche und der mittleren Raumtemperatur (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

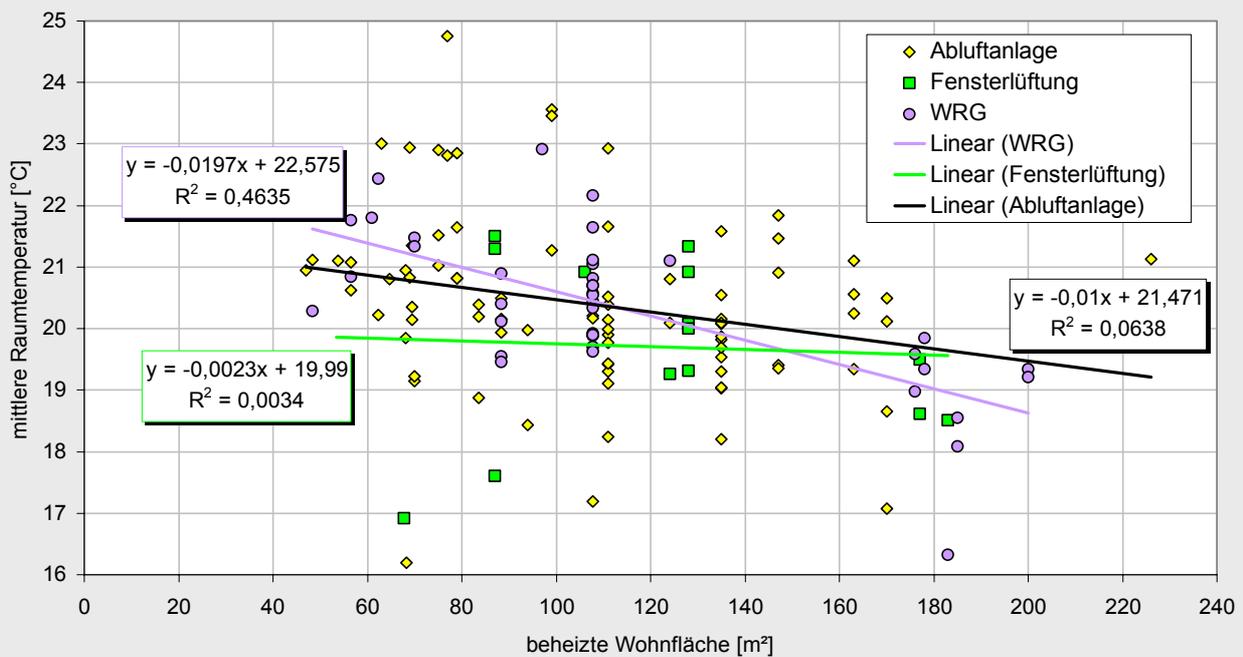
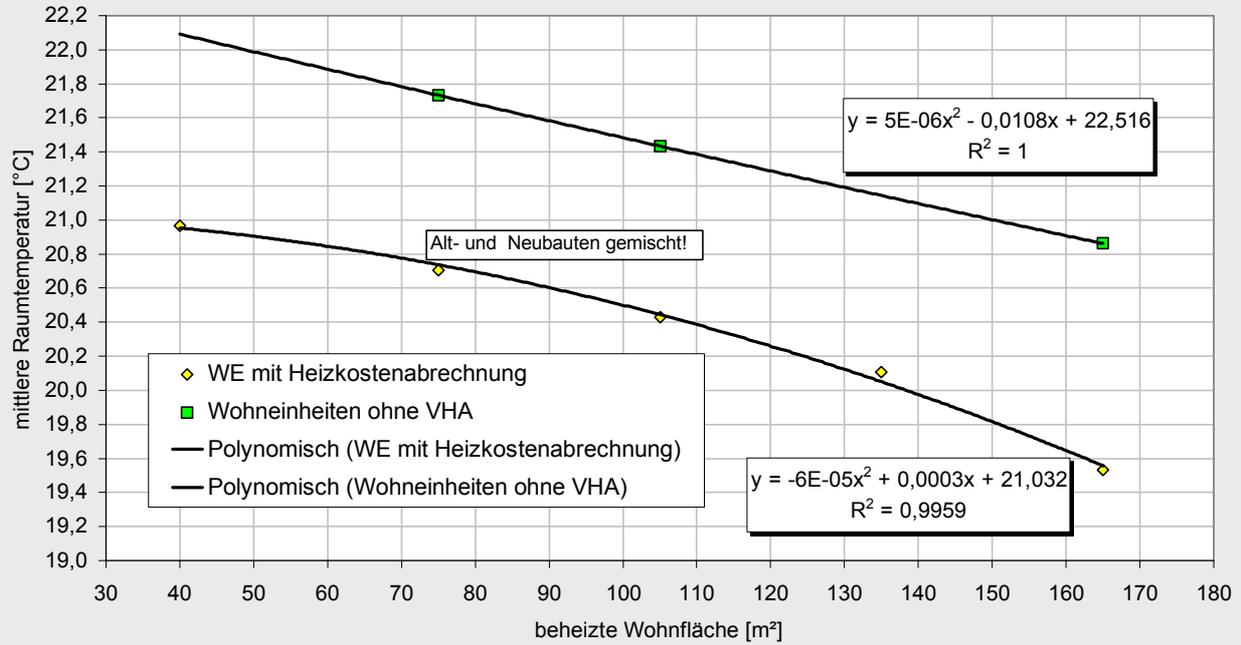


Bild 36: Zusammenhang zwischen der (mittleren) Wohnungsgröße einer Klasse und der zugehörigen Raumtemperatur



Einflussgrößen auf die Fensteröffnungsdauer

Bild 37: Zusammenhang zwischen Verbrauchskennwert und gemessener Fensteröffnung
(Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

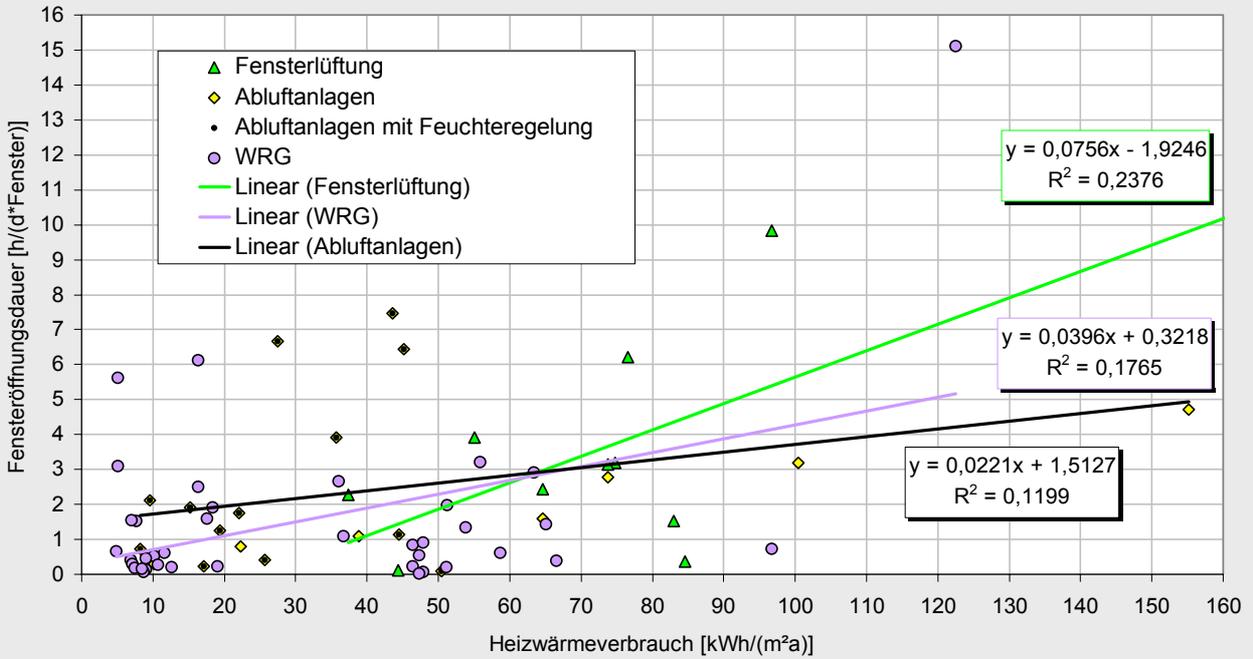


Bild 38: Zusammenhang zwischen dem mittleren temperatur- und wohnflächenbezogenen Wärmeverlust h_T und der Fensteröffnungsdauer
(Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

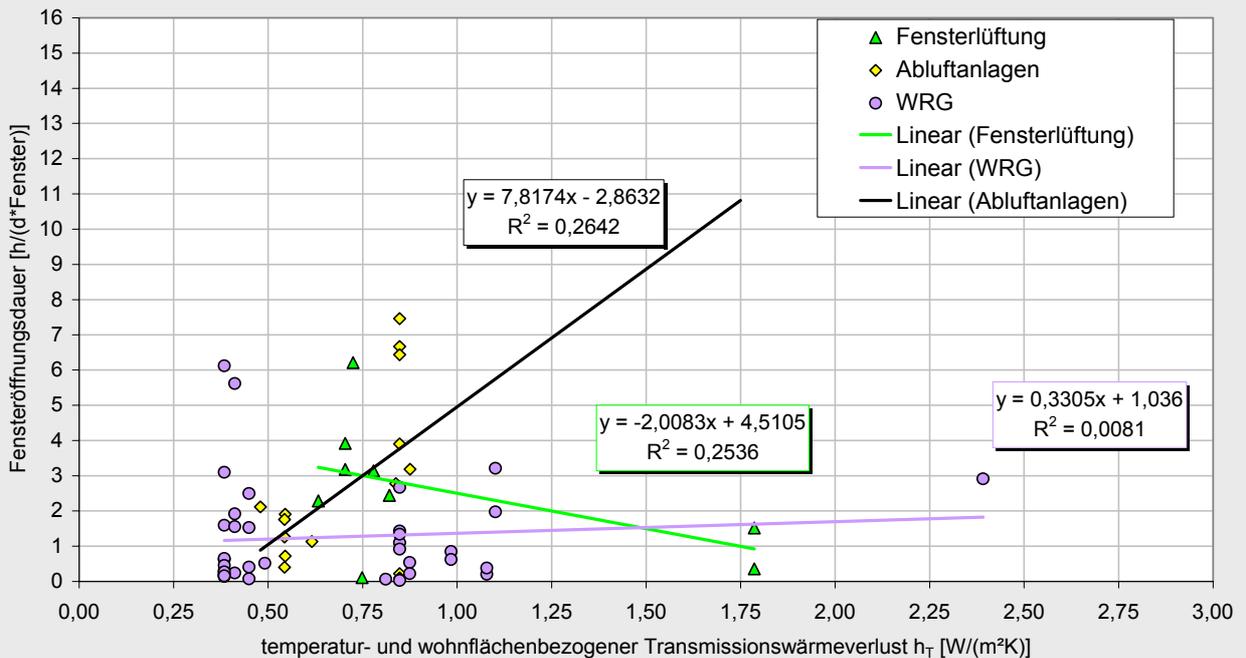


Bild 39: Zusammenhang zwischen Gebäudedichtheit (n_{50} -Wert) und Fensteröffnungsdauer (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

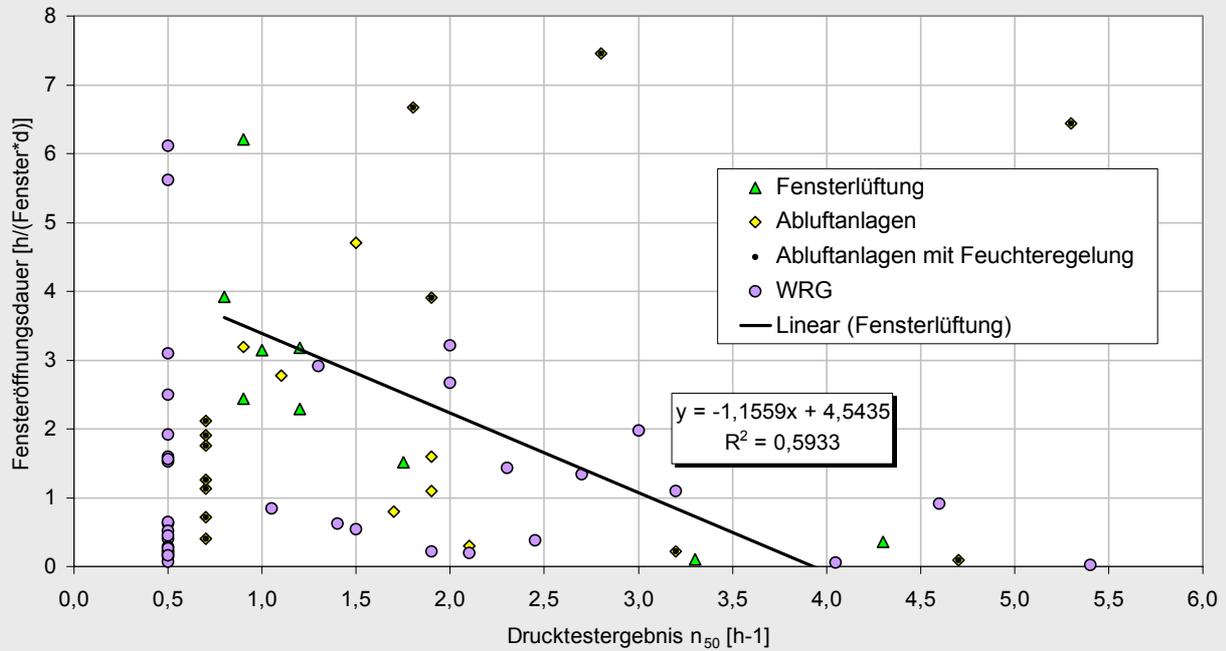
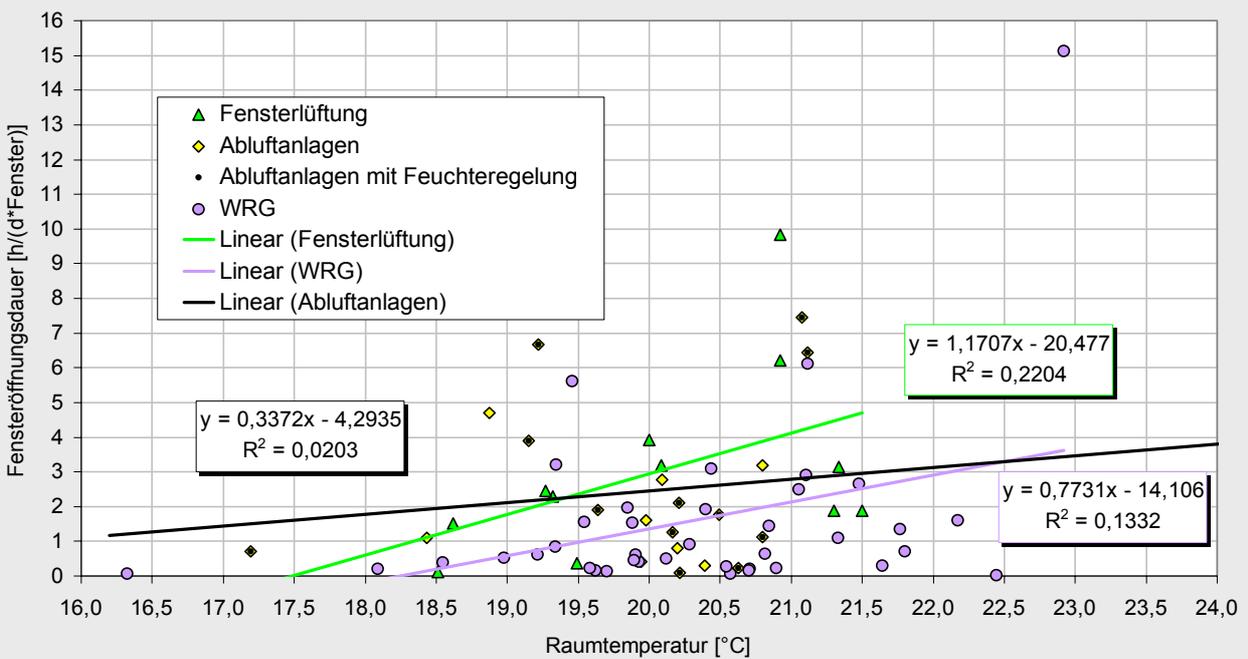


Bild 40: Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Fensteröffnungsdauer (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)



Einflussgrößen auf den Heizwärmeverbrauch

Bild 41: Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und –verbrauch in Abhängigkeit des Berechnungsverfahrens (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

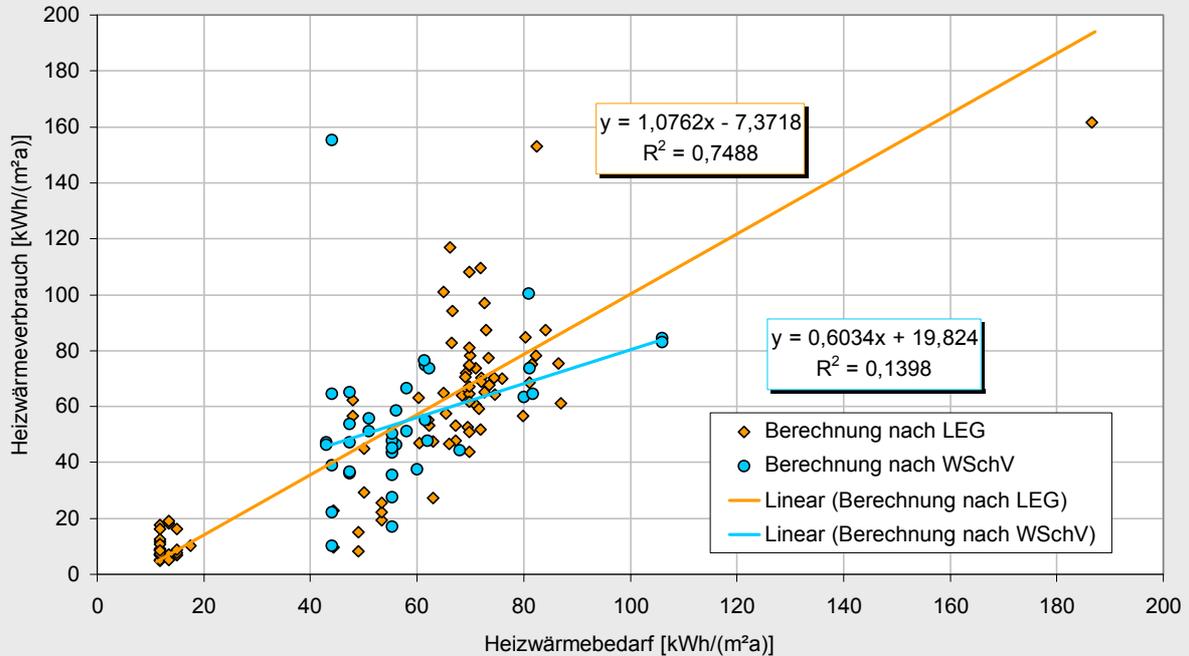


Bild 42: Zusammenhang zwischen dem berechneten Heizwärmebedarf und dem –verbrauch für unterschiedliche Arten der Lüftung (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)

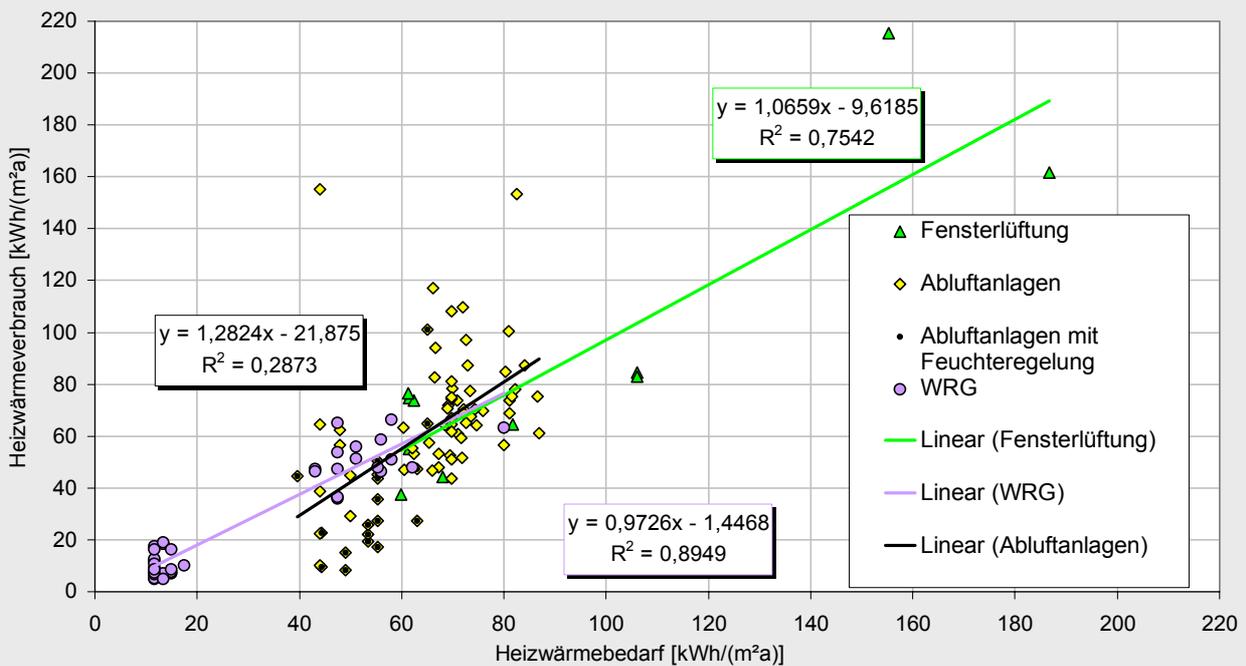
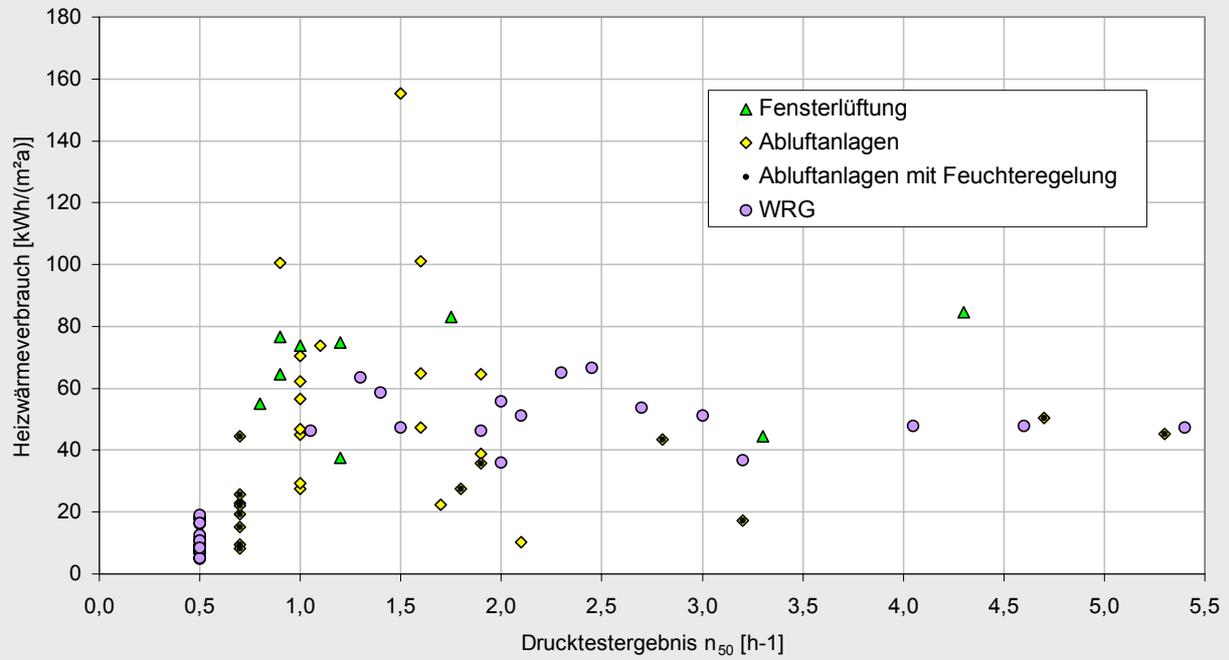


Bild 43: Zusammenhang zwischen Gebäudedichtheit (n_{50} -Wert) und Heizwärmeverbrauch (Einzelmesswerte, nicht aggregiert)



7.3 Abschätzung von nicht bekannten Gebäudeparametern

Für die Auswertung der verschiedenen Projekte in Abschnitt 3 waren nicht immer alle Daten verfügbar. Wenn die U-Werte (bzw. k-Werte) und die Teilflächen der thermischen Hülle nicht bekannt war, wird h_T aus dem mittleren k-Wert mit Hilfe folgender Formel bestimmt:

$$h_T = \frac{U_m \frac{A_{tH}}{V_e} V_e}{A_{EB}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (26)$$

mit U_m mittlerer U-Wert (bzw. k-Wert) $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

$\frac{A_{tH}}{V_e}$ Verhältnis aus thermischer Hüllfläche A_{tH} und beheiztem Gebäudebruttovolumen V_e („A/V-Verhältnis“) $[\text{m}^2/\text{m}^3]$

Typischerweise ist $\frac{V_e}{A_{EB}} \approx 4,0$. Somit kann h_T auch abgeschätzt werden, wenn das Gebäudevolumen V_e nicht bekannt ist:

$$h_T \approx 4 U_m \frac{A_{tH}}{V_e} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (27)$$

Bei fehlenden Angaben zum mittleren U-Wert, wird dieser nach folgender Formel abgeschätzt:

$$U_m \approx \frac{A_{EB} U_{\text{Außenwand}} + 0,19 A_{EB} U_{\text{Fenster}} + \frac{A_{EB}}{n_G} (1,41 U_{\text{Dach}} + 0,5 U_{\text{Keller}})}{\left(1,19 + \frac{2,41}{n_G}\right) A_{EB}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (28)$$

mit n_G Anzahl der Geschosse des Gebäudes $[-]$

Das A/V-Verhältnis kann analog wie folgt abgeschätzt werden:

$$\frac{A_{tH}}{V_e} \approx \left(1,19 + \frac{2,41}{n_G}\right) \frac{A_{EB}}{V_e} \approx 0,3 + \frac{0,6}{n_G} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (29)$$

Der flächenbezogene Lüftungswärmeverlust h_V wurde entweder aus der Energiebilanzrechnung entnommen oder pauschal nach folgender Formel bestimmt (siehe Gl. (4) bis (6):

$$h_V = c_{p,\text{Luft}} ((1 - \eta_{WRG}) n_{Anl} + n_x + n_F) h_{Raum} \approx 0,34 ((1 - \eta_{WRG}) \cdot 0,4 + 0,2) \cdot 2,5 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (30)$$

Daraus ergibt sich für h_V ein Wert von 0,51 W/(m²K) für Gebäude ohne Wärmerückgewinnung und 0,31 W/(m²K) für Gebäude mit Wärmerückgewinnung.