

Arbeitsgebiete Technische Gebäudeausrüstung

Gutachten, Studien, Untersuchungen

Simulation, Beratung

Vorträge, Schulungen

Energetische Bewertung

Entwicklung und Optimierung

**Beimischregelung von Fußbodenheizungen
Funktionale und energetische Bewertung
Effizienzsteigerung durch intelligente Regelung**

Schlussbericht

Wiesbaden, 4. August 2022

Projektkoordination:
Prof.-Dr.-Ing. Rainer Hirschberg

1	Hintergrund und Ziele	3
2	Projekthinhalte	4
2.1	Arbeitspakete	4
2.1.1	AP 1: Gebäude - Raummodell – Heizlast und Nutzenergiebedarf	4
2.1.2	AP 2: Modellierung der Standard Fußbodenheizung mit Drosselregelung	19
2.1.3	AP 3: Beschreibung und Modellierung der Fußbodenheizung mit Beimischregelung	23
2.1.4	AP 3: Energetische Bewertung von Fußbodenheizungen	25
2.1.5	AP 3: Ergebnisse der Simulationsrechnungen	26
2.1.6	AP 3: Prinzipieller Aufbau eines Reglers	32
3	Zusammenfassung der Ergebnisse	34
3.1	Flächenbezogener Heizwärmebedarf	34
3.2	Flächenbezogener Endenergiebedarf	35
3.3	Energieeinsparung	36
3.4	Einsparung von Emissionen	40
4	Allgemeine Eigenschaften	42
5	Erzieltes Ergebnis	44
5.1	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	44
5.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	44
5.3	Wissenschaftlicher Stand und Schutzrechte	45
5.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	45
5.5	Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	45
6	Literatur	47

1 Hintergrund und Ziele

Seit etwa 1970 haben sich Fußbodenheizungen als Wärmeübergabeeinrichtungen in Gebäuden nicht nur etabliert, sondern sind zum überwiegenden System geworden (integrierte Heizflächen). Von den verschiedenen Ausführungsformen haben sich Nasssysteme als die häufigste Bauform erwiesen. Bei diesem System erfolgt die Einbettung der Fußbodenheizungsrohre in den „nassen“ Estrich des Fußbodenaufbaus.

Bei Modernisierungsmaßnahmen sind aufgrund des bestehenden Fußbodenaufbaus, der keine Veränderung der Aufbauschichten erlaubt sind sogenannte „Trockensysteme“ eingeführt worden, bei denen die Fußbodenheizungsrohre in einer Trägerplatte verlegt sind. Der Anteil der so ausgeführten Anlagen ist eher als gering einzustufen.

Allen wassergeführten Fußbodenheizungen ist gemein, dass die Regelung der Wärmeabgabe durch Drosselung des Heizwasser-Massenstroms erfolgt. Dabei wurden die Prinzipien der Drosselregelung von Heizanlagen mit freien Heizflächen (Heizkörpern) übernommen. Während freie Heizflächen eine begrenzte Speicherkapazität besitzen, beträgt diese von integrierten Heizflächen ein Vielfaches. Der hieraus resultierende Einfluss auf die Trägheit (=Zeitkonstante) der Wärmeübergabe ist bei der Übernahme der Drosselregelung von Systemen mit freien Heizflächen unberücksichtigt geblieben.

Bei der Fußbodenheizung wird die Wärme überwiegend durch Strahlung an den Raum abgegeben. Nur ein geringerer Teil wird durch Konvektion an die Raumluft abgegeben. Je größer die Außentemperatur während der Heizperiode ist, desto niedriger ist die Oberflächentemperatur des Fußbodens. Das bedingt eine ungenaue Messung der Raumlufttemperatur, die über die Zweipunkt-Regelung den Stellantrieb des Heizkreises steuert.

Auch bei der Auslegung von Fußbodenheizungsflächen von der Heizlast bis zur Wärmeleistung und deren Regelung ist nicht auf die Besonderheiten von integrierten Heizflächen eingegangen worden, so dass im realen Heizbetrieb die auf die Auslegungswerte bemessenen Heizwasserströme sehr stark gedrosselt werden müssen. Diese Betriebsweise hat erheblichen Einfluss auf den Energieaufwand und den Komfort der sich einstellenden Raumtemperaturen.

Im Lebenszyklus einer installierten Fußbodenheizung kommt es häufig zu Veränderungen, z.B. im Oberbodenbelag, so dass die erforderliche Anpassung der Wärmeleistung eine Neuauslegung mit veränderten Heizwasserströmen erforderlich machen würde. Nutzer von Wohnungen wissen oft nicht, dass mit der Änderung des Oberbodenbelags auch eine Neu-/Nachdimensionierung der Fußbodenheizung erforderlich ist. Damit erfolgt in den allermeisten Fällen keine Anpassung und der Energieaufwand für den Betrieb steigt.

Bei Heizanlagen mit freien Heizflächen wird oft ein Absenkbetrieb durchgeführt, um den Energieaufwand zu verringern. Bei integrierten Heizflächen wird meist auf Absenkbetrieb verzichtet, weil die Absenk- und Aufheizzeiten sehr groß sind und ein Schnellaufheizbetrieb nicht sinnvoll realisiert werden kann.

Mit dem vorliegenden Projekt wird die Funktion und energetische Bewertung einer neuen Beimischregelung von Fußbodenheizkreisen nachvollziehbar aufgezeigt werden. Dabei wird insbesondere die Effizienzsteigerung nachgewiesen. Da die Beimischregelung im Wesentlichen auch zur Nachrüstung geeignet ist, ergibt sich eine erhebliche Reduktion des Energieaufwands und damit der Treibhausgase.

Alle Berechnungen, die für die Erarbeitung von nachvollziehbaren Feststellungen angestellt sind, erfolgen nach konventioneller Auslegung und durch Simulationsrechnungen mit einem gekoppelten Gebäude- und Anlagenmodell. Für alle Bereiche sind Parameterstudien durchgeführt, damit die maßgeblichen Einflüsse erkannt und bewertet werden können.

Mit dem Forschungsprojekt wird der allgemeingültige Nachweis über die funktionalen Vorteile und die mögliche Energieeinsparung durch Beimischregelung von Fußbodenheizungen nachgewiesen. Damit verbunden sind die Angaben zu einer intelligenten Regelung. Weiterhin werden Hinweise zu einer vereinfachten Auslegung von Fußbodenheizungen gemacht, die gerade im Wohnhausbereich zur Erhöhung der Planungssicherheit beitragen kann.

2 Projekthinhalte

2.1 Arbeitspakete

2.1.1 AP 1: Gebäude - Raummodell – Heizlast und Nutzenergiebedarf

Im ersten Arbeitspaket wurde ein Gebäude- Raummodell erstellt, das aus drei nebeneinander liegenden Räumen besteht. Damit können die typischen Situationen – Mittelraum und Endraum – abgebildet werden. Dabei wird die Lage der Fenster variiert. Mit dieser Raumanordnung können auch angrenzende oberhalb und unterhalb liegende Räume mit anderen Solltemperaturen berechnet werden. Das Gebäude-Grundmodell ist in Bild 1 dargestellt. Die Räume sind durchlaufend nummeriert und werden in dieser Form als Zonen in den Simulationsrechnungen verwendet. Die lichte Raumhöhe ist mit 2,50 m angesetzt, die Geschosshöhe mit 2,75 m.

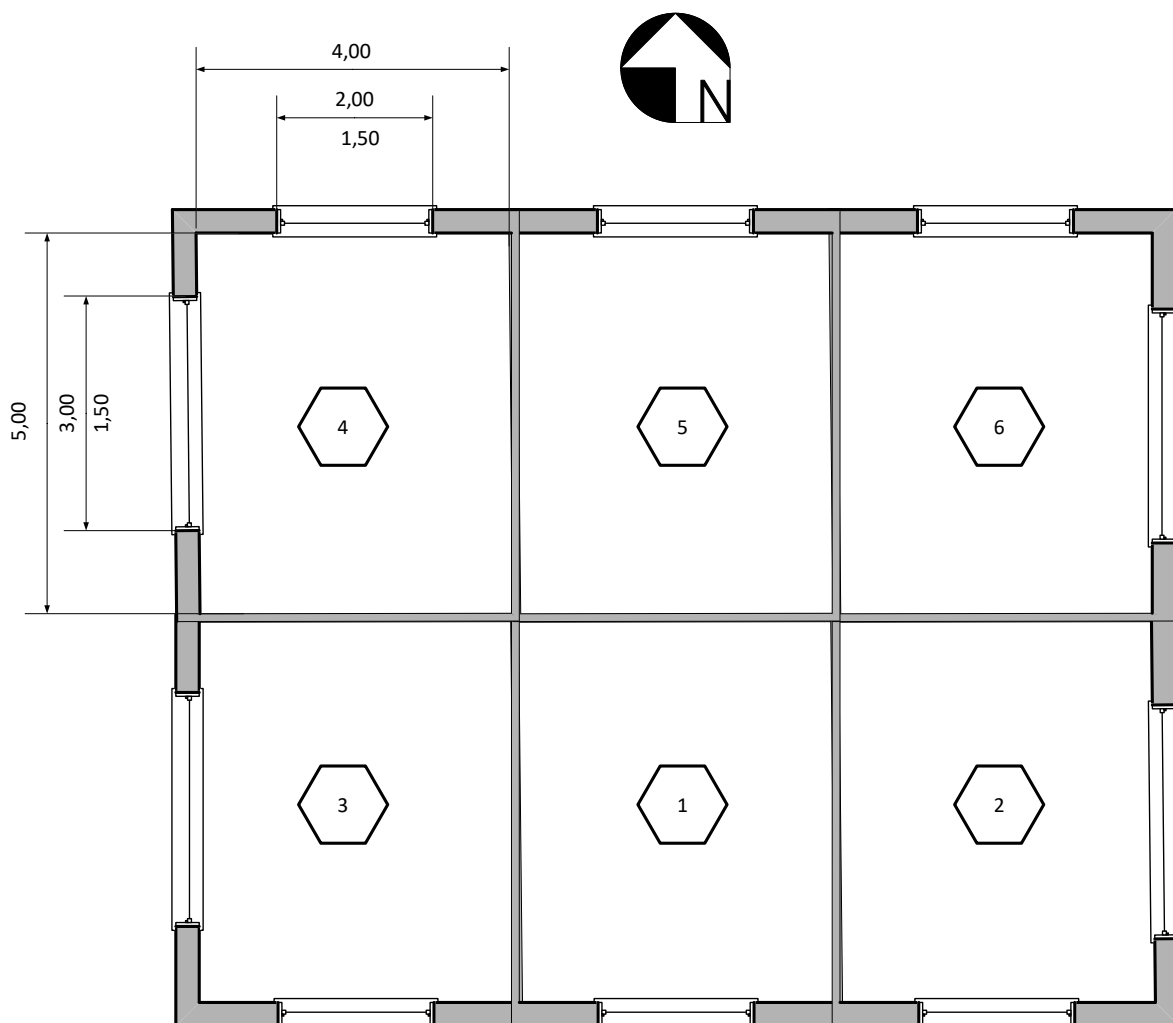


Bild 1: Gebäude-Grundmodell

Zur Ermittlung des Einflusses der Gebäudeausführung werden drei verschiedene Wärmedämmstandards für alle Varianten berechnet. Dabei wird die Bauausführung, charakterisiert durch die Wärmedurchgangszahlen, für typische Altbauten /Dämmstandard WVS 1977/, Bestandsgebäude /Dämmstandard EnEV 2002/ und für neuere

Gebäude /Dämmstandard EnEV 2016/ variiert. Die Varianten beziehen sich im Wesentlichen auf die Fenster, die Wandausführungen und die Kellerdecken. Die Innenwandqualitäten sind gleich gehalten. In Tabelle 1 sind die Wärmedurchgangszahlen zusammengestellt,

Tabelle 1: Wärmedämmstandards

Bauteil	Wärmedämmstandard in Wärmedurchgangszahl U in W/(m ² ·K)		
	1977	2002	2016
Außenfenster	2,80	1,50	1,30
Außenwand	1,38	0,67	0,27
Kellerdecke	0,79	0,49	0,34

Die Heizlastberechnungen sind nach /DIN EN 12831/ ausgeführt, obgleich 1977 noch /DIN 4701-1,2/ maßgeblich war. Dies basiert darauf, dass auch die Simulationsrechnungen nach einheitlicher Rechenmethode ausgeführt wurden. Die Solltemperaturen wurden für Wohnräume einheitlich mit 20 °C festgelegt. Da nach /DIN 12831/ die Orientierung für den Transmissionswärmedurchgang durch Außenbauteile keinen Einfluss mehr hat, ist aus Bild 1 zu ersehen, dass Modul 2 hinsichtlich der Heizlast dem Modul 3 entspricht. Daraus ergibt sich ebenfalls, dass die spiegelbildlich orientierten (nach Süden orientierten) Module 4, 5 und 6 den Modulen 2,1 und 3 entsprechen.

In den Bildern 2 bis 7 sind die Heizlastberechnungen der einzelnen Module in ausführlicher Tabellenform angegeben. Die Gesamtergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst. In Tabelle 3 sind die flächenbezogenen Heizlasten angegeben.

Tabelle 2: Heizlasten

Bauteil	Heizlast nach DIN EN 12831 (vereinfacht) in W		
	1977	2002	2016
Zone 1 und 5	1532	1140	980
Zonen 2 und 3, 4 und 6	2000	1370	1230

Tabelle 3: Flächenbezogene Heizlasten

Bauteil	Heizlast nach DIN EN 12831 (vereinfacht) in W		
	1977	2002	2016
Zone 1 und 5	76,6	57,0	49,0
Zonen 2 und 3, 4 und 6	100,0	68,5	61,5

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831																															
Projekt-Nr.:										Datum:					30.01.2022																
Bauvorhaben Sprind-Studie																															
Raumnr.: Zone 1 -Süd					Raumbezeichnung: Wohnen																										
Norm-Innentemperatur					θ_{int}	20					°C					Norm-Außentemperatur					$\theta_e = -$	-18					°C				
Raumlänge (Innenmaß)					l_R	5,00					m					Temperatur-Reduktionsfaktor															
Raumbreite (Innenmaß)					b_R	4,00					m					(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*)										$f_{\Delta\theta,i} =$	1,0				
Raumfläche					A_R	20,00					m ²					* NA - Tabelle 12															
Geschosshöhe					h_G	2,75					m					Mindest-Luftwechselrate					n_{min}	0,5					h ⁻¹				
Deckendicke					d	0,25					m																				
Raumhöhe					h_R	2,50					m																				
Raumvolumen					V_R	50,00					m ³					Wiederaufheizfaktor					$f_{RH} =$	0					W/m ²				
Transmissionswärmeverlust																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																	
					3 x 4 x 5		6 - 7			9 + 10		8x11x12		13x14																	
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitg.)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigerter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissionswärmeverlust																	
-	-	n	b	h/l	A	A _{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U_C	f_k	H _T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T																	
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W																	
N	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	2,80	0,10	2,90	1,00	8,70	38	331																	
N	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	1,38	0,10	1,48	1,00	11,81	38	449																	
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122																	
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122																	
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97																	
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,79	0,10	0,89	1,00	17,82	5	89																	
Transmissionswärmeverlust												H_T =	107	Φ_T =	1209																
Lüftungswärmeverlust [$V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]$]								25,00	Konst.	V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V																		
								$C_p \cdot \zeta$	m ³ /h	W/K		W																			
Lüftungswärmeverlust HV= (Konst: V_{min}) und ΦV= [(HV · Δ(θ _{int} -θ _e)]								0,34	25,00	8,50	38	323																			
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:					77	W/m ²	31	W/m ³)	$\Phi_{HLNetto} = f_{\Delta\theta,i} \cdot (\Phi_T + \Phi_V) =$					1532																	
Zusatz-Heizlast unterbrochener Heizbetrieb					$\Phi_{RH} = A_R \cdot f_{RH}$			20,00	m ² x	0	W/m ²	0																			
Norm-Heizlast												Φ_{HL} =	1532																		

Bild 2: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone 1 und Dämmstandard 1977

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831															
Projekt-Nr.:		Datum:										30.01.2022			
Bauvorhaben		Sprint-Studie													
Raumnr.:		2 - Süd_West			Raumbezeichnung:					Wohnen					
Norm-Innentemperatur		θ_{int}	20 °C		Norm-Außentemperatur		$\theta_e = -18$ °C								
Raumlänge (Innenmaß)		l_R	5,00 m		Temperatur-Reduktionsfaktor										
Raumbreite (Innenmaß)		b_R	4,00 m		(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*) $f_{\Delta\theta,i} = 1,0$										
Raumfläche		A_R	20,00 m ²		* NA - Tabelle 12										
Geschosshöhe		h_G	2,75 m		Mindest-Luftwechselrate		$n_{min} = 0,5$ h ⁻¹								
Deckendicke		d	0,25 m												
Raumhöhe		h_R	2,50 m												
Raumvolumen		V_R	50,00 m ³		Wiederaufheizfaktor		$f_{RH} = 0$ W/m ²								
Transmissionswärmeverlust															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
					3 x 4 x 5		6 - 7			9 + 10		8x11x12		13x14	
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitung)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigierter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissionswärmeverlust	
-	-	n	b	h/l	A	A _{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U_C	f_k	H _T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T	
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W	
S	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	2,80	0,10	2,90	1,00	8,70	38	331	
S	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	1,38	0,10	1,48	1,00	11,80	38	448	
W	AF	1	3,50	1,50	5,3		5,3	2,80	0,10	1,40	1,00	7,42	38	282	
W	AW	1	5,00	2,75	13,8	5,3	8,5	1,38	0,10	1,40	1,00	11,90	38	452	
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97	
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,79	0,10	0,89	1,00	17,82	5	89	
Transmissionswärmeverlust												H_T = 126	$\Phi_T = 1943$		
Lüftungswärmeverlust		$[V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]]$		25,00	Konst.		V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V					
							$C_p \cdot \rho$	m ³ /h	W/K						
Lüftungswärmeverlust HV=		(Konst. · V_{min}) und $\Phi_V = [(HV \cdot \Delta(\theta_{int}-\theta_e))]$		0,34	25,00	8,50	38	323							
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:		113 W/m ²		45 W/m ³)		$\Phi_{HLNetto} = f_{\Delta\theta,i} \cdot (\Phi_T + \Phi_V) =$		2266							
Zusatz-Heizlast		unterbrochener Heizbetrieb		$\Phi_{RH} = A_R \cdot f_{RH}$		20,00	m ² x	0	W/m ²	0					
Norm-Heizlast												$\Phi_{HL} =$	2266		

Bild 3: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone 2 und Dämmstandard 1977

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831																															
Projekt-Nr.:										Datum:					30.01.2022																
Bauvorhaben Sprind-Studie																															
Raumnr.: 1 - Mitte-S					Raumbezeichnung: Wohnen																										
Norm-Innentemperatur					θ_{int}	20					°C					Norm-Außentemperatur					$\theta_e =$	-18					°C				
Raumlänge (Innenmaß)					l_R	5,00					m					Temperatur-Reduktionsfaktor															
Raumbreite (Innenmaß)					b_R	4,00					m					(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*)										$f_{\Delta\theta,i} =$	1,0				
Raumfläche					A_R	20,00					m ²					* NA - Tabelle 12															
Geschosshöhe					h_G	2,75					m					Mindest-Luftwechselrate					n_{min}	0,5					h ⁻¹				
Deckendicke					d	0,25					m																				
Raumhöhe					h_R	2,50					m																				
Raumvolumen					V_R	50,00					m ³					Wiederaufheizfaktor					$f_{RH} =$	0					W/m ²				
Transmissionswärmeverlust																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																	
					3 x 4 x 5			6 - 7				8 x 11 x 12			13 x 14																
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitung)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigerter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissionswärmeverlust																	
-	-	n	b	h/l	A	A _{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U_C	f_k	H _T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T																	
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W																	
N	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	1,50	0,10	1,60	1,00	4,80	38	182																	
N	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	0,67	0,10	0,77	1,00	6,18	38	235																	
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122																	
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122																	
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97																	
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,49	0,10	0,59	1,00	11,84	5	59																	
Transmissionswärmeverlust												H_T =	91	Φ_T =	817																
Lüftungswärmeverlust [$V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]$]								25,00	Konst.	V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V																		
								$C_p \cdot \zeta$	m ³ /h	W/K	W																				
Lüftungswärmeverlust HV= (Konst: V_{min}) und ΦV= [(HV · Δ(θ _{int} -θ _e)]								0,34	25,00	8,50	38	323																			
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:					57	W/m ²	23	W/m ³)	$\Phi_{HLNetto} = f_{\Delta\theta,i} \cdot (\Phi_T + \Phi_V) =$					1140																	
Zusatz-Heizlast unterbrochener Heizbetrieb					$\Phi_{RH} = A_R \cdot f_{RH}$			20,00	m ² x	0	W/m ²	0																			
Norm-Heizlast												Φ_{HL} =	1140																		

Bild 4: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone1 und Dämmstandard 2002

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831															
Projekt-Nr.:					Datum:					30.01.2022					
Bauvorhaben Sprind-Studie															
Raumnr.: 2 - Süd_West					Raumbezeichnung:					Wohnen					
Norm-Innentemperatur θ_{int}					20 °C					Norm-Außentemperatur $\theta_e = -18$ °C					
Raumlänge (Innenmaß) l_R					5,00 m					Temperatur-Reduktionsfaktor					
Raumbreite (Innenmaß) b_R					4,00 m					(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*) $f_{\Delta\theta,i} = 1,0$					
Raumfläche A_R					20,00 m ²					* NA - Tabelle 12					
Geschosshöhe h_G					2,75 m					Mindest-Luftwechselrate $n_{min} = 0,5$ h ⁻¹					
Deckendicke d					0,25 m										
Raumhöhe h_R					2,50 m										
Raumvolumen V_R					50,00 m ³					Wiederaufheizfaktor $f_{RH} = 0$ W/m ²					
Transmissionswärmeverlust															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
					3 x 4 x 5		6 - 7			9 + 10		8x11x12		13x14	
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitung)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigierter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissionswärmeverlust	
-	-	n	b	h/l	A	A _{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U _C	f _k	H _T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T	
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W	
S	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	1,50	0,10	1,60	1,00	4,80	38	182	
S	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	0,67	0,10	0,77	1,00	6,18	38	235	
W	AF	1	3,50	1,50	5,3		5,3	1,50	0,10	1,40	1,00	7,42	38	282	
W	AW	1	5,00	2,75	13,8	5,3	8,5	0,67	0,10	1,40	1,00	11,90	38	452	
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97	
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,49	0,10	0,59	1,00	11,84	5	59	
Transmissionswärmeverlust												H_T =	110	Φ_T =	1551
Lüftungswärmeverlust $[V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]]$									25,00	Konst.	V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V	
									$C_p \cdot \zeta$	m ³ /h	W/K		W		
Lüftungswärmeverlust HV= (Konst. · V _{min}) und ΦV= [(HV · Δ(θ _{int} -θ _e)]									0,34	25,00	8,50	38	323		
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:					94 W/m ²	37 W/m ³)	Φ_{HLNetto} = f_{Δθ,i} · (Φ_T + Φ_V) =			1874					
Zusatz-Heizlast unterbrochener Heizbetrieb					Φ_{RH} = A_R · f_{RH}		20,00	m ² x	0	W/m ²	0				
Norm-Heizlast												Φ_{HL} =		1874	

Bild 5: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone 2 und Dämmstandard 2002

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831																					
Projekt-Nr.:										Datum:					30.01.2022						
Bauvorhaben Sprind-Studie																					
Raumnr.: 1 - Mitte-S					Raumbezeichnung: Wohnen																
Norm-Innentemperatur					θ_{int}	20 °C					Norm-Außentemperatur					$\theta_e = -$	-18 °C				
Raumlänge (Innenmaß)					l_R	5,00 m					Temperatur-Reduktionsfaktor										
Raumbreite (Innenmaß)					b_R	4,00 m					(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*)					$f_{\Delta\theta,i} =$	1,0				
Raumfläche					A_R	20,00 m ²					* NA - Tabelle 12										
Geschosshöhe					h_G	2,75 m					Mindest-Luftwechselrate					n_{min}	0,5 h ⁻¹				
Deckendicke					d	0,25 m															
Raumhöhe					h_R	2,50 m															
Raumvolumen					V_R	50,00 m ³					Wiederaufheizfaktor					$f_{RH} =$	0 W/m ²				
Transmissionswärmeverlust																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15							
					3 x 4 x 5		6 - 7			9 + 10		8x11x12		13x14							
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitg.)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigerter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissionswärmeverlust							
-	-	n	b	h/l	A	A _{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U_C	f_k	H _T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T							
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W							
N	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	1,30	0,10	1,40	1,00	4,20	38	160							
N	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	0,27	0,10	0,37	1,00	2,97	38	113							
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122							
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122							
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97							
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,34	0,10	0,44	1,00	8,82	5	44							
Transmissionswärmeverlust												H_T =	84	Φ_T =	657						
Lüftungswärmeverlust [$V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]$]								25,00	Konst.	V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V								
								$C_p \cdot \zeta$	m ³ /h	W/K		W									
Lüftungswärmeverlust HV= (Konst: V_{min}) und ΦV= [(HV · $\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$)]								0,34	25,00	8,50	38	323									
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:					49	W/m ²	20	W/m ³)	Φ_{HLNetto} = $f_{\Delta\theta,i} \cdot (\Phi_T + \Phi_V)$ =					980							
Zusatz-Heizlast unterbrochener Heizbetrieb					Φ_{RH} = $A_R \cdot f_{RH}$			20,00	m ² x	0	W/m ²	0									
Norm-Heizlast												Φ_{HL} =	980								

Bild 6: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone1 und Dämmstandard 2016

Norm-Heizlast (vereinfachtes Verfahren) DIN EN 12831															
Projekt-Nr.:					Datum:					30.01.2022					
Bauvorhaben Sprend-Studie															
Raumnr.: 2 - Süd_West			Raumbezeichnung: Wohnen												
Norm-Innentemperatur		θ_{int}	20	°C		Norm-Außentemperatur		$\theta_e = -$	-18	°C					
Raumlänge (Innenmaß)		l_R	5,00	m		Temperatur-Reduktionsfaktor									
Raumbreite (Innenmaß)		b_R	4,00	m		(normal 1,0 // bei 4 K und höher 1,5*) $f_{\Delta\theta,i} =$ 1,0									
Raumfläche		A_R	20,00	m ²		* NA - Tabelle 12									
Geschosshöhe		h_G	2,75	m		Mindest-Luftwechselrate		n_{min}	0,5	h ⁻¹					
Deckendicke		d	0,25	m											
Raumhöhe		h_R	2,50	m											
Raumvolumen		V_R	50,00	m ³		Wiederaufheizfaktor		$f_{RH} =$	0	W/m ²					
Transmissionswärmeverlust															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
					3 x 4 x 5		6 - 7			9 + 10		8x11x12		13x14	
Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite (s. Anleitung)	Höhe/Länge (s. Anleitung)	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	Wärmedurchgangskoeffizient	Korrektur für Wärmebrücken (0,1)	korrigierter Wärmedurchgangskoeffizient	Temperaturkorrekturfaktor	Wärmeverlustkoeffizient	Temperaturdifferenz	Transmissions-Wärmeverlust	
-	-	n	b	h/l	A	A_{Abzug}	A'	U	ΔU_{WB}	U_C	f_k	H_T	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$	Φ_T	
-	-	-	m	m	m ²	-	m ²	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{W}{m^2 K}$	-	W/K	K	W	
S	AF	1	2,00	1,50	3,0		3,0	1,30	0,10	1,40	1,00	4,20	38	160	
S	AW	1	4,00	2,75	11,0	3,0	8,0	0,27	0,10	0,37	1,00	2,97	38	113	
W	AF	1	3,50	1,50	5,3		5,3	1,30	0,10	1,40	1,00	7,42	38	282	
W	AW	1	5,00	2,75	13,8	5,3	8,5	0,27	0,10	1,40	1,00	11,90	38	452	
	IW	1	5,00	2,75	13,8	0,0	13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	5,00	2,75	13,8		13,8	1,67	0,10	1,77	1,00	24,35	5	122	
	IW	1	4,00	2,75	11,0		11,0	1,67	0,10	1,77	1,00	19,48	5	97	
	FB	1	5,00	4,00	20,0		20,0	0,34	0,10	0,44	1,00	8,82	5	44	
Transmissionswärmeverlust												$H_T =$	103	$\Phi_T =$	1392
Lüftungswärmeverlust [$V_{min} = V_R \cdot n_{min} [0,5]$]								25,00	Konst.	V_{min}	H_V	$\Delta(\theta_{int}-\theta_e)$ in K	Φ_V		
								$C_p \cdot \zeta$	m ³ /h	W/K		W			
Lüftungswärmeverlust HV= (Konst.: V_{min}) und $\Phi_V = [(HV \cdot \Delta(\theta_{int}-\theta_e))]$								0,34	25,00	8,50	38	323			
Netto-Heizlast (spezif. Heizlast:				86	W/m ²	34	W/m ³)	$\Phi_{HLNetto} = f_{\Delta\theta,i} \cdot (\Phi_T + \Phi_V) =$				1715			
Zusatz-Heizlast unterbrochener Heizbetrieb								$\Phi_{RH} = A_R \cdot f_{RH}$	20,00	m ² x	0	W/m ²	0		
Norm-Heizlast												$\Phi_{HL} =$	1715		

Bild 7: Heizlastberechnung nach DIN 12831 (vereinfacht) für Zone 2 und Dämmstandard 2016

Die Module decken die gesamte Breite der Heizlasten ab und können daher zu beliebigen Hauptgebäuden zusammengesetzt werden. In Bild 8 sind die Heizlasten nach /DIN EN 12831/ (vereinfachtes Verfahren) je Zone und Wärmedämmstandard zusammenfassend dargestellt.

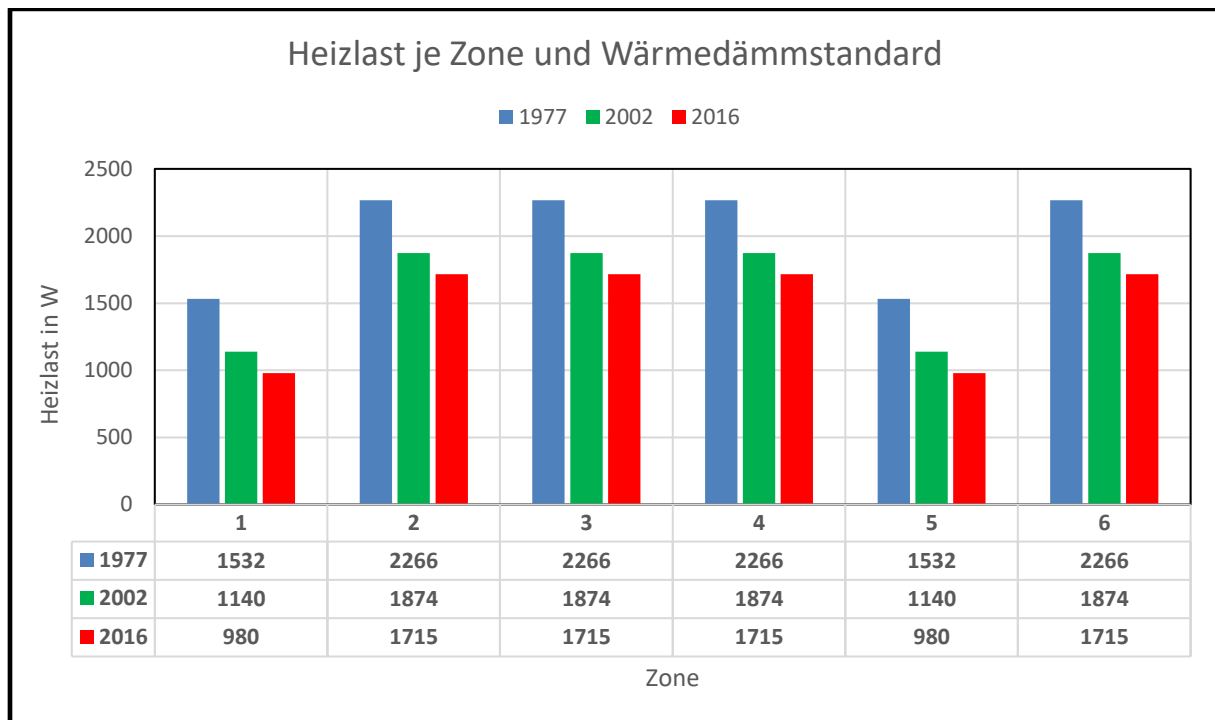


Bild 8: Heizlasten je Zone und Wärmedämmstandard

Es ist aus Bild 8 zu erkennen, dass erwartungsgemäß die Heizlast mit dem Wärmedämmstandard abnimmt.

Weiterhin wurde für alle Varianten eine Simulationsrechnung durchgeführt, wobei die meteorologischen Daten aus dem Testreferenzjahr (/TRY/) benutzt werden, die der gleichen Region entsprechen, die in der Heizlastberechnung verwendet wurde (Potsdam). Als Simulationsprogramm wurde in der vorliegenden Untersuchung /TRNSYS/ (a TraN-sient SYstem Simulation Program) benutzt. Dieses Programm wird entwickelt und vertrieben von der University of Wisconsin – Solar Energy Laboratory. Die Ergebnisse sind hinsichtlich ihrer Modellbildung und den zugehörigen Ergebnissen in großem Umfang international validiert.

Innerhalb von /TRNSYS/ werden neben dem Gebäudemodell, das die jeweiligen Räume beinhaltet, auch die Randbedingungen und die Anlagenkomponenten in Modulen (in der TRYSYS-Nomenklatur Types) erfasst und miteinander gekoppelt. So bilden Ausgangsgrößen eines Types z.B. Eingangsgrößen eines anderen Types. Ausgabetypes und Rechner, die Zwischenrechnungen oder Umrechnungen vornehmen können, gehören ebenso zum gesamten Simulationsmodell. In Bild 9 ist ein Screenshot des gekoppelten Simulationsmodells mit den benötigten Modulen (Types) wiedergegeben. Die Eingabemaske für die globalen Raumdaten (Bauteilgeometrie und Bauteileigenschaften) ist in Bild 10 beispielhaft angegeben. In diesem Eingabebereich werden neben den Raumgeometrien die einzelnen Bauteile bzw. ihre Bauteilschichten detailliert beschrieben.

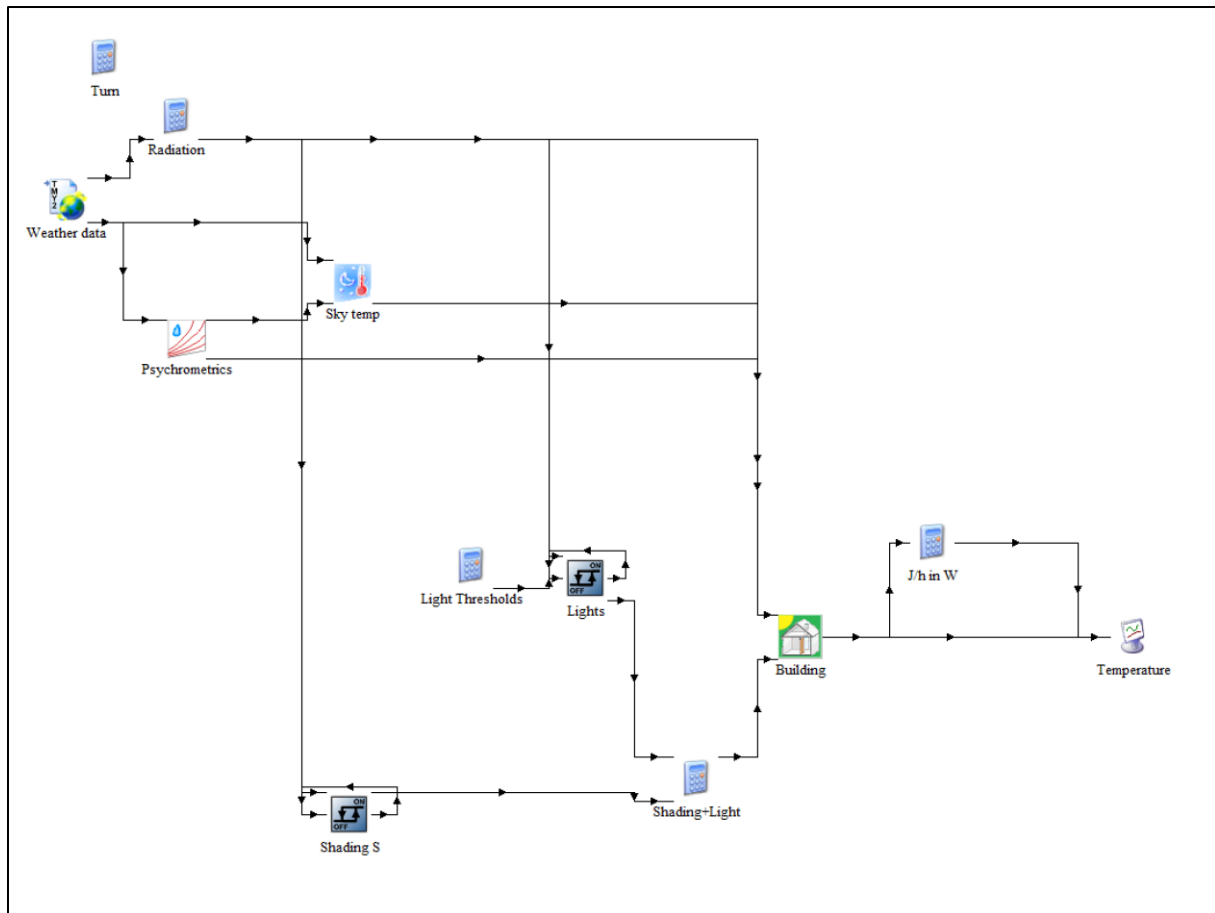


Bild 9: Simulationsmodell TRNSYS

Die benötigten Module sind:

- Wetterdaten zur Eingabe der meteorologischen Daten des Testreferenzjahres (TRY Potsdam)
- Umrechnung der Feuchtwerte der Außenluft
- Umwandlung der solaren Strahlung auf beliebige Flächen
- Bestimmung der Himmelstemperatur
- Berechnung der Lage der Beschattungseinrichtungen
- Bestimmung des Betriebs der Leuchten
- Gebäudedaten für alle Module
- Rechenmodul zur Umwandlung von J in W
- Plotterausgabe zur grafischen Darstellung (auf dem Bildschirm)

Der Verlauf der Temperaturen (Sollwert, Raumtemperatur und Außentemperatur) werden in den gewählten Simulationsschritten (in der Regel 1 Stunde) in Dateien zur weiteren Verwendung ausgegeben. Für Lastberechnungen beträgt die Simulationsschrittweite eine Stunde, bei der Beurteilung von Regelvorgängen 10 Minuten und darunter.

Bei den Varianten der Simulationsrechnungen werden die jahreszeitlichen Maximalwerte der Heizleistung als „quasi-Heizlast“ ausgewiesen. Mit den Wärmequellen aus den Nutzungsprofilen, die nach /DIN V 18599 Blatt 10/ angesetzt werden, werden für alle Varianten jeweils die Nutzenergiebedarfe berechnet.

Bild 10: Eingabemaske der globalen Raumdaten (beispielhaft)

Weiterhin wird die gewünschte Solltemperatur eingegeben, bei der z.B. eine Nacht- und Wochenendabsenkung berücksichtigt werden kann. Für den Monat Januar ist in Bild 11 der Verlauf der Solltemperatur (Raumtemperatur) und der Verlauf der Außentemperatur im Stundenzeitschritt (744 Stunden im Januar) dargestellt. Bei der Solltemperatur erfolgt ein Absenkbetrieb von 20 °C auf 18 °C und eine entsprechende Wochenendabsenkung.

Mit der Festlegung, dass eine unendlich große Heizleistung vorliegt, werden die gewünschten Raumtemperaturen (Sollwerte) immer eingehalten und als Ergebnis erhält man die erforderliche Heizleistung. In Bild 12 ist der jahreszeitliche Verlauf der erforderlichen Heizleistung für das Modul 1 und dem Wärmedämmstandard ausgewiesen. Das gleichartige Ergebnis erhält man für jedes Modul und für den jeweiligen Wärmedämmstandard. Der Maximalwert aus dem Verlauf der Heizleistung stellt die quasi-Heizlast dar. Zur besseren Übersicht und zum Vergleich sind in Bild 13 die Heizlastverläufe für den Januar der verschiedenen Wärmedämmstandards angegeben. Die generelle Tendenz, wonach die Heizlasten mit der Erhöhung der Wärmedämmstandards abnehmen ist ebenso zu erkennen.

Die Zusammenfassung der mit Hilfe der Simulationsrechnungen bestimmten Heizlasten ist in Bild 14 dargestellt.

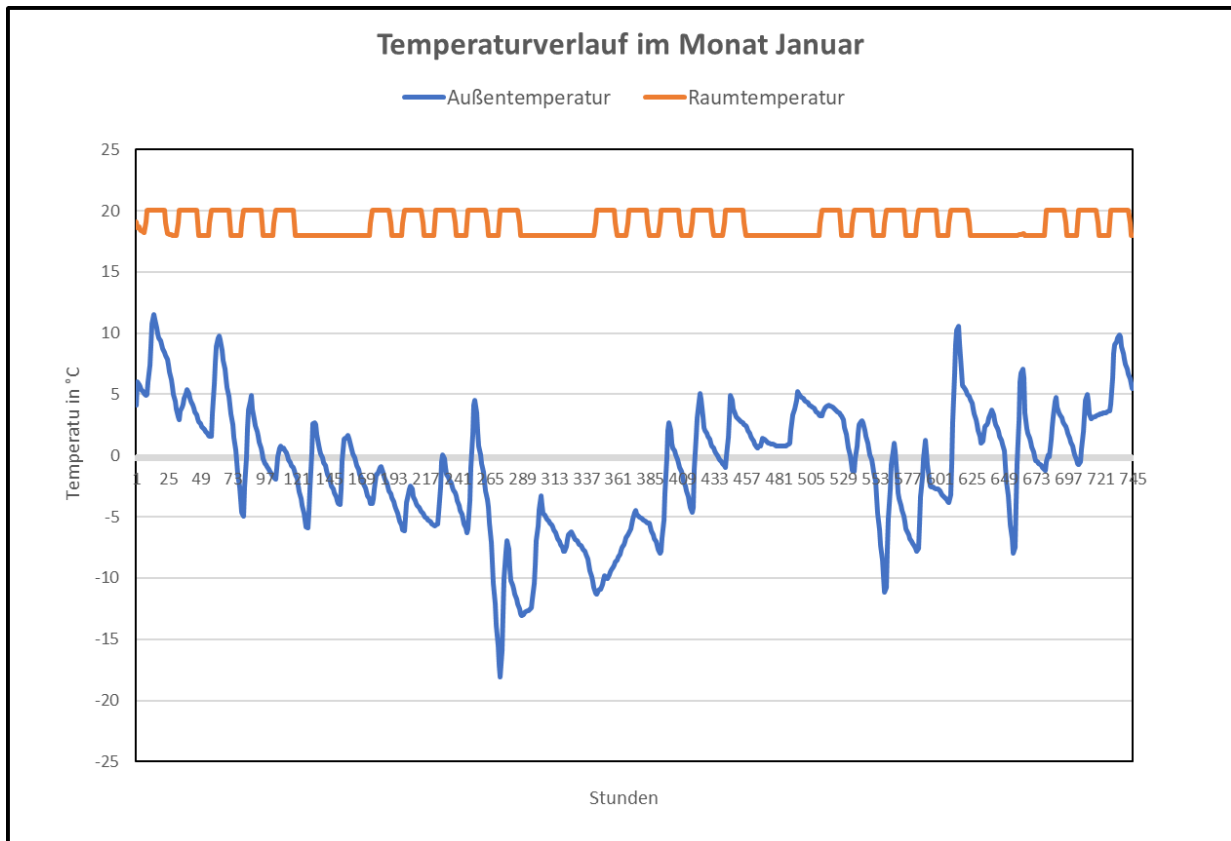


Bild 11: Temperaturverlauf der Raum-Solltemperatur und der Außentemperatur

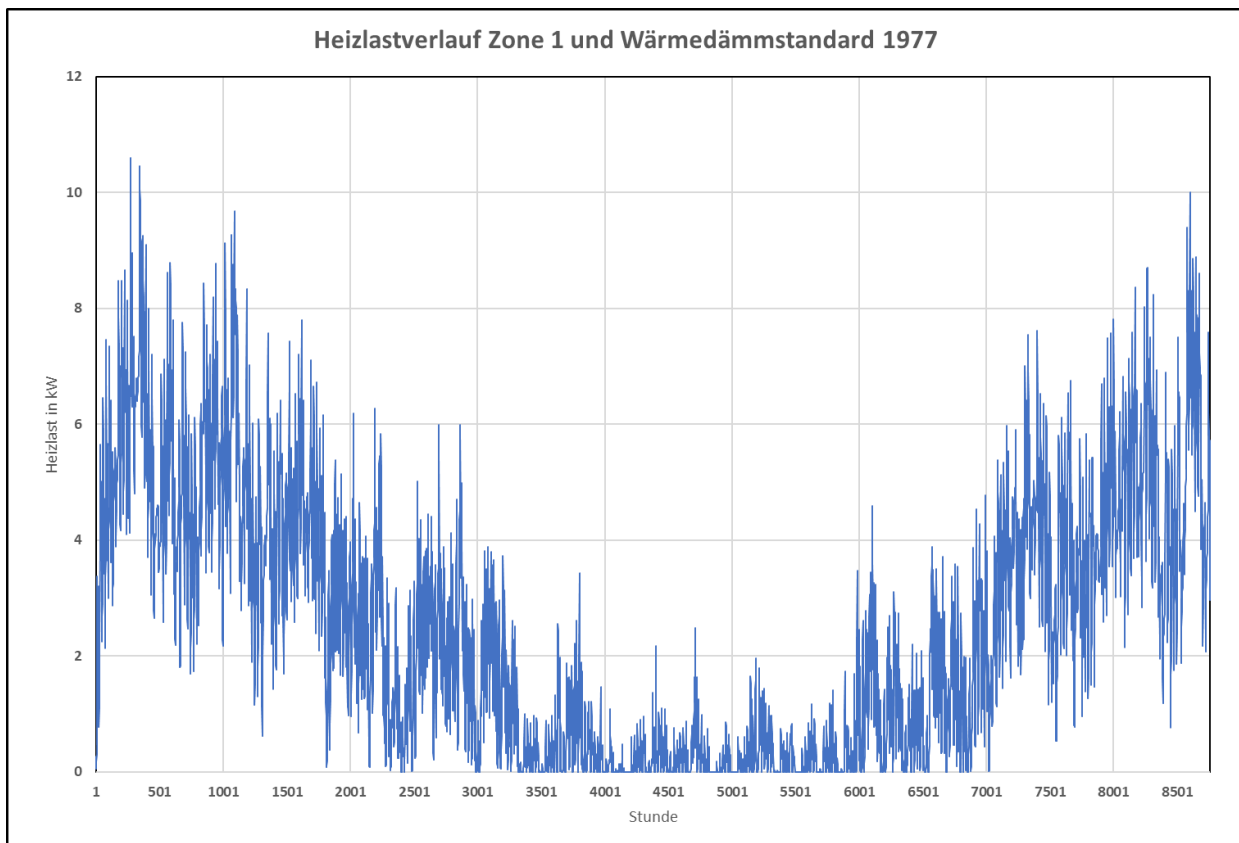


Bild 12: Heizlastverlauf Zone 1 – Wärmedämmstandard 1977

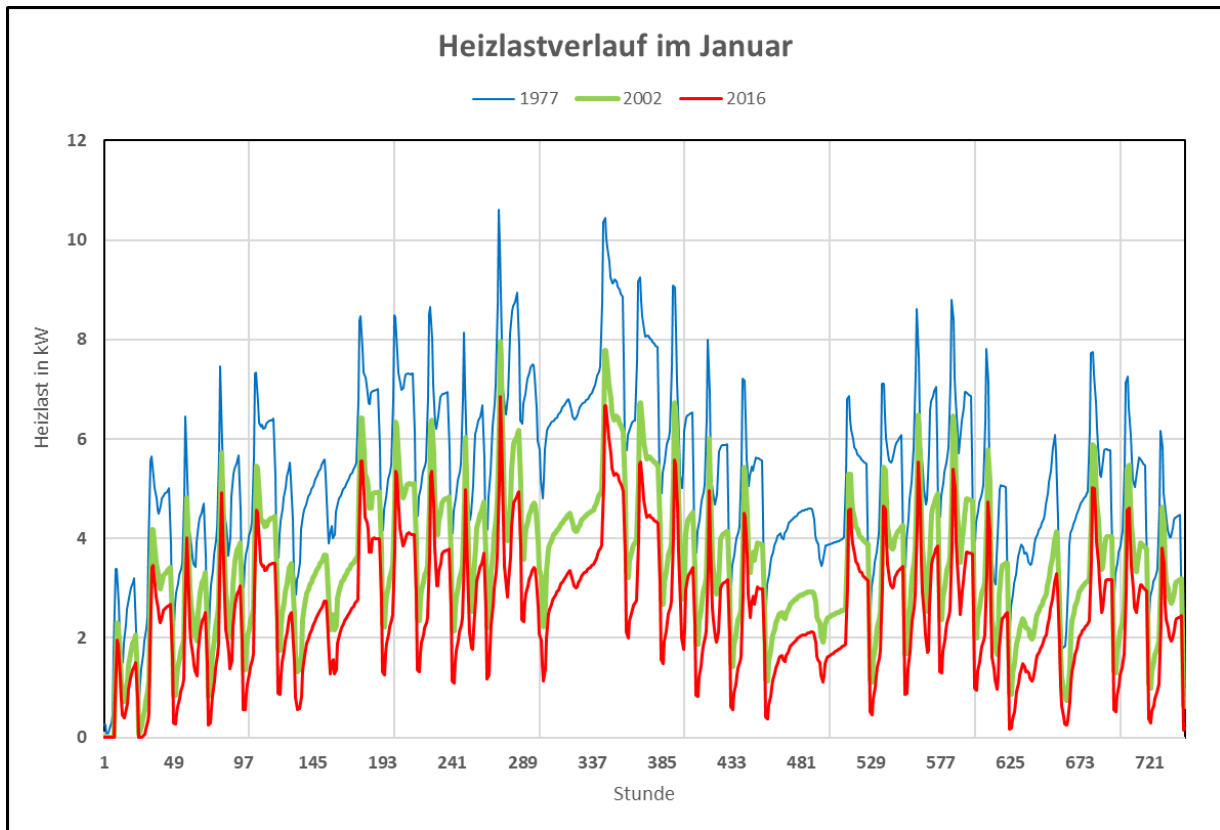


Bild 13: Heizlastverlauf für Zone 1 bei verschiedenem Wärmedämmstandard

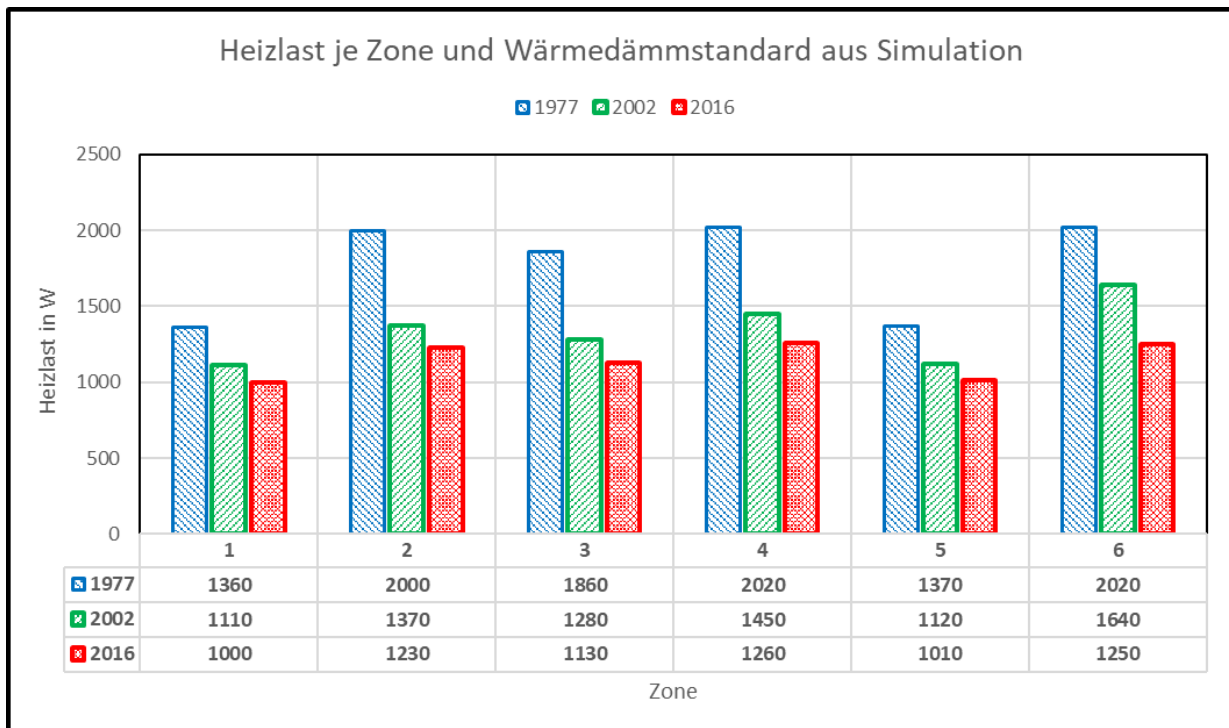


Bild 14: Heizlasten je Zone und Wärmedämmstandard aus Simulation

Die Heizlasten je Zone und Wärmedämmstandard sind in Bild 15 zusammenfassend für die Heizlastberechnung nach /DIN EN 12831/ (vereinfacht) und aus den Simulationsrechnungen zusammengestellt. Bis auf Zone 1 sind die Heizlasten aus den Simulationsberechnungen kleiner als die aus der Heizlastberechnung nach /DIN EN 12831/ (vereinfacht). Da in den Simulationsrechnungen auch die solare Einstrahlung berücksichtigt wird, ist der geringere Wert der Heizlast leicht erklärbar, weil die nach Süden orientierte Wandfläche im Verhältnis zur Fensterfläche klein ist.

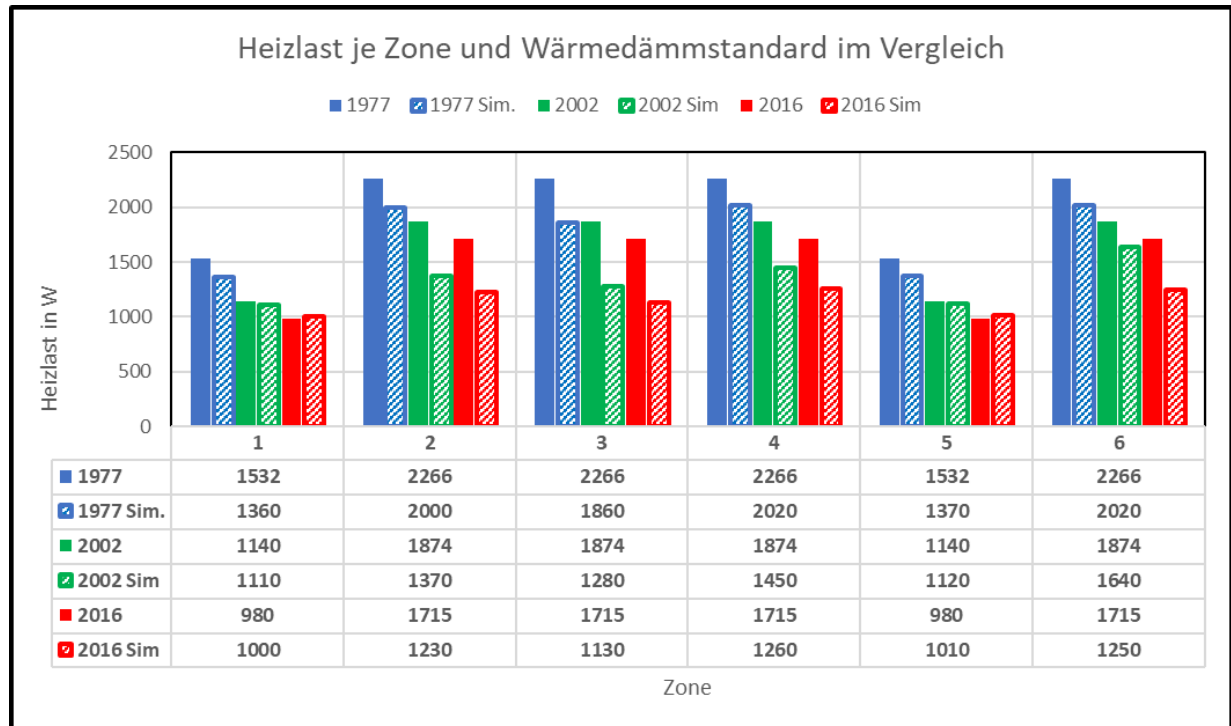


Bild 15: Heizlast je Zone und Wärmedämmstandard im Vergleich Heizlastberechnung zu Simulationsrechnung

Der Jahresheizenergiebedarf ist mit den Simulationsrechnungen für jede Zone und für das Gesamtmodell für den jeweiligen Wärmedämmstandard berechnet worden. Der monatliche Heizenergiebedarf ist für die drei Wärmedämmstandards in Bild 16 dargestellt. Auch hier ist erkennbar, dass der Heizenergiebedarf mit steigendem Wärmedämmstandard abnimmt.

In Bild 17 ist der monatliche Heizenergiebedarf je Zone (1,2,3) für Wärmedämmstandard 1977 aufgetragen. Aus dieser Darstellung lassen sich die Unterschiede der Modulanzordnungen erkennen. Da sich die Darstellungen für die weiteren Dämmstandards und Module ähneln, sind die weiteren Grafiken nicht mehr dargestellt.

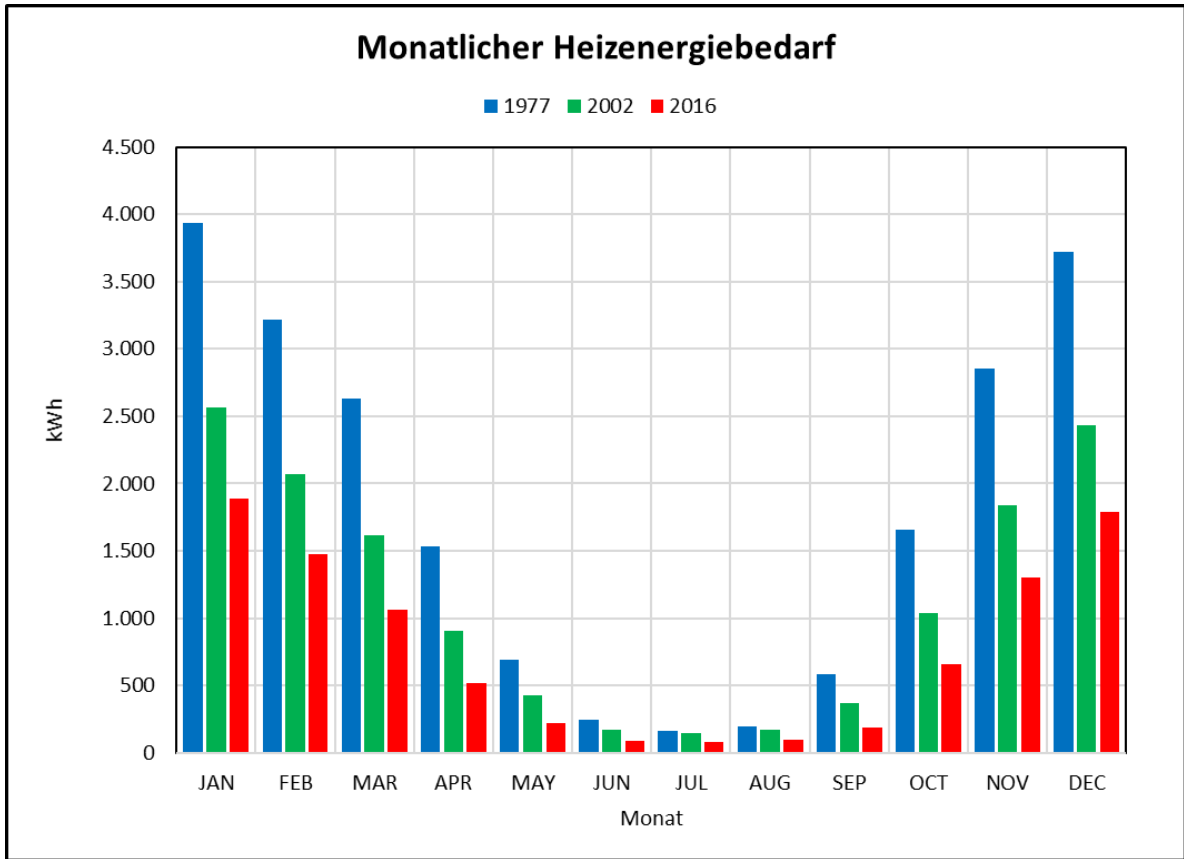


Bild 16: Heizenergiebedarf je Monat und Zone

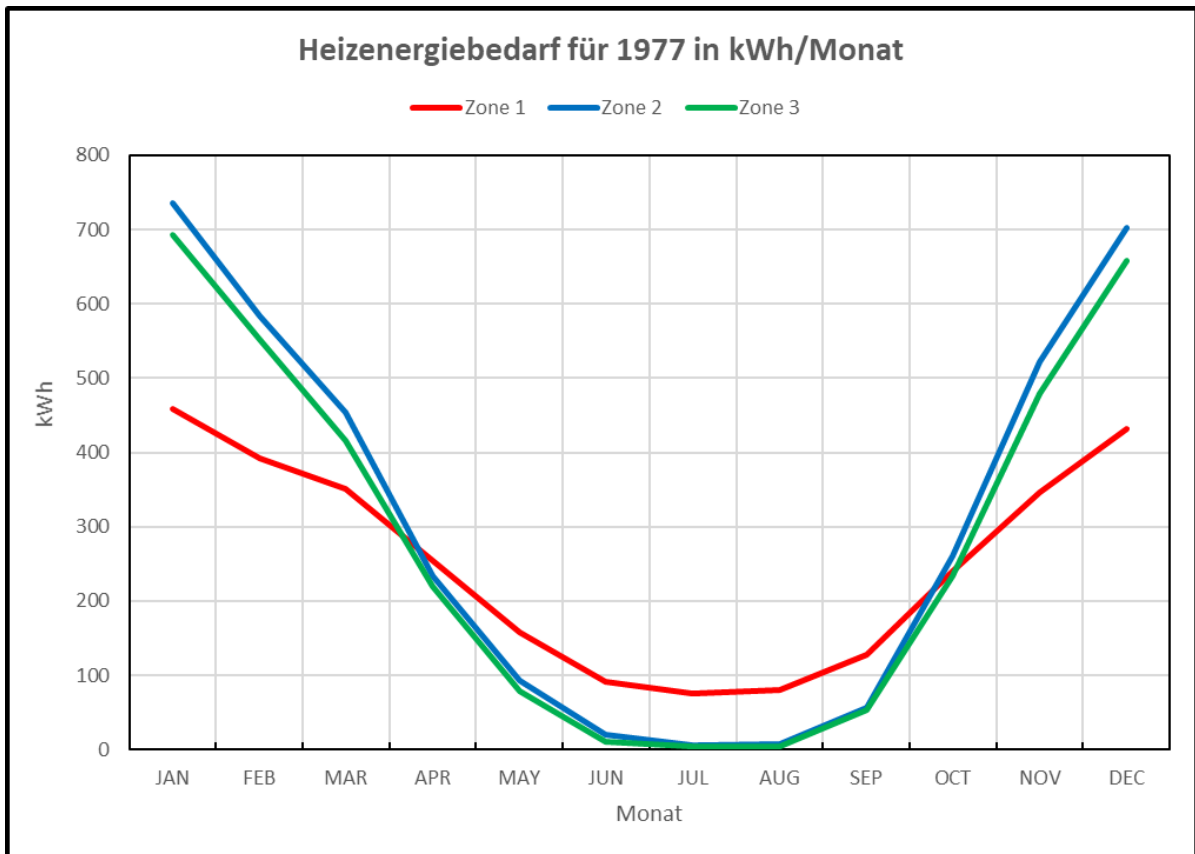


Bild 17: Monatlicher Heizenergiebedarf je Zone für Wärmedämmstandard 1977

2.1.2 AP 2: Modellierung der Standard Fußbodenheizung mit Drosselregelung

Im zweiten Arbeitspaket ist ein allgemeines Fußbodenheizungsmodell abgeleitet, das in Abhängigkeit des Fußbodenaufbaus, des Verlegeabstands der Heizrohrleitungen und der Vorlauftemperatur die Wärmeabgabeleistung und die Fußboden-Oberflächentemperaturen liefert. Das innerhalb des Trmys-Types 56 – Multizone – enthaltende Modell zur Abbildung einer Fußbodenheizung unterliegt insbesondere der Beschränkung eines unteren Massenstroms.

Daher wurde ein eigenes Modell entwickelt, das als Eingabe in das Multizonen-Modell die Wärmeabgabe und die Oberflächentemperatur vorsieht.

Das Modell basiert auf der Auslegungsmethodik nach /DIN EN 1264-2/. Für jeden Verlegeabstand, das verwendete Rohr und den jeweiligen Bodenaufbau kann ein äquivalenter Wärmedurchgangswiderstand K_H gebildet werden (siehe auch Bild 18).

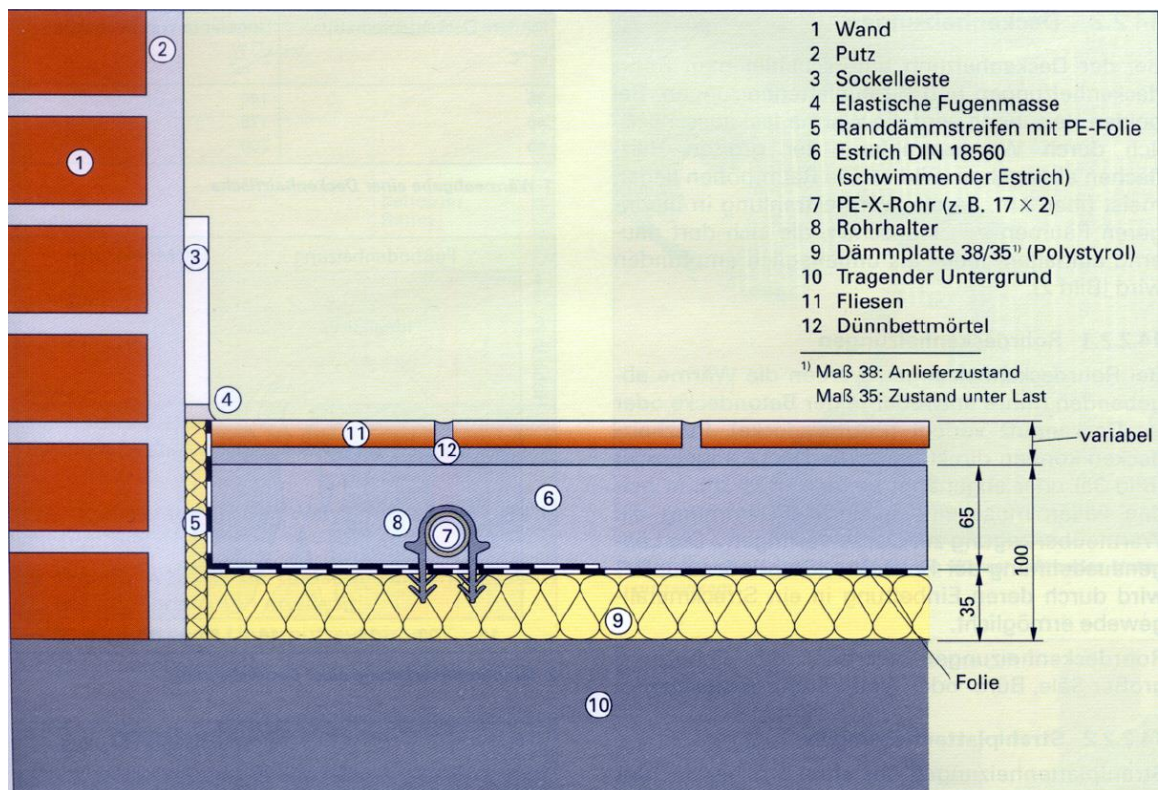


Bild 18: Klassischer Aufbau eines Fußbodens im Nasssystem – hierfür gilt ein Wert k_H

Durch Veränderung dieses Wärmedurchgangswiderstands können die unterschiedlichen Einflüsse von Oberbodenbelägen usw. abgebildet werden. Die Wärmeabgabe der Fußbodenheizung beträgt mit der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz:

$$q_{ist} = K_H \cdot \Delta \vartheta_H \quad (1)$$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ergibt sich aus Raumtemperatur und den Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizmediums:

$$\Delta \vartheta_H = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}} \quad (2)$$

Da die Fußbodenheizung zu jedem Zeitpunkt die Heizlast decken muss, entspricht die momentane Heizleistung der momentanen Heizlast, so dass sich flächenbezogen ergibt:

$$q_{ist} = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Die Wärmeabgabe nach unten kann vereinfacht mit 15 % der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung an den Raum angenommen werden, so dass die flächenbezogene Wärmeleistung insgesamt beträgt:

$$q_{FBH} = \frac{1,15 \cdot \Phi}{A} \quad (4)$$

Die erforderliche mittlere Temperaturdifferenz für die Fußbodenheizung beträgt dann:

$$\Delta \vartheta_{FBH} = \frac{q_{FBH}}{K_H} \quad (5)$$

Mit der Temperaturspreizung σ zwischen Vor- und Rücklauf kann die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur beschrieben werden:

$$\Delta \vartheta_{FBH} = \frac{\vartheta_V - (\vartheta_V - \sigma)}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{(\vartheta_V - \sigma) - \vartheta_i}} \quad (6)$$

Aus der erforderlichen mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz kann daher die erforderliche Vorlauftemperatur berechnet werden.

Mit den erforderlichen momentanen Wärmeabgabe der Fußbodenheizung kann dann die momentane Oberflächentemperatur der Fußbodenheizung bestimmt werden:

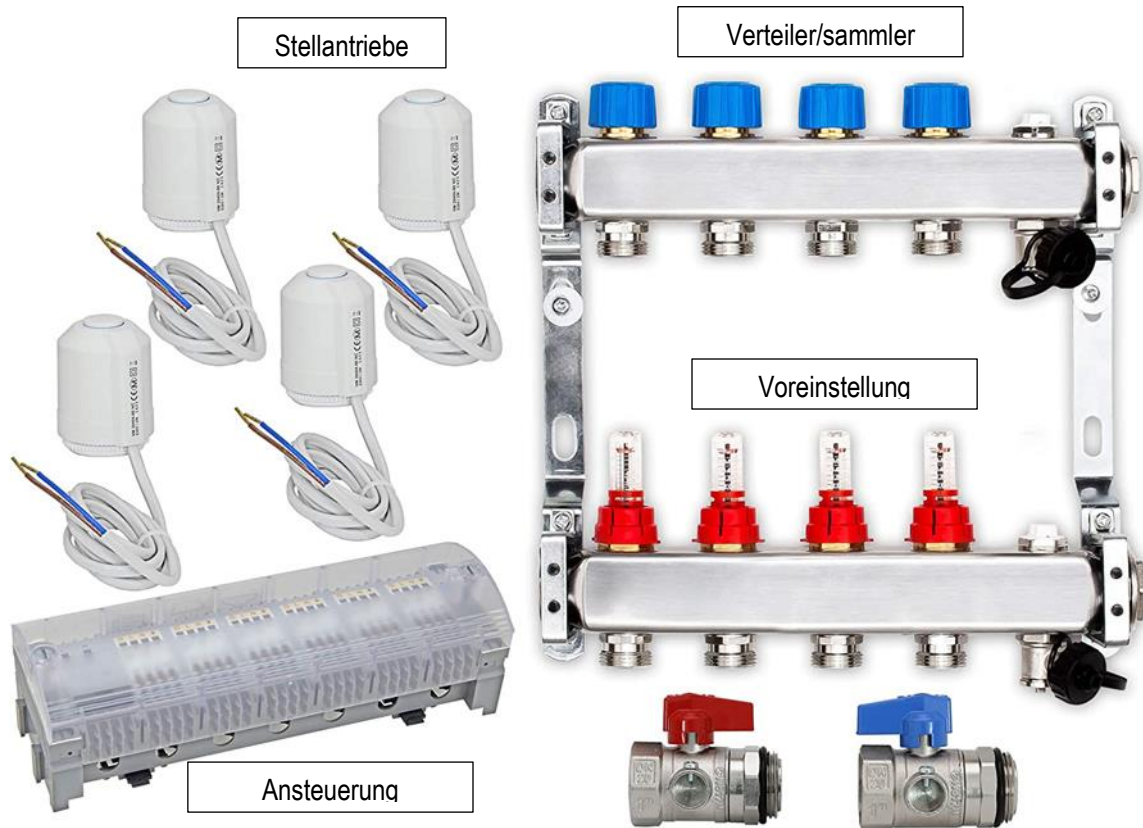
$$\vartheta_{FB,o} = \vartheta_i + \left(\frac{q_{FBH}}{8,92} \right)^{\frac{1}{1,1}} \quad (7)$$

Bei Standard-Regelungen wird zur Leistungsanpassung der Massenstrom gedrosselt, so dass sich die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur in Abhängigkeit dessen ergibt:

$$\sigma_{mom} = \frac{q_{FBH} \cdot A}{c_p \cdot \dot{m}_{mom}} \quad (8)$$

Die einzelnen Bauteile einer Drosselregelung sind in Bild 19 dargestellt.

Es wird bereits aus Gl. (8) deutlich, dass durch die Drosselung des Massenstroms die Spreizung größer wird und damit an physikalische Grenzen stößt, weil die Rücklauftemperatur nicht unter die Raumtemperatur absenken kann. Damit wird ein bestimmungsgemäßer Betrieb bei Drosselregelung nicht mehr möglich.



Zur Bestimmung des Energieaufwand ist es erforderlich den Temperaturverlauf der Fußboden-Oberflächentemperatur bei Abschalten des Massenstroms und bei Einschalten des Massenstroms zu berechnen. Die Abkühl- und Aufheizkurven ergeben sich in Abhängigkeit der Speicherfähigkeit des Fußbodens und der Wärmeübergangszahl an der Fußbodenoberfläche. Für das Auskühlen gilt:

$$\vartheta_{FB} = \vartheta_i + (\vartheta_{FB,a} - \vartheta_i) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot t} \quad (9)$$

Für das Anheizen gilt analog:

$$\vartheta_{FB} = \vartheta_i + (\vartheta_{FB,a} - \vartheta_i) \cdot e^{+\frac{\alpha \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot t} \quad (10)$$

Für einen Raum mit 20 m² Grundfläche sind die Auskühl- und Anheizkurven in den Bildern 18 und 19 beispielhaft ausgehend von einer Oberflächentemperatur von 26 °C bzw. 20,5 °C dargestellt.

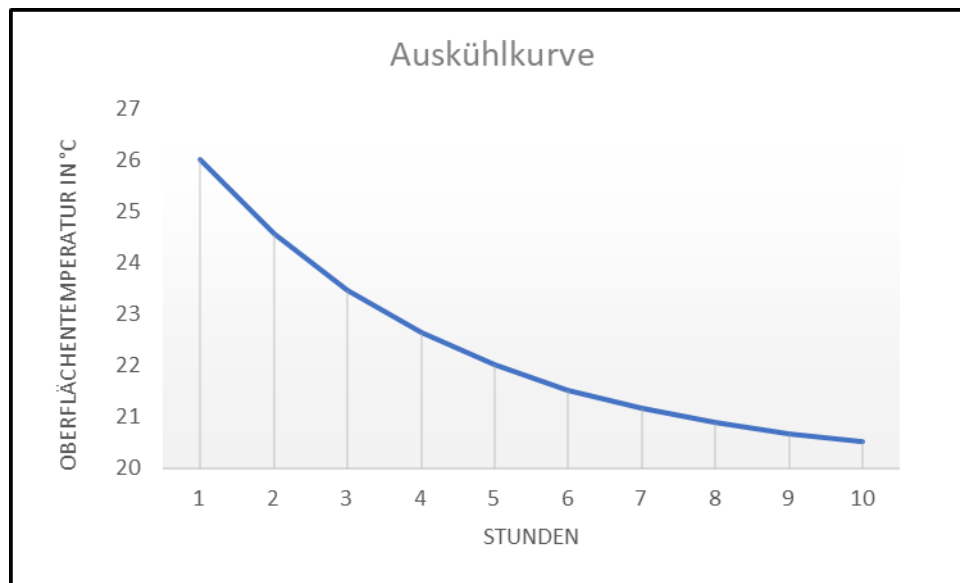


Bild 18: Auskühlkurve (beispielhaft)

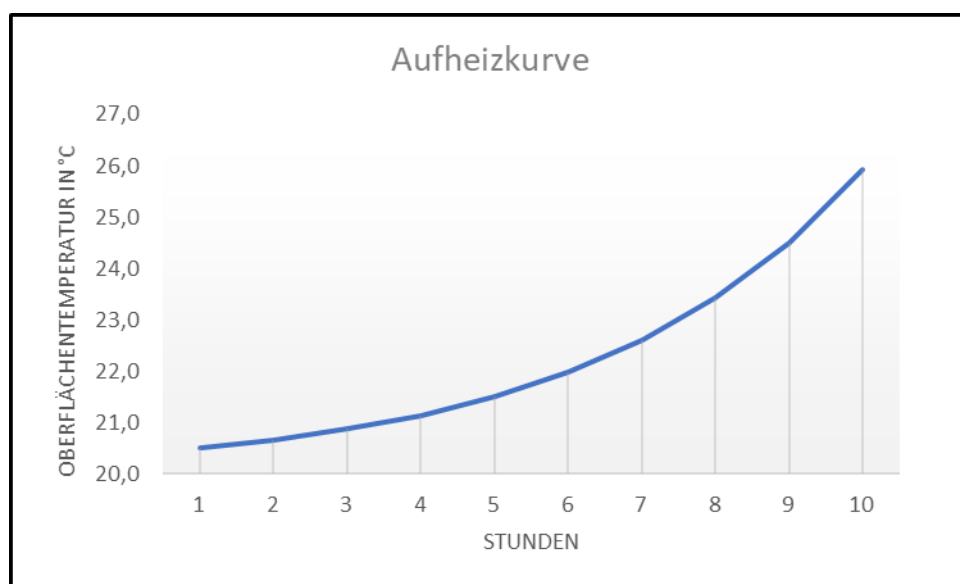


Bild 19: Aufheizkurve (beispielhaft)

Nach der Entwicklung der Zusammenhänge wurden diese in einem Rechenmodul zusammengefasst und befinden sich derzeit in der Überprüfung und Einbindung in die Simulationsumgebung.

Durch Integration des Fußbodenheizungsmodells in die Simulationsumgebung kann eine gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulationsrechnung durchgeführt werden. Dabei wird durch die Simulationsschrittweite der jahreszeitliche Verlauf der Heizwasserströme berechnet und mit den nominellen (=Auslegungs-) Heizwasserströmen in Relation gesetzt. Die operative Raumtemperatur wird für die Ansteuerung der Stellantriebe (als 2-Punkt-Regler) herangezogen. Durch die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Heizmittelströme und der sich hieraus einstellenden operativen Raumtemperaturen kann die „Trägheit“ beurteilt werden. Durch die stündlich

berechnete Wärmeleistung, die saldiert wird, kann jeweils der Energieaufwand bestimmt und zum Energiebedarf ins Verhältnis gesetzt werden.

Für ausgewählte Varianten wird ein Schnellaufheizbetrieb (Boost-Funktion) berechnet. Für weitere ausgewählte Varianten werden Vergleichsrechnungen bei nicht nominellen Heizwasserströmen (kein hydraulischer Abgleich) durchgeführt.

Der Strahlungsaustausch zwischen Fußbodenheizungsfläche und den Umgebungsflächen wird im Simulationsmodell berücksichtigt.

2.1.3 AP 3: Beschreibung und Modellierung der Fußbodenheizung mit Beimischregelung

Wesentliches Merkmal der Beimischregelung ist, dass die Regulierung der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung kontinuierlich und durch Anpassung der Heizmedientemperatur erfolgt. Ohne weiteren Nachweis ist sofort plausibel, dass durch den durchgehenden Betrieb während der Heizzeit gleichmäßige Oberflächentemperaturen über die gesamte Fußbodenfläche erreicht werden.

Anders als bei der Standard-Auslegung einer Fußbodenheizung wird die maximal erforderliche Vorlauftemperatur nicht als Maximum aus den einzelnen Heizkreisen gebildet, sondern es wird die maximal erforderliche Vorlauftemperatur je Raum bestimmt und als Auslegungskenngröße für jeden Raum herangezogen.

Ausgehend von der Heizlast eines Raumes Φ_n , der zugrunde gelegten Raum-Solltemperatur ϑ_i und der tiefsten Außentemperatur kann mit der Fußbodenheizfläche A_{FB} zunächst die flächenbezogene Heizlast bestimmt werden, wobei die Wärmeabgabe vom Fußboden nach unten vereinfacht mit 15 % mit hinreichender Genauigkeit berücksichtigt werden kann:

$$\varphi_n = \frac{\Phi_n \cdot 1,15}{A_{FB}} \quad (11)$$

Mit der Vorgabe einer Massenstrom-Temperaturdifferenz ergibt sich der Heizwasser-Massenstrom je Heizkreis:

$$\dot{m} = \frac{\varphi_n \cdot A_{FB}}{\Delta \vartheta_{HK} \cdot c \cdot \rho} = \frac{\varphi_n \cdot A_{FB}}{\Delta \vartheta_{HK} \cdot 1,163} \quad (12)$$

Dabei kann die Massenstrom-Temperaturdifferenz im Auslegungsfall mit 10 K angenommen werden. Die in diesem Temperaturbereich als konstant anzusehenden Werte für die spezifische Wärmekapazität c und die Dichte ρ ergeben die Konstante 1,163 Wh/K.

Mit der Kenngröße k_H für den Fußbodenaufbau, das Rohmaterial und den Rohrabstand nach /DIN EN 1264-2/, die von jedem Hersteller für das eigene Produkt festgelegt wird, kann dann die erforderliche Vorlauftemperatur zur Deckung der Heizlast bestimmt werden. Diese Vorlauftemperatur soll nicht nur für den Auslegungsfall, sondern auch für den Teillastbetrieb herangezogen werden. Daher ist die Einführung eines Faktors für die Beschreibung der Teillast sinnvoll. Die Teillast kann aus den Temperaturdifferenzen hergeleitet werden:

$$\beta_a = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{akt}}{\vartheta_i - \vartheta_a} \quad (13)$$

Dabei ist ϑ_{akt} die aktuelle, momentane Außentemperatur. Die momentane Heizlast in Abhängigkeit der Außentemperatur ergibt sich dann zu:

$$\varphi_{akt} = \varphi_n \cdot \beta_a \quad (14)$$

Die Heizlast eines Raumes ist zwar in erster Linie abhängig von der Außentemperatur, wird jedoch durch innere Wärmequellen (solare Einstrahlung, Personen- und Geräthewärmeabgabe) beeinflusst. Die inneren Wärmequellen führen zu einer Erhöhung der Raumtemperatur. Es ist demgemäß sinnvoll den Einfluss der Raumtemperatur über einen weiteren Teillastfaktor zu erfassen. Dieser kann durch das einfache Temperaturverhältnis zwischen Raumsoll- und Raumisttemperatur berücksichtigt werden:

$$\beta_{RT} = \frac{\vartheta_i}{\vartheta_{ist}} \quad (15)$$

Die gesamte Berücksichtigung der Teillastverhältnisse ergibt sich durch Multiplikation der Teillastfaktoren:

$$\beta_0 = \beta_a \cdot \beta_{RT} \quad (16)$$

Die momentane Heizlast kann daher einfach beschrieben werden:

$$\varphi_{akt} = \varphi_n \cdot \beta_0 \quad (17)$$

Die aktuelle Temperaturdifferenz beträgt für die momentane Heizlast bei konstantem Heizwasserstrom:

$$\Delta \vartheta_{HK, mom} = \frac{\varphi_{akt}}{\dot{m} \cdot 1,163} \quad (18)$$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zur Deckung der aktuellen Heizlast beträgt mit der Kenngröße k_H

$$\Delta \vartheta_{ln, FBH} = \frac{\varphi_{akt}}{k_H} \quad (19)$$

Mit der bekannten Heizwasser-Temperaturdifferenz ergibt sich die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz:

$$\Delta \vartheta_{\ln,FBH} = \frac{\vartheta_V - (\vartheta_V - \Delta \vartheta_{HK,mom})}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{(\vartheta_V - \Delta \vartheta_{HK,mom}) - \vartheta_i}} \quad (20)$$

Daraus kann die erforderliche Vorlauftemperatur in zwei Schritten berechnet werden (der Heizflächenexponent beträgt $n = 1,1$):

$$K = \exp \left(\frac{\Delta \vartheta_{HK,mom}}{\Delta \vartheta_{\ln,FBH}} \cdot \beta_0^{\left(\frac{n-1}{1} \right)} \right) \quad (21)$$

$$\vartheta_V = \vartheta_i - \beta_0 \cdot \Delta \vartheta_{HK} \cdot \left(\frac{K}{1 - K} \right) \quad (22)$$

Mit Erfassung der Außentemperatur kann nach dem vorstehenden Modell bereits die grundlegende Anpassung der Vorlauftemperatur erfolgen, was den größten Einfluss besitzt. Mit der weiteren Erfassung der Raumtemperatur und der damit erfolgenden Korrektur kann die Vorlauftemperatur bereits während der Temperaturänderung angepasst werden. Wenn die gemessene Raumtemperatur die endgültige, geregelte Anpassung der Vorlauftemperatur vornimmt, ist eine Raumtemperaturregelung mit geringstem Energieaufwand möglich.

2.1.4 AP 3: Energetische Bewertung von Fußbodenheizungen

Mit der Einführung der Verfahren zur energetischen Bewertung von Heizanlagen (siehe /VDI 2067-10/, /DIN V 4701-10/ und /DIN V 18599-1-12/) erfolgt die Berechnung in Richtung der Bedarfsentwicklung, die entgegen dem Energiefluss auftritt. Die einzelnen Prozessbereiche sind Wärmeübergabe, Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung (siehe Bild 20).

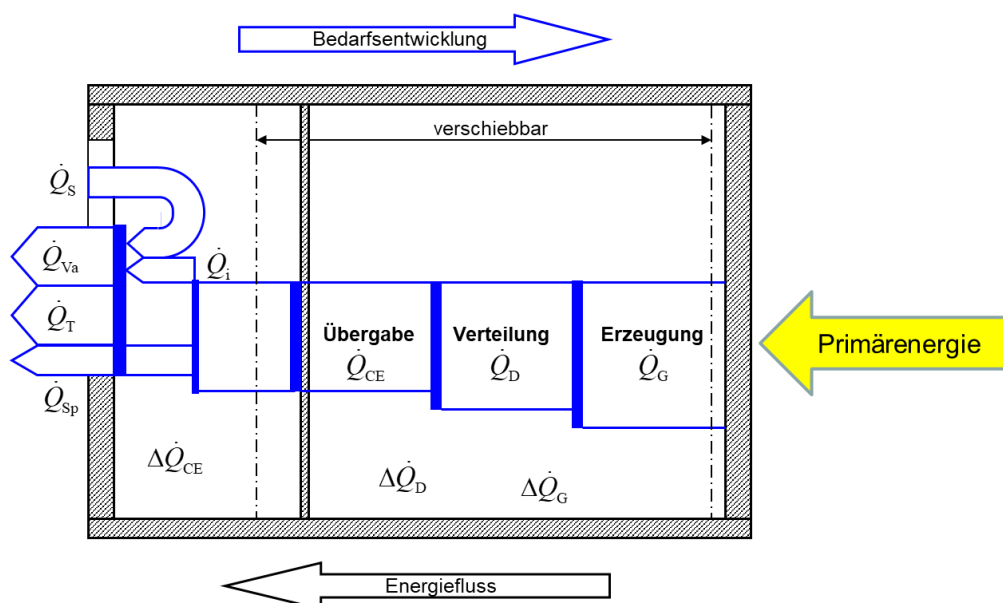


Bild 20: Energetische Bewertung von Heizanlagen in Richtung der Bedarfsentwicklung

Der Bedarf der Wärmeübergabe ist der Jahres-Heizenergiebedarf Q_h , der der Saldierung der Heizlasten über ein ganzes Jahr entspricht. Dem steht der Energieaufwand der Wärmeübergabe gegenüber, der bei Fußbodenheizungen durch Anpassungsmöglichkeiten von Regelung und Wärmeübertragung charakterisiert ist. Da die energetische Bewertung in Richtung der Bedarfsentwicklung erfolgt, wird der Energieaufwand der Wärmeübergabe ins Verhältnis zum Energiebedarf gesetzt. Dieses Verhältnis wird als Aufwandszahl bezeichnet:

$$e_{CE} = \frac{Q_{CE}}{Q_h} = \frac{Q_h + \Delta Q_{CE}}{Q_h} = 1 + \frac{\Delta Q_{CE}}{Q_h} \quad (23)$$

Dabei steht der Index CE für Control + Emission.

Daraus ergibt sich, dass der Energieaufwand für die Wärmeübergabe einer Fußbodenheizung durch den Mehraufwand gegenüber dem Bedarf zu bestimmen ist. Würde der Energieaufwand der Wärmeübergabe dem Energiebedarf entsprechen, würde die Aufwandszahl $e_{CE} = 1$ betragen.

In der Simulationsumgebung wurde die Rohrverlegung der Fußbodenheizung unverändert belassen. Bei der Standard-Massenstromregelung wurde ein üblicher 2-Punkt-Stellantrieb angenommen, der keine Zwischenstellung erlaubt, sondern nur bei Überschreiten des oberen Raumtemperaturbands schließt und bei Unterschreiten wieder öffnet. Soweit innenliegende, angrenzende Räume an andere Wohnungen im Geschosswohnungsbau dazu führen, dass eine deutliche Überversorgung aufgrund hoher Heizlasten auftritt, sinkt die Regelfähigkeit bei der Drosselregelung deutlich, weil die im Normalbetrieb erforderlichen, geringeren Massenströme nicht realisiert werden können. Die Stellantriebe öffnen und schließen daher in höherer Frequenz. Es findet ein permanentes Anheizen und Auskühlen statt.

Bei der Drosselregelung wurde die Vorlauftemperatur zentral in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt. Wie in der Praxis übliche, wurde die maximale Vorlauftemperatur in der Wärmeverteilung um ca. 3 K höher als die erforderliche Vorlauftemperatur im ungünstigsten Heizkreis gewählt. Bei heute vermehrt eingesetzten Wohnungsstationen im Geschosswohnungsbau wird wegen der ganzjährigen Trinkwassererwärmung oftmals auf die zentrale Vorlauftemperatur verzichtet. Dann wird der Energieaufwand noch größer.

Für weitere Betriebsweisen wurde ein Absenkbetrieb berücksichtigt, ebenso wie das Fehlen des hydraulischen Abgleichs, der Heizwasser-Massenströme realisiert, die in den pumpennahen Heizkreisen zu einer quasi-Überversorgung führen.

Bei der Beimischregelung wurden die unter Ziffer 2.1.3 beschriebenen Algorithmen implementiert und die gleichen Betriebsweisen simuliert.

Der Energieaufwand der Wärmeübergabe verhält sich proportional zum Energiebedarf, so dass die Aufwandszahlen für die verschiedenen Wärmedämmstandards nahezu gleichbleiben. Die Aufwandszahlen sind per Definition relative Zahlen. Insoweit konnten die verschiedenen Ergebnisse weitgehend zusammengefasst werden.

2.1.5 AP 3: Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Nachfolgend sind einige wesentliche Ergebnisse aus den Vergleichsrechnungen zwischen Beimisch- und Drosselregelung dargestellt. In Bild 21 ist die Heizlast in der Winterzeit an einem Tag beispielhaft dargestellt. Um den Verlauf einfacher visuell bewerten zu können, sind die Heizlasten negativ aufgetragen. In Bild 22 ist der Verlauf der Außentemperatur zur gleichen Zeit dargestellt.

Durch Vergleich der Bilder 21 und 22 wird deutlich, dass der Heizlastverlauf im Wesentlichen dem Verlauf der Außentemperatur folgt. Dabei ist die Heizlast unter Berücksichtigung der inneren Wärmequellen berechnet. Hieraus leitet sich ab, dass die Heizkreisvorlauftemperatur in dominanter Weise von der Außentemperatur abhängt. Bei unterschiedlicher Heizlast verschiedener Räume ist demnach ein unterschiedlicher Verlauf der Heizkreis-Vorlauftemperatur erforderlich.

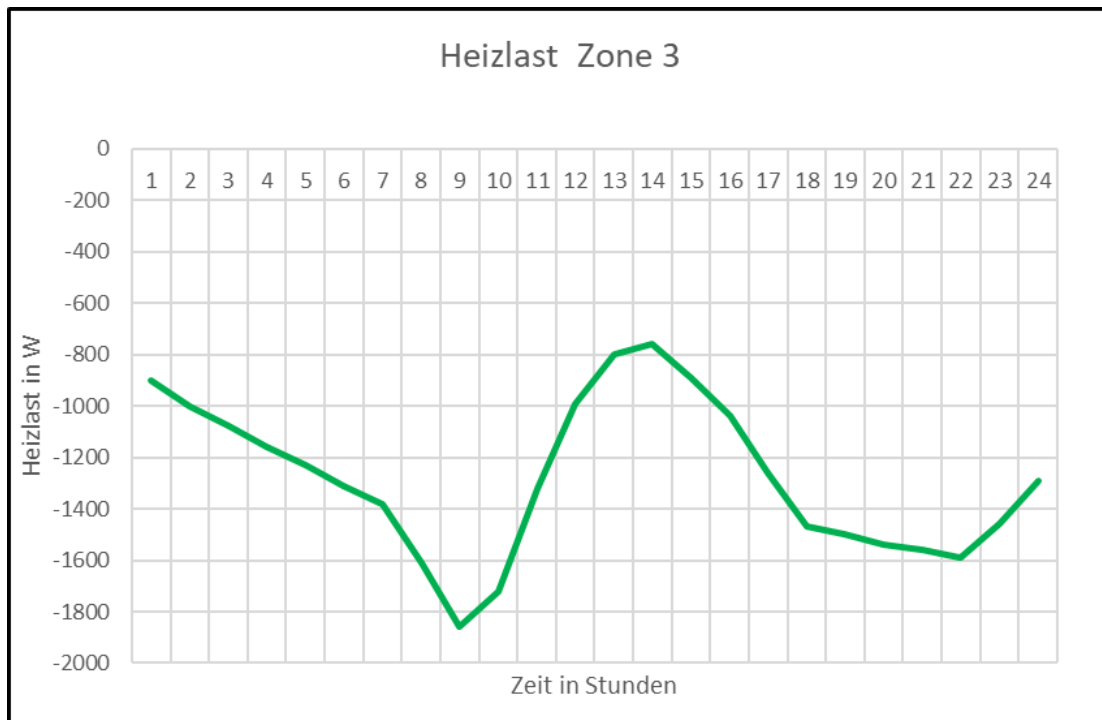


Bild 21: Heizlastverlauf an einem Wintertag

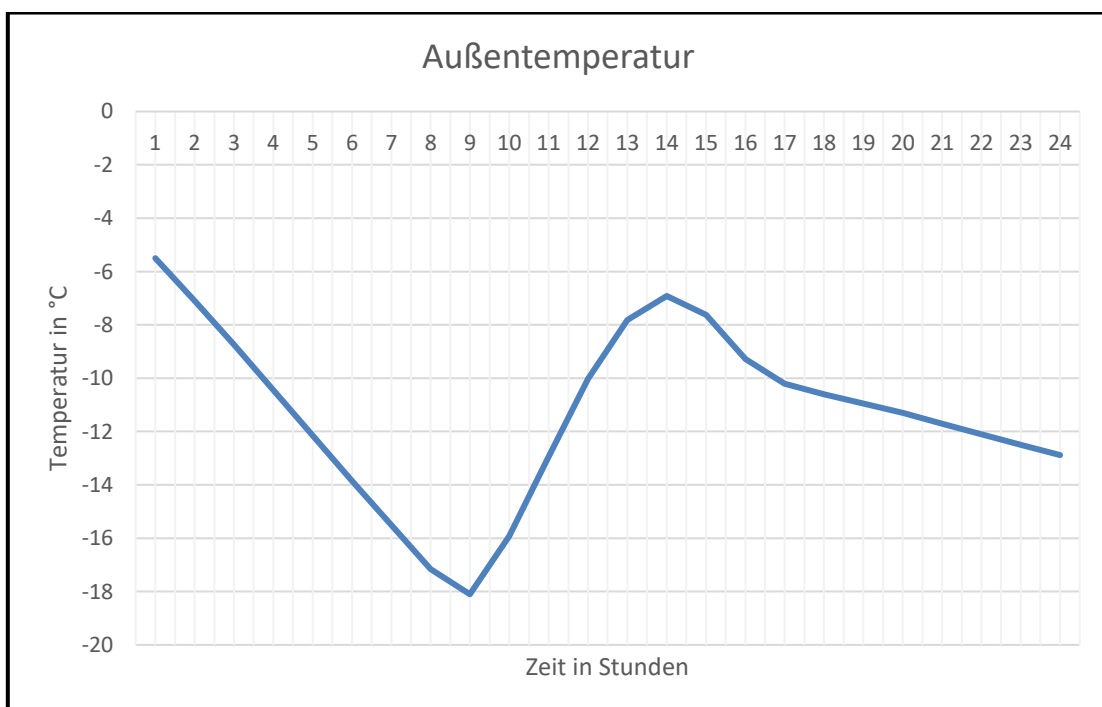


Bild 22: Verlauf der Außentemperatur an einem Wintertag

Bei den Simulationsrechnungen ist für die unterschiedlichen Randbedingungen

- Drosselregelung / Beimischregelung
- Mit / ohne hydraulischen Abgleich
- Mit Überversorgung
- Mit / Ohne Nachabsenkung
- Energieeinsparung im Anlagenteilbereich Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung

der Energieaufwand berechnet worden.

Der Energieaufwand verhält sich nach Auswertung der gesamten Ergebnisse proportional zum Energiebedarf, was bedeutet, dass die sich jeweils ableitbaren Aufwandszahlen nahezu konstant sind.

Ausgehend vom zusammengefassten Energiebedarf der drei Wärmedämmstandards in monatlicher Auflösung (siehe Bild 16) ergibt sich der jeweilige Energieaufwand für die genannten Randbedingungen. In Bild 23 sind die Energieaufwände für den Dämmstandard 1977 monatlich aufgetragen.

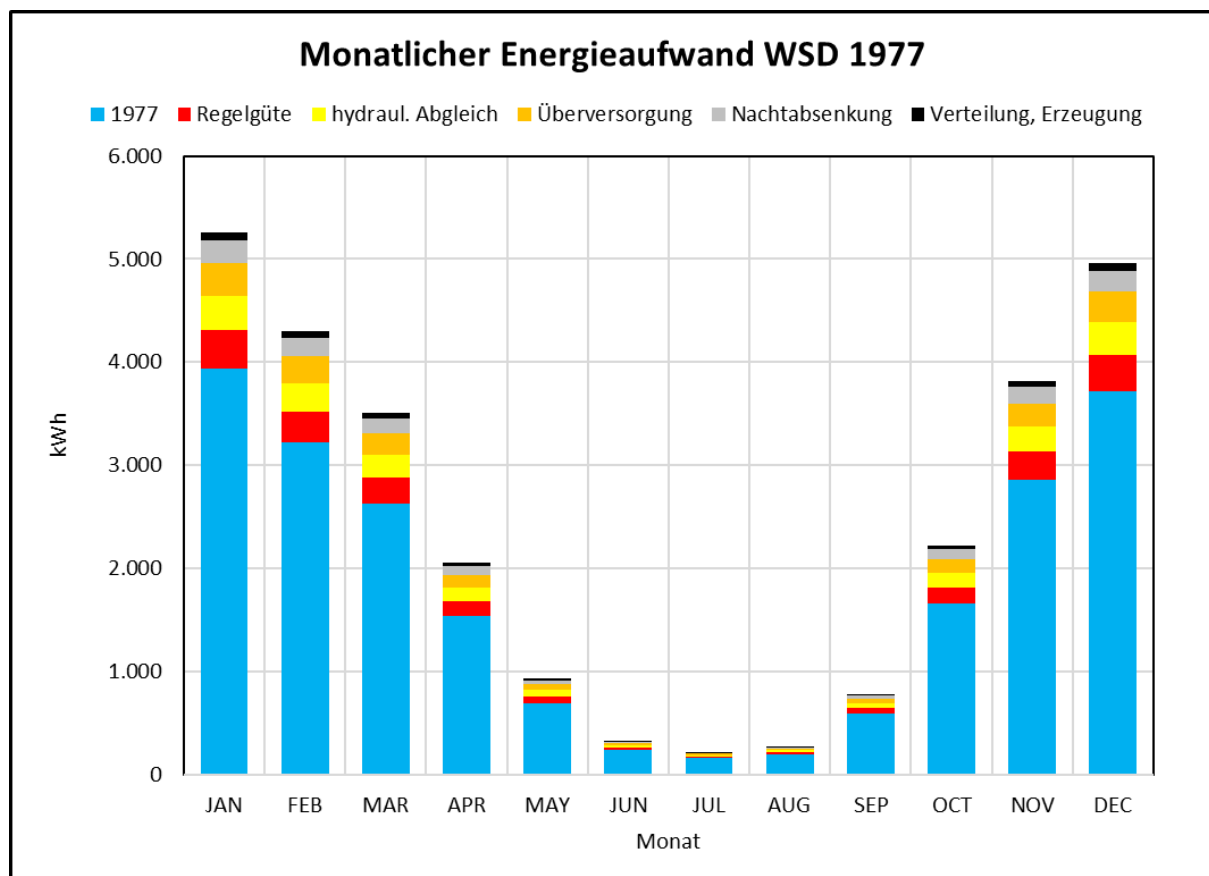


Bild 23: Monatliche Energieaufwände für Wärmedämmstandard 1977

Die zusätzlichen Energieaufwände beziehen sich auf den mit angegebenen Heizenergiebedarf, wobei der Aufwand für die Regelgüte sich auf die Drosselregelung bezieht, d.h. der Energieaufwand bei der Beimischregelung ist um den ausgewiesenen Betrag geringer.

In den Bildern 24 und 25 sind die Energieaufwände in gleicher Darstellung für die Wärmedämmstandards 2002 und 2016 angegeben.

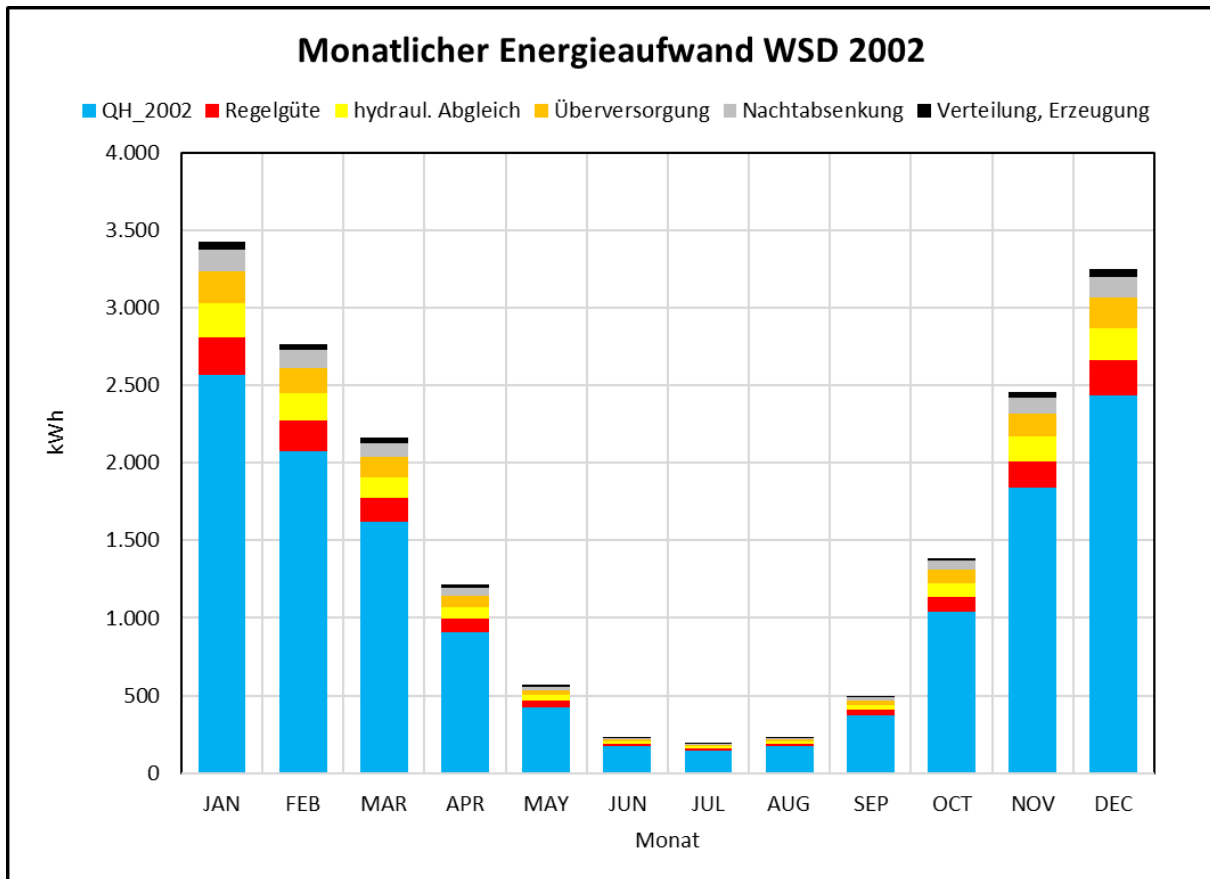


Bild 24: Monatliche Energieaufwände für Wärmedämmstandard 2002

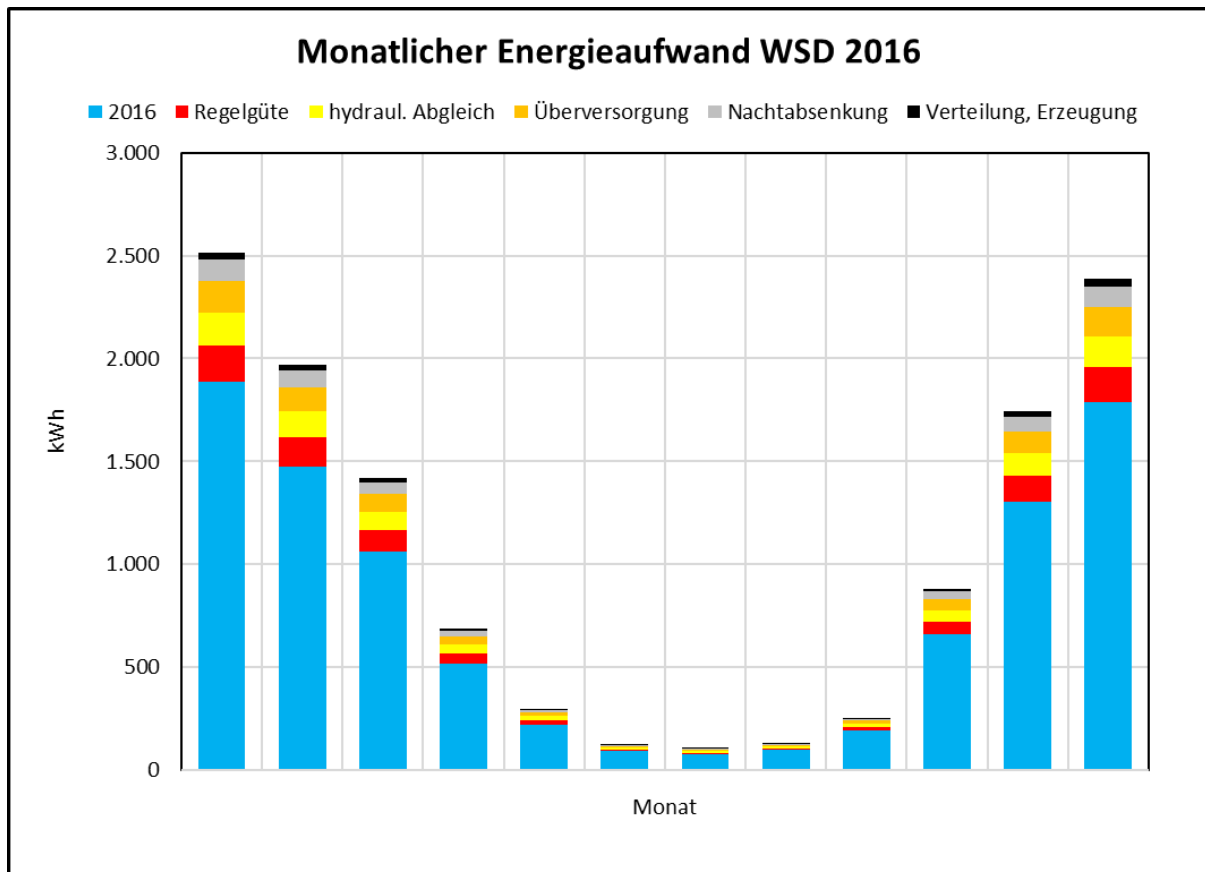


Bild 25: Monatliche Energieaufwände für Wärmedämmstandard 2016

Die Energieaufwände lassen sich zusammenfassend über die Dämmstandards hinweg zu proportionalen Größen zusammenfassen:

- Regelgüte

Der Einfluss der Regelgüte beträgt ca. 9,5 %, was bedeutet, dass die Standard-Drosselregelung einen um ca. 9,5 % höheren Energieaufwand besitzt. Die Regelgüte wirkt sich auf die Aufwandszahl aus. Im Wesentlichen ist das darauf zurückzuführen, dass keine klassischen Abkühl- und Aufheizzeiten auftreten. Bei der Beimischregelung erhält jeder Raum seine individuelle Vorlauftemperatur, die immer im Heizfall zur Verfügung steht. Bei der Standard-Drosselregelung richtet sich die Vorlauftemperatur nach dem ungünstigsten Raum, so dass die Räume, die eigentlich nur eine geringere Vorlauftemperatur benötigen, den Heizwasserstrom stark abdrosseln müssen.

- Hydraulischer Abgleich

Bei der Drosselregelung ist der Energieaufwand bei fehlendem hydraulischem Abgleich mit ca. 8,5 % anzusetzen, der die Aufwandszahl reduziert. Bei einem fehlenden hydraulischen Abgleich, was in der Praxis sehr oft der Fall ist, wird mindestens ein Raum mit zu hohem Heizwasserstrom und die übrigen Räume mit zu geringem Heizwasserstrom versorgt. Bei zu hohem Heizwasserstrom erreicht die Raumtemperatur häufiger die oberen und unteren Schaltgrenzen für den Stellantrieb, so dass es häufiger zu Abkühl- und Aufheizvorgängen kommt. Bei Räumen, die zu geringe Heizwasserströme erhalten, wird in der Praxis meist die Vorlauftemperatur angehoben oder die Förderleistung der Umwälzpumpe erhöht. Beide Maßnahmen wirken gerade der Energieeffizienz entgegen.

Das Fehlen des hydraulischen Abgleichs ist oftmals darauf zurückzuführen, dass die rechnerische Ermittlung der Kennwerte für die Voreinstellung (=Drosselung) der Heizkreise aufwändig ist. Bei jeder Änderung des Fußbodenaufbaus oder der Belegung mit Teppichen muss bei der Drosselregelung ein neuer hydraulischer Abgleich erfolgen. In Bestandsgebäuden ist dies rechnerisch praktisch nicht möglich, weil meist keine Informationen mehr über die Auslegung vorliegen.

Bei der Beimischregelung ist kein hydraulischer Abgleich erforderlich, weil die Temperaturanpassung über die Heizkreis-Vorlauftemperatur eines jedem Raumes bei konstantem Heizwasserstrom erfolgt. Wenn durch Änderung des Fußbodenaufbaus, der Belegung des Fußbodens mit Teppichen oder einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle sich die erforderliche Heizleistung ändert, ist die Beimischregelung ohne weitere Einstellung selbst adaptierend. Wird die Wärmeabgabe zu gering, sinkt die Raumtemperatur, die durch die Aufschaltung auf die Regelung die Vorlauftemperatur sofort anheben würde. Wird weniger Wärme benötigt, z.B. bei Sanierung der Gebäudehülle, steigt die Raumtemperatur an und die Vorlauftemperatur wird sofort wieder gesenkt.

- Überversorgung

Die sogenannte Überversorgung resultiert daraus, dass bei der derzeitigen Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 im Geschoss-Wohnungsbau die angrenzende Raumtemperatur von Räumen, die zu einer anderen Wohnungseinheit gehören, mit 15 °C anzunehmen ist. Bei entsprechender Lage von Räumen mit zwei Wandseiten und Fußboden und Decke ergibt sich gegenüber den Raumtemperaturen im beheizten Zustand eine größere Heizlast, die im Bereich von 20 % bis 30 % höher liegen kann.

Werden daraus bei Drosselregelungen die Heizwasserströme und Vorlauftemperaturen berechnet, ergeben sich deutlich zu hohe Werte. Damit werden die Heizkreise mit nominellen Heizwasserströmen beaufschlagt, die nicht in der Voreinstellung, sondern im Betrieb abgedrosselt werden müssen. Physikalisch kommt es zu einem analogen Effekt wie fehlendem hydraulischem Abgleich. Die Energieeinsparung ist daher mit ca. 8 % anzusetzen und wirkt sich auf den Heizenergiebedarf aus.

- Abgesenkter Heizbetrieb

Die prinzipiellen Anheiz- und Auskühlkurven (siehe Bilder 18 und 19) bei einer Drosselregelung führen bei Absenkung der Raumtemperatur zu erheblichen Aufheizzeiten, um die Soll-Raumtemperatur wieder zu erreichen (die Wiederaufheizzeit entspricht fast der möglichen Zeit des Absenkbetriebs), so dass in aller Regel Fußbodenheizungen mit Drosselregelung durchgängig betrieben werden.

Bei der Beimischregelung kann durch kurzfristiges Anheben der Vorlauftemperatur ein Boost-Betrieb realisiert werden. Damit verkürzen sich die Aufheizzeiten erheblich und die Energieeinsparung durch abgesenkten Betrieb kann auch bei Fußbodenheizungen geschöpft werden. Die hierdurch mögliche Energieeinsparung beträgt ca. 5,5 % des Heizenergieaufwands.

- Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung

Durch die Verringerung des Energieaufwands bei der Wärmeübergabe durch die Beimischregelung verringert sich auch die mittlere Belastung der Wärmeübergabe.

Da die nachfolgenden Anlagenteilbereiche Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung über die mittlere Belastung miteinander verknüpft sind (siehe Bild 20) reduziert sich auch der Energieaufwand für die Wärmeverteilung und die Wärmeerzeugung. Der diesbezügliche Anteil ist mit ca. 2 % zu beziffern und wirkt sich auf die Aufwandszahl aus.

Die Summe der Endenergieeinsparungen aus den vorgenannten Einflüssen beträgt **33,5 %**.

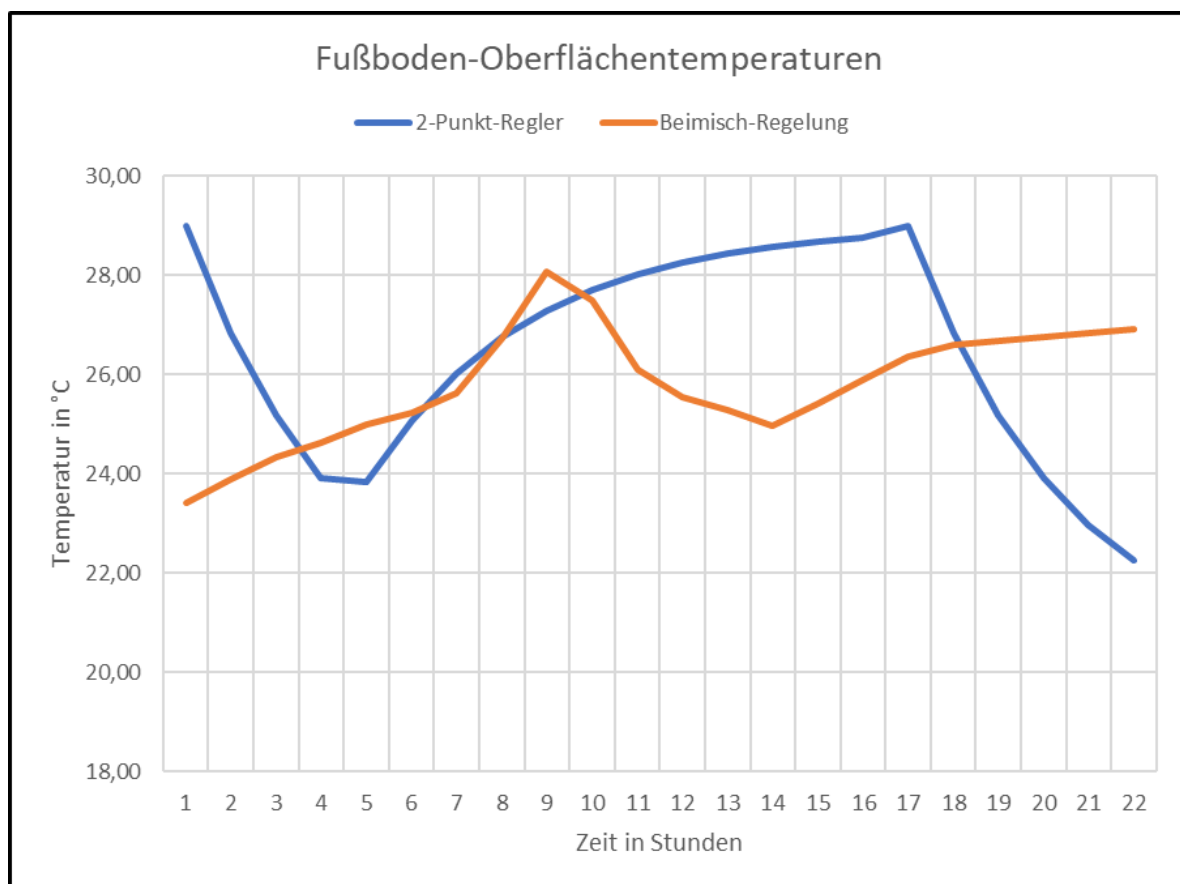


Bild 26: Fußboden-Oberflächen-Temperatur an einem Wintertag

Aus Bild 26 ist zu erkennen, dass die Standard-Drosselregelung eine deutlich höhere Fußboden-Oberflächentemperatur erzeugt als die Beimischregelung, was sich durch die Auskühl- und Anheizvorgänge bei Schalten des Stellantriebs von Geschlossen auf Geöffnet und umgekehrt ergibt.

In Bild 27 sind die Heizwassertemperaturen für den gleichen Wintertag angegeben. Neben der Vor- und Rücklauftemperatur bei der Beimischregelung ist der Verlauf der zentralen, außentemperaturabhängigen Vorlauftemperaturregelung angegeben, wie sie vorgefunden werden kann. Weiterhin ist die Abkühlung des Heizwassers angegeben, nachdem der Stellantrieb geschlossen hat und die Aufheizung nach Öffnen des Stellantriebs. Die Flächen unterhalb der Kurve für zentrale Vorlauftemperaturregelung und der raumweisen Vorlauftemperaturregelung bei der Beimischregelung stellen den zusätzlichen Energieaufwand dar.

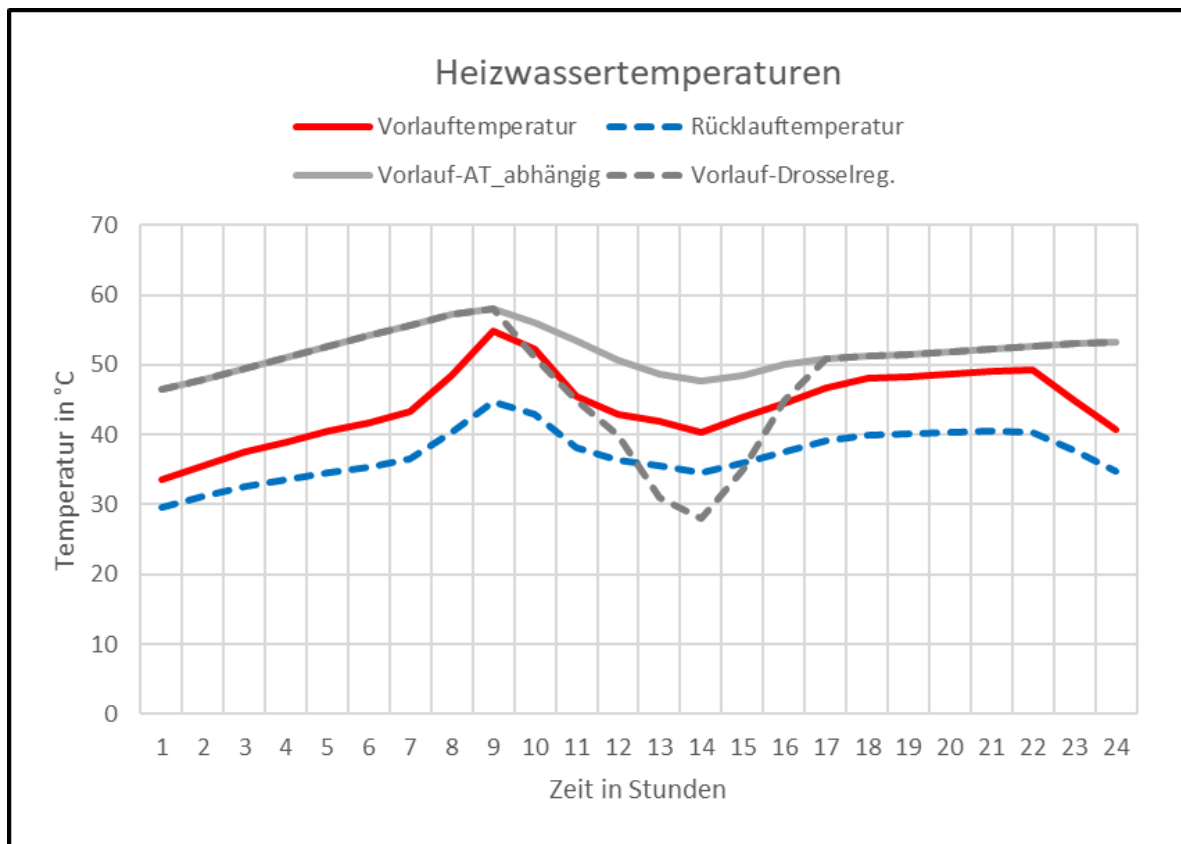


Bild 27: Heizwassertemperaturen an einem Wintertag

Bei Wohnungsstationen, die zunehmend im Geschosswohnungsbau eingesetzt werden, ist meist keine zentrale außentemperaturabhängige Regelung der Vorlauftemperatur vorhanden, weil höhere Heizwassertemperaturen zur dezentralen Trinkwassererwärmung benötigt werden.

2.1.6 AP 3: Prinzipieller Aufbau eines Reglers

Um zu verdeutlichen welche Einstell- und Ergebnisgrößen eine Beimischregelung erfordert, beziehungsweise liefert, sind in Bild 28 die entsprechenden Größen zusammengestellt.

Als Eingabegrößen sind zu verstehen:

Für das Gebäude:

- Tiefste Außentemperatur

Für den Raum:

- Heizlast – entweder berechnet, aus EnEV-Nachweis oder geschätzt
- Soll-Raumtemperatur
- Kenngröße des Fußbodenheizsystems (Fußbodenaufbau, Rohrmaterial, Rohrabstand). Diese Kenngröße kann von jedem Hersteller angegeben werden bzw. ist aus deren Unterlagen zu entnehmen. Die Kenngröße kann aber auch abgeschätzt werden.
- Heizwasser-Massenstrom – kann als berechneter Wert angegeben oder eingegeben werden.

Anzeigen während des Betriebs:

- Momentane Heizleistung
- Aktuelle Raumtemperatur
- Aktuelle Außentemperatur
- Wärmeverbrauch (aus Massenstrom und Temperaturdifferenz Vor- und Rücklauf)
- Aktuelle Vorlauftemperatur

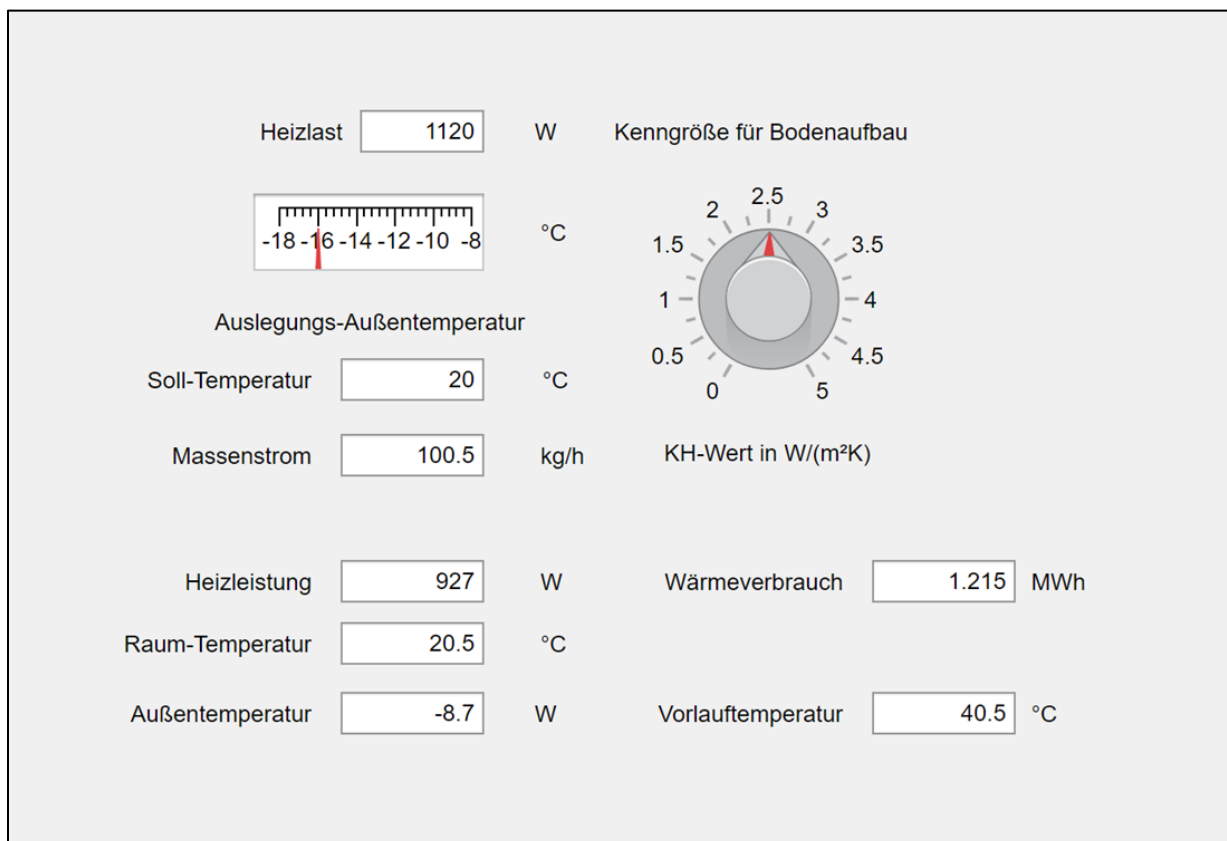


Bild 28: Prinzipieller Aufbau eines Beimsichreglers

Die erste Kaskade der Regelung berücksichtigt die Außentemperatur und die zweite Kaskade die Raumtemperatur, beide Größen werden fortlaufend kontrolliert.

Wenn Eingabewerte nicht vorgenommen werden (können), adaptiert sich das System selbst. Insoweit reichen Schätzwerte auch aus, was im Gebäude-Bestand von besonderer Bedeutung ist.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.1 Flächenbezogener Heizwärmebedarf

Aus den detaillierten Simulationsrechnungen, die für Module durchgeführt wurden, sind durch Kombination die unterschiedlichen Gebäude in ihrer Lage und Anzahl der Wohnungen zusammengestellt (siehe Bild 29 bis Bild).

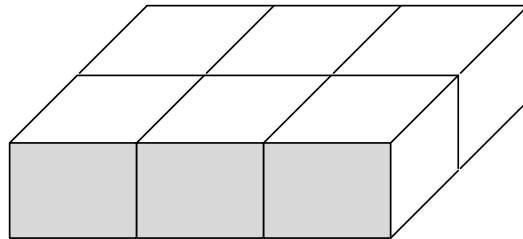


Bild 29: Eingeschossiges Einfamilienhaus aus Modulen

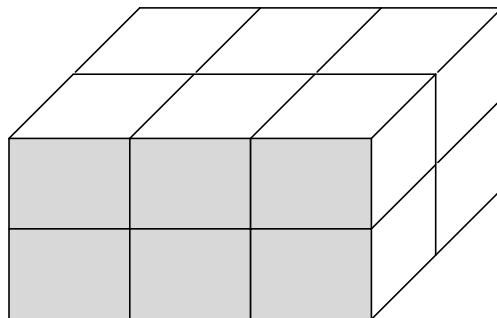


Bild 30: Zweigeschossiges Wohnhaus aus Modulen

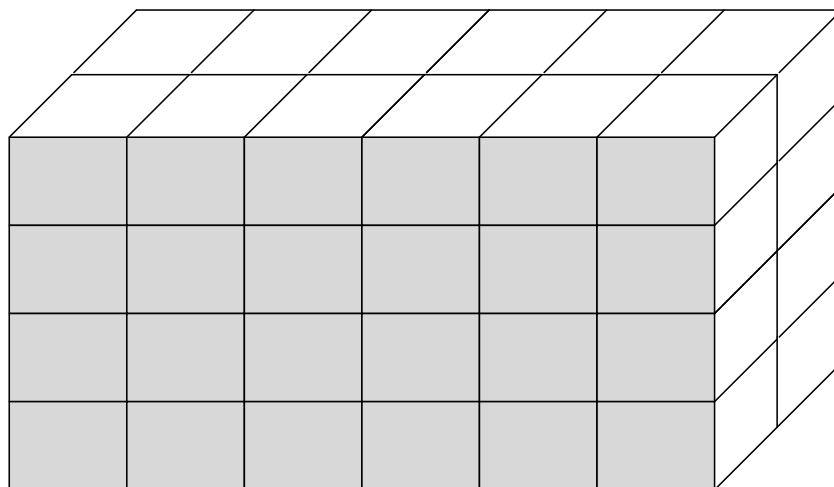


Bild 31: Mehrfamilienwohnhaus (8 Wohnungen) aus Modulen

Je mehr Räume sich in einem Wohngebäude befinden, desto geringer wird der Heizenergiebedarf, weil der Anteil innenliegender Raumabgrenzungen steigt. Bei den Simulationsrechnungen, die ohne Absenkung der angrenzenden Raumtemperatur bei Mehrfamilienhäusern und unterschiedlichen Nutzern berechnet wurden, wirkt sich dieser Einfluss erheblich aus (Berechnung ohne Überversorgung).

Über alle Berechnungen hinweg wurde für den Heizenergiebedarf der betrachteten Wärmedämmstandards eine Mittelwertbildung vorgenommen. Mit den vorgenannten Randbedingungen ergeben sich die folgenden Werte:

Tabelle 4:

Heizwärmebedarf	Wärmedämmstandard		
	1977	2006	2016
kWh/m ² ·a	80,79	65,56	50,12

Durch fast 40 % der Wohnungen im Geschosswohnungsbau werden die Durchschnittswerte kleiner als bei der Bewertung von Ein- und Zweifamilienhäusern.

Die flächenbezogenen jährlichen Werte für den Heizenergiebedarf liegen im allgemein bekannten Bereich. Die Orientierung eher an den unteren Werten stellt für die vorliegende Gesamtbewertung eine konservative Annahme an, weil damit auch das Potential der Energieeinsparung eher konservativ bewertet wird.

3.2 Flächenbezogener Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf ergibt sich nach Bild 20 durch Multiplikation des Heizwärmebedarfs mit der Gesamt-Anlagenaufwandszahl (nicht primärenergetisch bewertet):

$$Q_{h,end} = Q_h \cdot e_{ges} \quad (24)$$

Dabei ist die Gesamt-Anlagenaufwandszahl das Produkt der einzelnen Aufwandszahlen der Anlagenteilbereiche:

$$e_{ges} = e_{CE} \cdot e_d \cdot e_s \cdot e_g \quad (25)$$

Dabei sind

- e_d Aufwandszahl der Wärmeverteilung
- e_s Aufwandszahl eines Speichers (wenn vorhanden)
- e_g Aufwandszahl der Erzeugung

Parallel zu den verschiedenen Dämmstandards der Gebäude haben sich Eigenschaften der Heizanlagen, auch durch entsprechende Anforderungen, geändert. Das bedeutet, dass die Gesamt-Anlagenaufwandszahlen für die

energetische Bewertung von Heizanlagen mit höheren Anforderungen an die Gebäudedämmung kleiner geworden sind.

3.3 Energieeinsparung

Die durch die Beimischregelung erzielbare Energieeinsparung ist auf zwei Bereiche zurückzuführen. Der Einfluss der Überversorgung mit ca. 8 % und des abgesenkten Betriebs mit ca. 5,5 % wirken sich auf den Energiebedarf aus, d.h. der Energiebedarf wird um die genannten Anteile kleiner.

Dagegen wirken sich Regelgüte mit ca. 9,5 %, hydraulischer Abgleich mit 8,5 % und der Einfluss auf Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung auf den Energieaufwand aus.

Anlagenaufwandszahlen sind für typische Heizanlagen in Diagrammen bzw. Tabellen in DIN V 4701-10 enthalten oder in DIN V 19599-12 zusammenstellbar.

Für die hier dem Dämmstandard zugeordneten Aufwandszahlen sind folgende Ausführungsvarianten zugrunde gelegt:

Wärmedämmstandard 1977:

- Fußbodenheizung mit Drosselregelung – manuelle Drosselventile
- Vorlauftemperaturregelung nicht angepasst
- Umwälzpumpe mit konstanter Drehzahl
- Ungenügende Wärmedämmung der Verteilungen und Armaturen
- Standard-Heizkessel

Wärmedämmstandard 2002:

- Fußbodenheizung mit Drosselregelung – Stellantriebe ohne hydraulischen Abgleich
- Vorlauftemperaturregelung nicht angepasst
- Umwälzpumpe mit einstellbarer, konstanter Drehzahl
- Ungenügende Wärmedämmung der Verteilungen bzw. der Armaturen
- Niedertemperatur-Heizkessel

Wärmedämmstandard 2016:

- Fußbodenheizung mit Drosselregelung – Stellantriebe ohne hydraulischen Abgleich
- Vorlauftemperaturregelung außen temperaturabhängig mit Sicherheitsreserve
- Umwälzpumpe mit geregelter Drehzahl
- Teilweise noch ungenügende Wärmedämmung der Verteilungen bzw. der Armaturen
- Brennwert-Heizkessel

Für die genannten Ausführungen der Heizanlage ergeben sich die folgenden Gesamt-Anlagenaufwandszahlen, die zur Bestimmung des Endenergiebedarfs herangezogen werden.

Tabelle 5:

Gesamt- Anlagenaufwandszahl	Wärmedämmstandard		
	1977	2006	2016
-	1,78	1,52	1,40

Mit den Flächenermittlungen der in Deutschland mit Fußbodenheizung beheizten Wohnflächen (siehe FfE-Validierungsauftrag - Sprin-D 2022):

Tabelle 6:

Gesamt-Wohnfläche	Wärmedämmstandard		
	1977	2006	2016
m ²	71.000.000	203.220.000	243.720.000

und dem Heizwärmebedarf und der Gesamt-Anlagenaufwandszahl kann die folgende Berechnung durchgeführt werden:

Tabelle 7:

Heizwärmebedarf	80,79	65,56	50,12		kWh/m²·a
Aufwandszahl e_{ges}	1,78	1,52	1,40		-
Endenergiebedarf	143,80	99,65	70,16		kWh/m ² ·a
Wohnfläche	71.000.000	203.220.000	243.720.000	517.940.000	m ²
Endenergiebedarf	10,21	20,25	17,1	47,56	TWh/a
Nachtabsenkung 5,5 %	7,91	5,48	3,86	17,25	kWh/m ² ·a
Übersorgung 8 %	11,50	7,97	5,61	25,09	kWh/m ² ·a
Summe Bedarfsreduktion	19,41	13,45	9,47	42,34	kWh/m ² ·a
Regelgüte 9,5 %	13,66	9,47	6,67		-
Hydraulischer Abgleich 8,5 %	12,22	8,47	5,96		
Wärmeverteilung,-erzeugung 2 %	2,88	1,99	1,40		-
Summe Anlagenreduktion	28,76	19,93	14,03	62,72	kWh/m ² ·a
Summe Endenergie-Reduktion				105,06	kWh/m ² ·a
Neuer Endenergiebedarf	95,63	66,26	46,66		kWh/m ² ·a
Neuer Endenergiebedarf gesamt	6,79	13,47	11,37	31,63	TWh/a
Reduktion Endenergie absolut				15,93	TWh/a
Reduktion Endenergie prozentual				33,50%	

Aus dem flächenbezogenen Heizwärmebedarf ergibt sich mit der Gesamt-Aufwandszahl der flächenbezogene Endenergiebedarf.

Mit den seitens /FfE/ ermittelten Wohnflächen ergibt sich dann der Endenergiebedarf. Durch geringfügige Anpassung der Gesamt-Anlagenaufwandszahl ergibt sich der jährliche Endenergiebedarf, der in der Summe mit dem von /FfE/ ausgewiesenen Wert übereinstimmt (47,56 TWh/a).

Wie bereits ausgeführt, werden durch Überversorgung und abgesenkten Betrieb jeweils Bedarfsreduktionen bewirkt. Der jeweilige Endenergiebedarf wird daher um 5,5 % (Absenkbetrieb) und um 8 % (Überversorgung) gesenkt.

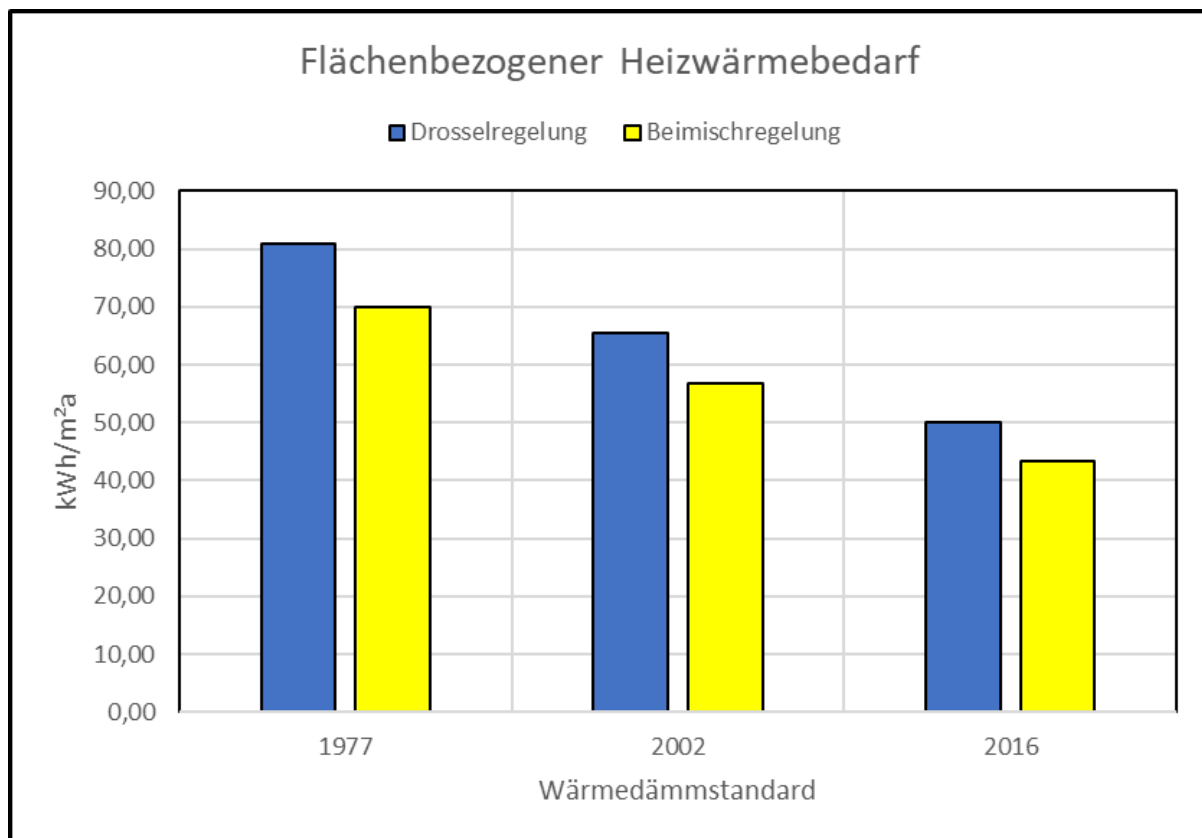


Bild 32: Flächenbezogener Heizwärmebedarf bei unterschiedlicher Regelung

Die Regelgüte mit 9,5 %, der hydraulische Abgleich mit 8,5 % und Einflüsse auf Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung mit 2,0 % reduzieren den Endenergieaufwand, die Summe der Reduktionen stellen die gesamte Reduktion aus diesen Effekten dar (siehe Bild 33).

Der gesamte, reduzierte Endenergiebedarf ist in Bild 34 dargestellt.

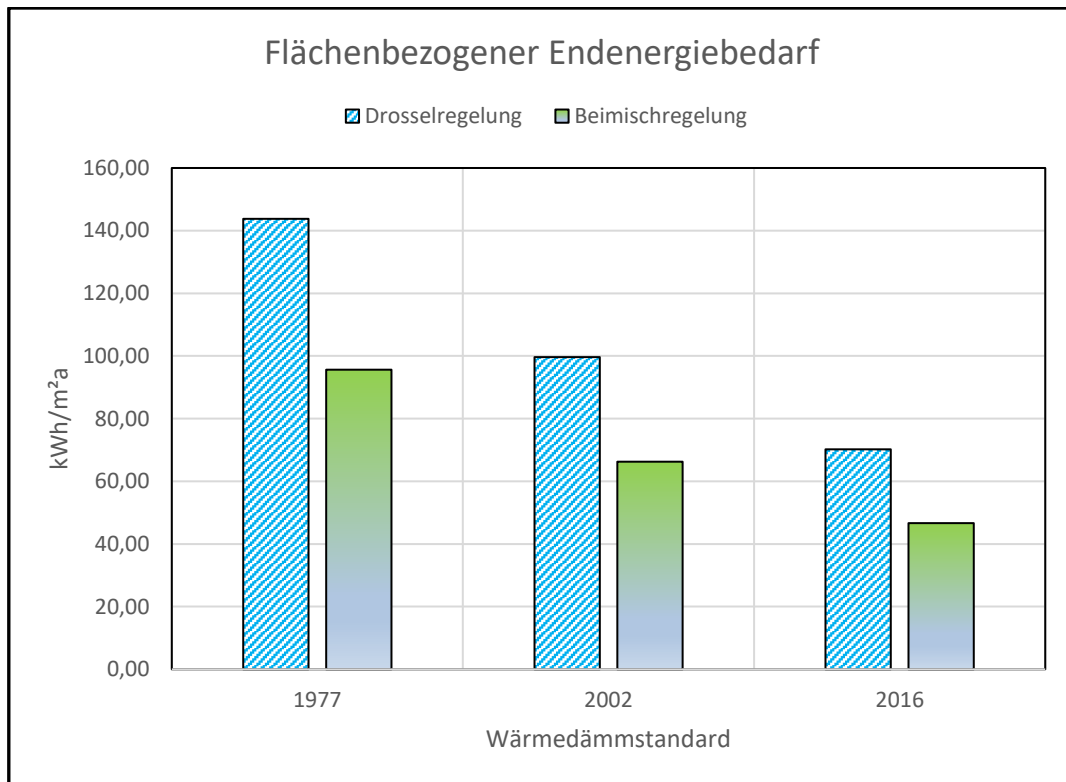


Bild 33: Flächenbezogener Endenergiebedarf für Drossel- und Beimischregelung

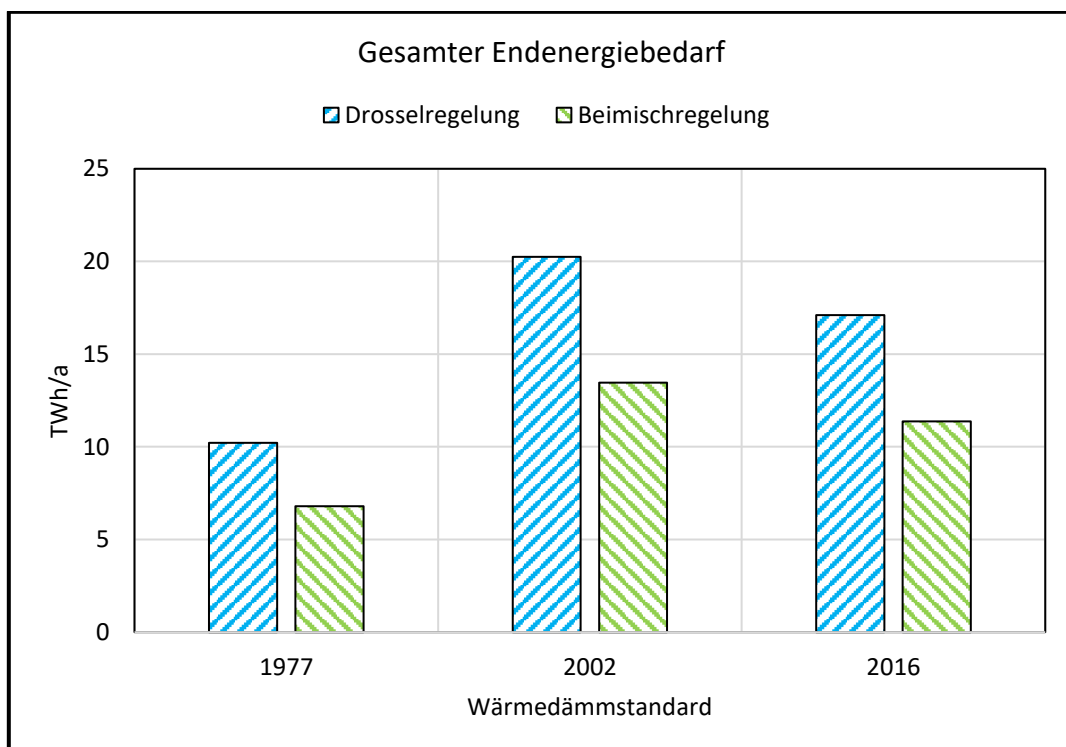


Bild 34: Gesamte jährliche Endenergieeinsparung

Mit dem reduzierten Heizwärmebedarf und der reduzierten Anlagenaufwandszahl ergibt sich jeweils der reduzierte Endenergiebedarf. Die Summe des gesamten reduzierten Endenergiebedarfs beträgt danach 31,63 TWh/a und ist um absolut **15,93 TWh/a** kleiner. Das entspricht auf den Endenergiebedarf bezogen einer prozentualen

Energieeinsparung von **33,5 %**. Bei einem durchschnittlichen Endenergieverbrauch von 91,8 kWh/m²·a entspricht diese Einsparung dem Endenergiebedarf von **92.380 Wohnungen für das Jahr 2020** und **1.884.141 Wohnungen für alle 5,62 Mio. bis 2020 gebauten Wohnungen mit Fußbodenheizung (FfE Tabelle 2-3)**.

3.4 Einsparung von Emissionen

Die Aufteilung von Energieträgern ergibt sich nach den Angaben des Umweltbundesamtes für das Jahr 2021:

Tabelle 8:

Brennstoffanteile Bereich Haushalte 2021	
Brennstoff	Anteil
Mineralölprodukte	21,10%
Gas	37,30%
Fernwärme	7,60%
Stein- und Braunkohle	0,60%

Die Aufteilung ist in Bild 35 nochmals anschaulich dargestellt.

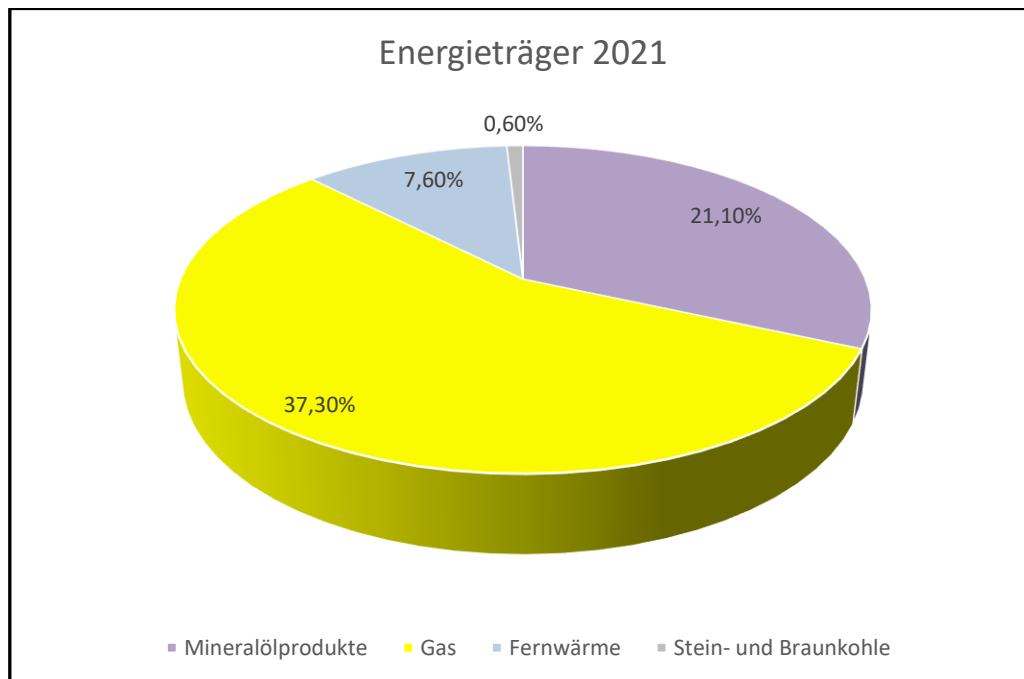


Bild 35: Aufteilung der Energieträger in 2021

Quelle: Umweltbundesamt auf der Basis AG Energiebilanzen

Für die genannten Brennstoffe sind die CO₂-Faktoren zur Ermittlung der gesamten Emissionen wie folgt anzusetzen:

Tabelle 9:

CO ₂ -Faktoren in t CO ₂ /MWh	
Brennstoff	Faktor
Mineralölprodukte	0,266
Gas	0,201
Fernwärme	0,280
Stein- und Braunkohle	0,385

Damit ergibt sich die gesamte CO₂-Einsparung bei 11,5 TWh Energieeinsparung:

Tabelle 10:

Reduktion CO ₂ -Emissionen in t CO ₂ bei 15,93 TWh/a Einsparung			
Brennstoff	Faktor	Anteil	Reduktion t CO ₂ -Emission
Mineralölprodukte	0,266	21,10%	894.087
Gas	0,201	37,30%	1.194.320
Fernwärme	0,280	7,60%	338.990
Stein- und Braunkohle	0,385	0,60%	36.798
Summe			2.464.196

Damit ergibt sich die gesamte Reduktion der CO₂-Emissionen auf ca. 2,5 Mio t CO₂ /a. Derzeit betragen die gesamten CO₂-Emissionen für alle Gebäude mit Fußbodenheizung 7.357.009 t CO₂/a bei gleicher Aufteilung der Brennstoffe. Daraus ergibt sich gleichfalls eine prozentuale Reduktion der CO₂-Emissionen bei Gebäuden mit Fußbodenheizung in Höhe von 33,5 %.

4 Allgemeine Eigenschaften

Das /CENERGIE/ - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere der Hochschule München hat in einer grundlegenden Untersuchung eine Bewertung der thermisch energetischen Potenziale der raumweisen Beimisch-Regelung für Fußbodenheizungen vorgenommen. Dabei sind die grundsätzlichen Eigenschaften von Drosselregelungen und Beimischregelungen gegenübergestellt. Aus diesem Vergleich kommt /CENERGIE/ zu dem Ergebnis, dass die Beimischregelung grundsätzlich energiesparender sein muss. Eine Quantifizierung der Einsparpotenziale hat /CENERGIE/ nicht vorgenommen, sondern darauf hingewiesen, dass hierzu eine wissenschaftliche Untersuchung erforderlich ist.

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. /FfE/ hat die Ermittlung der mit Fußbodenheizung beheizten Gebäude in Deutschland hinsichtlich ihrer Fläche und Gebäude, sortiert nach Gebäude-Dämmstandards, durchgeführt. Mit einer Vorab-Abschätzung der möglichen Energieeinsparung hat /FfE/ die Energieeinsparung hochgerechnet und gleichzeitig auch die Reduktion der CO₂-Emissionen ermittelt. Die seitens /FfE/ vorgenommenen Berechnungen sind noch nicht unterschieden in die Bereiche, in denen die Einspareffekte auftreten (Bedarfsreduktion und Anlagentechnik).

Ergänzend verweist /FfE/ auf die soziale Komponente der Energieeinsparung. Bei der Größenordnung der möglichen Energieeinsparung könnten einkommensschwächere Haushalte hinsichtlich der Energiekosten deutlich entlastet werden, was vor dem aktuellen Hintergrund der Energiekostensteigerung an Bedeutung gewinnt.

Bei einer Änderung der Brennstoffe durch vermehrten Einsatz von Wärmepumpen bleibt die Energieeinsparung in jedem Fall erhalten, da dann auch in gleichem Maß geringere elektrische Energie benötigt wird, die nicht durch erneuerbare Energie erzeugt werden muss. Damit bleiben alle Vorteile der Energieeinsparung erhalten, lediglich die Reduktion der CO₂-Emissionen würde sich verändern.

Im Geschosswohnungsbau müssen die Heizkosten auf die einzelnen Nutzer aufgeteilt werden. Bei Fußbodenheizungen werden heute meist Wärmemengenzähler installiert, die den Nutzern mit ihren Mietkosten in Rechnung gestellt werden. Zusätzlich fallen die Kosten für die Abrechnung an, die jeder Nutzer anteilig zu tragen hat. Bei der Beimischregelung kann der Wärmeverbrauch nicht nur je Heizkreisverteiler, sondern je Heizkreis ermittelt werden. Bei Einsatz geeichter Vorlauf- und Rücklauf-temperatur-Fühler und konstantem Heizwasserstrom je Heizkreis kann der Wärmeverbrauch einfach errechnet und saldiert werden. Damit sind Nutzer in die Lage versetzt, den eigenen Wärmeverbrauch je Raum zu kontrollieren, was erfahrungsgemäß zu weiteren Energieeinsparungen führt. Durch den Wegfall gemieteter Wärmemengenzähler und vereinfachter Abrechnung wären weitere Kosteneinsparungen für den Nutzer möglich. Bei weiterer Zunahme von Gebäuden mit geringem Heizwärmeverbrauch stehen die Abrechnungskosten nicht mehr im Verhältnis zu den Kosten für den Wärmeverbrauch.

Die übliche Auslegung von Fußbodenheizungen erfolgt für Wärmedurchlasswiderstände von $\lambda = 0,1$ mK/W, was einem Parkettfußboden entspricht. Auf diesen Oberflächenbelag sind auch die hier erzielten Ergebnisse abgestellt. Wenn dagegen keramische Oberflächenbeläge (Fliesen, Naturstein) gewählt werden, beträgt der diesbezügliche Wärmedurchlasswiderstand $\lambda = 0,05$ mK/W. Dadurch erhöht sich die Überversorgung gravierend auf ca. 22 %.

Wird die Vorlauf-temperatur für den Auslegungsfall an der Außentemperatur-Steuerung nicht exakt eingestellt, tritt eine weitere Überversorgung bei statischer Berechnung auf (beispielhaft):

- Auslegungs-Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung 42°C
- Bei einer Einstellung von 45°C ergibt sich eine Überversorgung von 18%, die durch Drosseln nicht mehr zu kompensieren ist.
- Bei einer Einstellung von 50°C beträgt die Überversorgung bereits ca. 49%!

- Wenn nicht nur die Heizwasserströme der Räume untereinander hydraulisch abgeglichen sind, sondern auch die Temperaturdifferenz gegenüber der Auslegung abweicht, treten Überversorgungen von ca. 18% auf.

Neben den in dieser Studie berücksichtigten Haupteinflüsse haben bereits andere Untersuchungen allgemeiner Art Einspareffekte aufgezeigt, die auch bei der Beimischregelung auftreten, in einem Simulationsmodell jedoch nicht abzubilden sind, weil ein bestimmtes Nutzerverhalten zu unterstellen ist:

- Bei laufender Verbraucherinformation von Heizungen durch „Submetering“, das der Nutzer selbst durchführen kann, rechnet Dena / Ista mit einem Einsparpotenzial von ca. 10 %.
- Bei Absenkbetrieb auch tagsüber in dezentralen Heizkreisen mit der Möglichkeit des Schnellaufheizens und realisierter Abwesenheitserkennung – bei Einsatz von Gebäudeautomationssystemen wird von /IBP-Mitteilung 527/ ein Einsparpotential von 14 % - 26 % erwartet.
- Wenn keine Überversorgung einer Heizanlage auftritt und ein bedarfsorientierter / adaptiver Betrieb durch ein Energiemanagement-System erfolgt, beziffert /IPB Mitteilung 523/ die Einsparung gegenüber dem Referenzgebäude mit 12,8 %.

Die angegebenen Energieeinsparpotenziale addieren sich nicht, zeigen jedoch auf, dass die in dieser Studie erarbeiteten Einsparpotenziale realistisch und eher konservativ ausgewiesen sind.

5 Erzieltes Ergebnis

Durch detaillierte Simulationsberechnungen, in die ein neu entwickeltes Auslegungsmodell für die Bestimmung der jeweils erforderlichen Vorlauftemperatur für jeden Raum einer Heizanlage integriert wurde, konnten die wesentlichen Vorteile einer Beimischregelung gegenüber einer Drosselregelung aufgezeigt werden. Die Einflüsse und damit die Energieeinsparpotenziale ergeben sich aus der Reduktion des Heizenergiebedarfs durch Vermeidung von Überdimensionierung und Absenkbetrieb sowie aus der Reduktion des Energieaufwands durch verbesserte Regelgüte, hydraulischem Abgleich und dem Einfluss auf Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung.

Als weiteres wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist nachgewiesen worden, dass die neue Beimischregelung im Betrieb selbstadaptierend ist. Bei Bestandsgebäuden erfolgt eine adaptive Anpassung selbst dann, wenn keine Schätzgrößen vorgegeben werden. Bei Drosselregelungen muss bei jeder Änderung des Oberbodenbelags (Auflage oder Entfernung von Teppichböden) ein neuer hydraulischer Abgleich erfolgen. Gleiches gilt für Bestandsgebäude, bei denen die Gebäudehülle energetisch saniert wird. In den genannten Fällen ist weder ein neuer hydraulischer Abgleich noch eine sonstige Anpassung erforderlich, wie sich das System selbst adaptiert.

Die Einführung der Beimischregelung im Gebäudebestand und in Neubauten führt nachgewiesenermaßen zu erheblichen Energieeinsparungen und Reduktionen von CO₂-Emissionen.

Die Herstellung von Beimischregelungen für Fußbodenheizungen greift wesentlich auf bekannte Komponenten zurück. Dies sind Heizkreisverteiler, Beimischarmaturen, Umwälzpumpen und Armaturen. Lediglich die je Verteiler erforderliche Regeleinheit ist nach vorgestellten Algorithmen zu entwickeln. Heizkreisverteiler können insoweit einbaufertig vorkonfiguriert und bei Bestandsgebäuden einfach ausgetauscht werden.

Da für jeden Heizkreis Vor- und Rücklauftemperatur gemessen werden und der Heizwasserstrom konstant gehalten wird, kann auch gleichzeitig der Wärmeverbrauch je Heizkreis festgestellt werden.

5.1 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Grundlegende Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war die Grundidee von Herrn Dipl.-Ing. Peter Gabanyi zum Einsatz von Beimischregelungen für Fußbodenheizungen. Die weitere Voraussetzung war durch die wissenschaftliche Bearbeitung und theoretische Modellbildung gegeben. Das beinhaltete die Umsetzung der Grundidee in Algorithmen und deren Anwendung. Schließlich waren Simulationsrechnungen zur Erfassung des dynamischen Verhaltens erforderlich.

5.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens wurde von Herrn Dipl.-Ing. Peter Gabanyi mit den Projektbeteiligten in Arbeitspakete mit Bearbeitungsterminen aufgeteilt.

5.3 Wissenschaftlicher Stand und Schutzrechte

Derzeit sind keine Beimischregelungen bei Fußbodenheizungen im Einsatz. Da analog zur Heizkörperheizung Fußbodenheizungen mit Drosselregelungen ausgestattet sind, liegen auch keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu Beimischregelungen bei Fußbodenheizungen vor.

An der Grundidee der Umsetzung und Regelung von Beimischregelungen bei Fußbodenheizungen hält Herr Dipl.-Ing. Peter Gabanyi Patentrechte.

5.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der inhaltlichen Projektkoordination bei der Durchführung der detaillierten Nachweise wurden folgend Stellen mit eingeschaltet:

- CENERGIE - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere, Hochschule München, verantwortlich: Prof. Dr. Jentsch

Das CENERGIE hat die grundlegenden Überlegungen und Unterschiede zwischen Drossel- und Beimischregelungen zusätzlich untersucht und aufgezeigt. Detaillierte Berechnungen wurden nicht durchgeführt.

- FfE – Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, verantwortlich: Dr.-Ing. von Roon

Die FfE hat die Ermittlung der Anzahl und Flächen von Gebäuden in Deutschland ermittelt, in denen Fußbodenheizungen installiert sind. Sowohl die Flächen als auch Gesamt-Endenergiebedarf wurden diesem Vorhaben bei der detaillierten Berechnung zugrunde gelegt. Die seitens FfE ermittelten Energie- und CO₂-Einsparungen basieren auf einer ersten Einschätzung der Gesamtenergieeinsparung.

5.5 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Der wesentliche Nutzen der Ergebnisse des Vorhabens besteht im detaillierten Nachweis der durch Beimischregelung erzielbaren Energieeinsparung und Reduktion der CO₂-Emissionen.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Energiekrise und Klimaveränderung sind die erheblichen Einsparpotenziale eine leicht zu realisierende Maßnahme, die auch dann erfolgreich ist, wenn sich die Aufteilung der derzeitigen Brennstoffverwendung mittel- und langfristig ändern sollte.

Da für einen erfolgreichen Einsatz einer Beimischregelung nur die Regeleinheit mit den Algorithmen zur Vorlauftemperaturregelung, die alle im Bericht angegeben sind, umzusetzen ist, kann mit einer zeitnahen Verfügbarkeit gerechnet werden, wenn sich entsprechende Systemhersteller des Systems annehmen.

Mit der Energieverbrauchsreduktion werden Wohnungsnutzer eine deutliche Reduktion ihrer Energieverbrauchskosten erwarten können.

Bei heutigen Fußbodenheizungen in Mehrfamilienhäusern werden die Heizkosten über Wärmemengenzähler erfasst und verteilt. Die Kosten für die Miete der Wärmemengenzähler und die Abrechnungskosten tragen die Mieter. Die Beimischregelung kann bei entsprechend geeichten Vor- und Rücklaufempfängerfühlern die Wärmemengen, sogar je Raum, mit gleicher Genauigkeit wie ein Wärmemengenzähler erfassen. Durch die raumweise Anzeige würde sich ein weiterer Anreiz für die Nutzer ergeben, Heizenergie zu sparen. Je nach Anpassung der Heizkostenverordnung könnte ggfls. die kostenträchtige Heizkostenabrechnung vereinfacht und damit kostengünstiger werden.

6 Literatur

WSV 77	Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV) vom 11. August 1977
EnEV 2002	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) Vom 16. November 2001
EnEV 2016	Energieeinsparverordnung zur Zweiten Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013
DIN EN 12831	Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017
DIN 4701-1	Regeln für die Berechnung der Heizlast von Gebäuden - Teil 1: Grundlagen der Berechnung
TRY	Testreferenzjahre, Deutscher Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung, Essen
TRNSYS	TRaNsient SYstems Simulation, University of Wisconsin, Version 16
DIN V 18599-10	Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten
DIN EN 1264-2	Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung
VDI 2067-10	Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Energiebedarf von Gebäuden für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten
DIN V 4701-10	Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung (zurückgezogen)
DIN V 18599-1-9	Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: Validierungsauftrag SPRIN-D Potenzialbewertung der raumweisen Beimischregelung von Fußbodenheizungen im Bestand, 2022
CENERGIE	Bewertung der thermisch energetischen Potenziale der raumweisen Beimisch-Regelung für Fußbodenheizung
IPB 527	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, IPB-Mitteilung 527: Simulationsstudie zum Energieeinsparpotential einer Heizungsregelung mit Abwesenheitserkennung und Wetterprognose
IPB 523	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, IPB-Mitteilung 523: Energiemanagementsystem für Zentralheizungsanlagen: Vergleichsmessungen zu einer konventionellen Heizungssteuerung