

# Untersuchungen zur Thermozyklischen Regelung (THZ) von Fußbodenheizungen

Auftraggeber: Thermozyklus GmbH  
Am Pfanderling 56  
85778 Haimhausen

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Knabe  
Bearbeiter: Dipl.-Ing. C. Felsmann  
Technische Universität Dresden  
Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung

Dresden, 27. Juni 2001



## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Ergebnisse</b>	<b>4</b>
2.1. Heizperiode (1. September - 31.Mai) . . . . .	4
2.2. Sollwertänderung . . . . .	9
2.3. Änderung der inneren Lasten . . . . .	10
2.4. Einfluß der Fußbodenbeläge . . . . .	12
<b>3. Schlussfolgerungen</b>	<b>15</b>
<b>A. Raumkennwerte</b>	<b>16</b>
<b>B. Fußbodenaufbau</b>	<b>18</b>
<b>C. Heizungsanlage</b>	<b>19</b>
<b>D. Reglereinstellung</b>	<b>20</b>



---

## 1. Einleitung

Der vorliegende Bericht stellt Ergebnisse dar, die mit der rechnergestützten Simulation der Thermozyklischen Regelung (THZ) [1] im Betrieb einer Fußbodenheizung bestimmt werden konnten. Bei der THZ-Regelung handelt es sich um einen adaptiven Zweipunktregler. Ein- und Ausschaltzeitpunkte werden vom Regler selbst bestimmt.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen wurde das am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden weiterentwickelte Simulationsprogramm TRNSYS-TUD [7] benutzt. Dieses Programm erlaubt für das Gebäude Simulationszeitschrittweiten bis in den Sekundenbereich und ist so für die Simulation von Regelvorgängen in Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystemen sehr gut geeignet. Das Simulationsmodell für die Fußbodenheizung basiert auf den Darstellungen in [3], [4], [5] und [6]. Eine Validierung des Modells erfolgte durch einen Vergleich mit Beispielen der Methode der finiten Elemente (FEM).

Für die Simulation des Regelalgorithmus des THZ wurde vom Auftraggeber ein „black-box“-Modell zur Verfügung gestellt. Dieses wurde mit Hilfe eines speziell dafür entwickelten Kopplungsmechanismus in die vorhandene TRNSYS-Umgebung eingebunden. Die Simulationschrittweite wurde entsprechend dem Abtastintervall des THZ-Reglers auf einen einheitlichen Wert von 1 min festgelegt.

Alle Untersuchungen erfolgten an einem einzelnen Raum (Anhang A). Die Festlegung von Temperatursollwerten, Außenluftwechsel sowie innerer Wärmegewinne (Bilder A.1 bis A.3) erfolgten im Hinblick auf ein reales Nutzerverhalten. Für den Fußbodenbelag werden die drei Varianten

- Keramische Fliesen,
- Teppichboden und
- Stabparkett Eiche

gewählt. Eine vollständige Übersicht zum Fußbodenaufbau befindet sich im Anhang B. Wie sich die Wahl des Fußbodenbelages auf das Regelverhalten des Raumes auswirkt, wird am Beispiel der Thermozyklischen Regelung (THZ) im Abschnitt 2.4 dargestellt.

Der Heizenergiebedarf sowie das zeitliche Verhalten von Raum und Fußbodenheizungssystem sind in Abhängigkeit äußerer Einflüsse (Außentemperatur, solare Einstrahlung) und eines vorgegebenen Nutzerverhaltens für eine vollständige Heizperiode (1. September-31. Mai)

## 1. Einleitung

ermittelt worden. Als Regelgröße wurde sowohl die Raumluft- als auch die für die Behaglichkeit maßgebliche Empfindungstemperatur im Raum (operative Raumtemperatur) betrachtet. Die Empfindungstemperatur  $\vartheta_E$  wird dabei zu je gleichen Teilen aus der Lufttemperatur  $\vartheta_L$  und der mittleren Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen  $\vartheta_S$  berechnet, Gl. (1.1).

$$\vartheta_E = 0.5(\vartheta_L + \vartheta_S) \quad (1.1)$$

Bild 1.1 zeigt das der Simulation zugrundegelegte Schaltschema der Heizungsanlage.

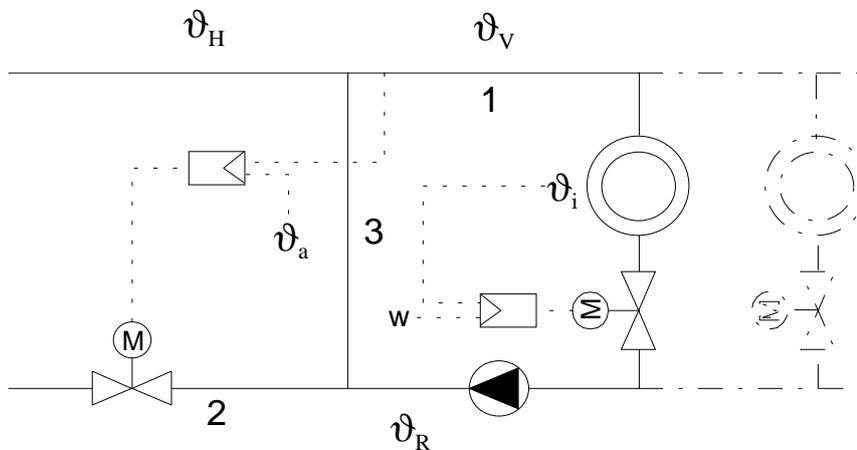


Bild 1.1: Schaltschema für Fußbodenheizung

Es bestehen zwei unabhängige Regelkreise:

- Vorlauftemperaturregelung

Es handelt sich um eine Beimischschaltung mit Drosselventil. Die Vorlauftemperatur  $\vartheta_V$  der Fußbodenheizung kann durch Hubänderung des Stellventiles in der Teilstrecke 2 beeinflusst werden. Der Vorlauftemperatursollwert ist durch die Heizkurve (Bild C.1) vorgegeben. In den Simulationsrechnungen wird für diese Regelung ein PI-Regler eingesetzt. Entsprechend dem Massestromverhältnis in den Teilstrecken 1 und 2 ergibt sich die Vorlauftemperatur nach Gl. (1.2).

$$\vartheta_V = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \vartheta_H + \left(1 - \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}\right) \vartheta_R \quad (1.2)$$

Die Rücklauftemperatur  $\vartheta_R$  ist abhängig von der Auskühlung des Heizmedienstromes beim Durchfließen der im Fußboden verlegten Heizungsrohre. Ihr zeitlicher Verlauf wird unter Berücksichtigung der gegebenen hydraulischen Verhältnisse vom Simulationsprogramm berechnet.

---

- Raumtemperaturregelung

Die Wärmeabgabe der Fußbodenheizung wird durch einen veränderlichen Massestrom geregelt. Das Drosselventil befindet sich im Rücklauf des Heizkreises. Als Regler werden hier der Thermozyklischen Regelung ein PI-Regler bzw. ein 2-Punkt-Regler gegenübergestellt. Dabei wurden folgende Reglereinstellungen gewählt:

- THZ-Regler

keine Einstellung erforderlich

- PI-Regler

Verstärkungsfaktor  $3.9 \text{ K}^{-1}$ , Nachstellzeit 2.38 h

Die gewählten Einstellungen sind Mittelwerte der unterschiedlichen mit Hilfe verschiedener Einstellregeln ermittelten Reglerparameter (Tabelle D.1). Die für die Kenntnis der Streckeneigenschaften erforderlichen Sprungantworten sind für einen periodischen Lastfall aufgenommen worden. Eine entsprechende Darstellung findet sich im Bild D.1.

Aufgrund der in der Praxis bestehenden Unsicherheit bei der Wahl der Reglereinstellung sind mit hoher Wahrscheinlichkeit schlechtere als die hier vorgestellten Reglergebnisse zu erwarten.

- 2-Punkt-Regler

Schaltdifferenz  $\pm 0.5 \text{ K}$

Der Raumtemperatursollwert wird über einen für alle Reglerarten gültigen Zeitplan vorgegeben (Bild A.1). Eine Optimierung der Anheizzeit wird nicht durchgeführt.

Weitere Informationen zur Heizungsanlage sind im Anhang C zu finden.

Es liegen Ergebnisse für jede möglich Kombination von Fußbodenbelag und Reglertyp vor, Tabelle 2.1. Wie sich zeigt, lassen sich qualitative Aussagen zum unterschiedlichen Regelverhalten der Thermozyklischen Heizungsregelung (THZ) im Vergleich zu dem Einsatz eines PI-Reglers (PI) bzw. eines 2-Punkt-Reglers (2P) ableiten, die, unabhängig vom eingesetzten Fußbodenbelag, verallgemeinert werden können. Die im Abschnitt 2.1 grafisch aufgeführten Berechnungsergebnisse beschränken sich aus diesem Grunde auf den gefliesten Fußboden.

In Ergänzung zu der Simulation einer vollständigen Heizperiode mit den sich ständig ändernden Randbedingungen und Störgrößen wird in den beiden Abschnitten 2.2 und 2.3 der Einfluß von sich sprungförmig ändernden Sollwerten bzw. inneren Wärmelasten unter sonst gleichbleibenden äußeren Bedingungen simuliert.

## 2. Ergebnisse

### 2.1. Heizperiode (1. September - 31. Mai)

Aus den mit der Simulation berechneten Werten dienen die im folgenden dargestellten statistischen Größen

- Mittlere Raumlufttemperatur,
- Heizenergiebedarf und
- Mittlerer Betrag der Regeldifferenz

sowie die zeitlichen Verläufe von

- Raumtemperaturen,
- Ventilhub und
- Vorlauftemperatur  $\vartheta_V$

als Grundlage einer Bewertung der drei untersuchten Regelungsarten THZ, PI- und 2-Punkt-Regelung. Eine Quantifizierung der Regelgüte mit Hilfe normierter Verfahren (z. B. IAE-, ISE- oder ITAE-Kriterium [2]) soll hier nicht erfolgen, da einerseits nur quasistationäre Regelzustände erreicht werden können und andererseits aufgrund des für die Thermozyklische Regelung erforderlichen Lernprozesses eine sprunghafte Änderung von Einflußgrößen aus einem einheitlichen stationären oder einem mit den sich bei Verwendung anderer Reglerarten (PI bzw. 2-Punkt) vergleichbaren Raumluftzustand heraus nicht möglich ist.

Die grafischen Darstellungen beschränken sich aufgrund der Analogie der Ergebnisse und den daraus folgenden möglichen Interpretationen exemplarisch auf den gefliesten Fußboden.

Das Bild 2.1 zeigt zunächst einen Vergleich der über die gesamte Heizperiode gemittelten Regelgröße. Dabei wird klar, daß sich die mittleren Raumlufttemperaturen kaum unterscheiden. Die absolute Differenz der drei Regelungsarten untereinander beträgt weniger als 0.03 K. Während der Absenkezeiten werden die Raumtemperaturen vom Regler nicht beeinflußt. Die Abweichung zum Mittelwert der Solltemperatur beträgt daher 0.7 K. Hierbei ist außerdem zu beachten, daß vor allem die solaren Wärmegewinne in der Übergangszeit September-Oktober und April-Mai zum Überschreiten des Raumtemperatursollwertes führen.

Aufgrund des direkten Zusammenhanges zwischen mittlerer Raumtemperatur und Heizenergiebedarf lassen sich auch die im Bild 2.2 dargestellten Werte bestätigen. Der relative Unterschied zwischen dem berechneten minimalen und maximalen Heizenergiebedarf ist mit 0.1% sehr gering.

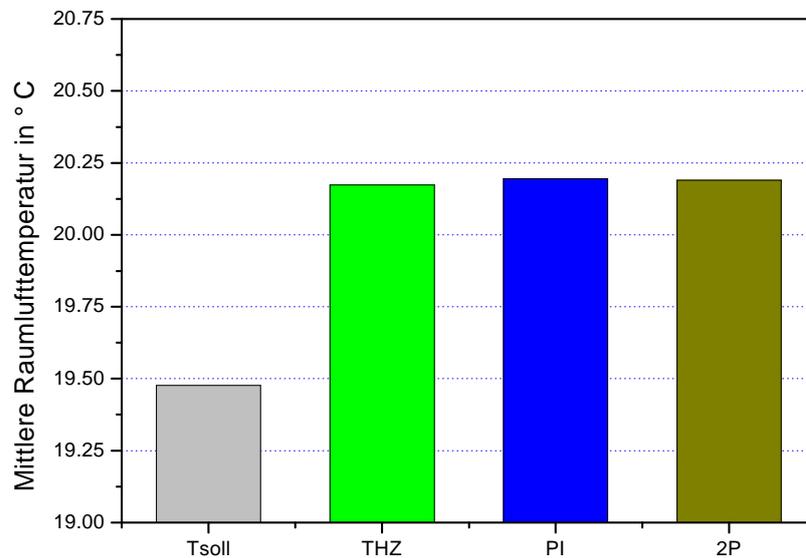


Bild 2.1: Mittelwerte der Raumlufttemperaturen während der Heizperiode

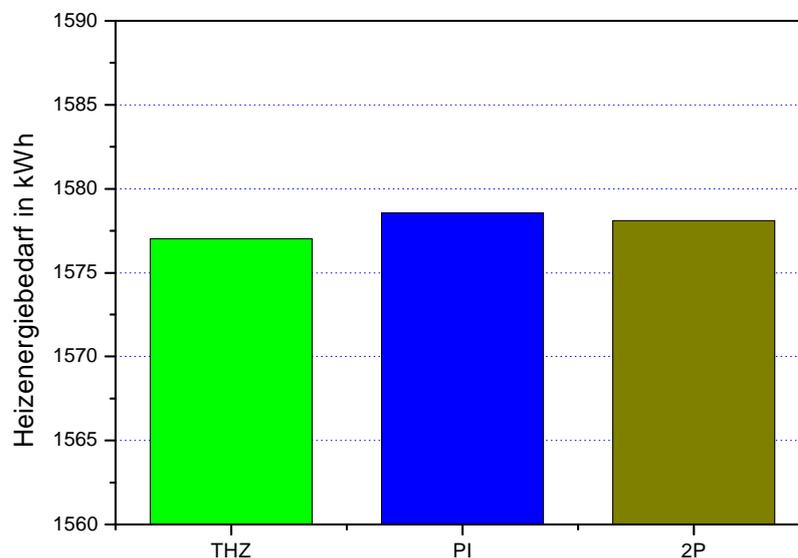


Bild 2.2: Jahresheizenergiebedarf

Aus dem zeitlichen Verlauf der Raumtemperaturen, wie im Bild 2.3 für zwei ausgewählte Tage, Sonntag und Montag, dargestellt, ist zu entnehmen, wie die Regler auf Sollwertände-

## 2. Ergebnisse

rungen und das Einwirken von Störgrößen (innere/äußere Lasten, Luftwechsel) reagieren.

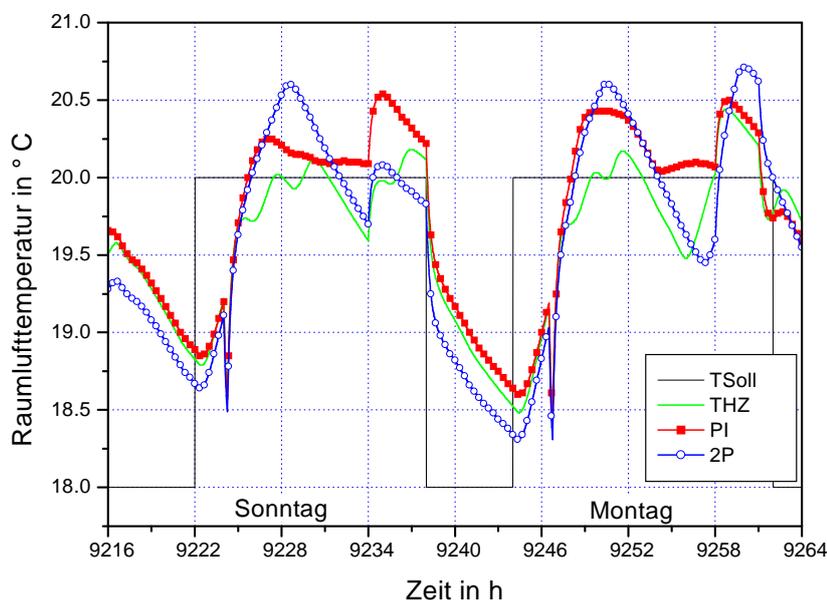


Bild 2.3: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen (Ausschnitt aus Heizperiode)

Gut zu erkennen ist das mit 0.5 K im Vergleich zum PI-Regler stärkere Unterschwingen der Raumlufttemperatur bei der Thermozyklischen Regelung während das Überschwingen mit 0.2 K relativ gering ausfällt. Der Temperaturverlauf bei Einsatz des 2-Punkt-Reglers ist durch ein gleichmäßiges Über- und Unterschwingen der Regelgröße bis zu 0.6 K gekennzeichnet. Inwieweit der Nutzer die in unterschiedliche Richtung vom Sollwert abweichenden Temperaturverläufe als unbehaglich empfindet und durch eine Sollwertverschiebung zu kompensieren versucht kann nicht abgeschätzt werden.

Die Auskühlung des Raumes während der Unterbrechungszeiten beträgt in dem dargestellten Beispiel nur 1.3 – 1.7 K. Der Aufheizvorgang bis zum Erreichen des Sollwertes dauert etwa 3 h.

Wie die Thermozyklische Heizungsregelung das „Wissen“ um die zeitlich verzögerte Reaktion des Raumes umsetzt, wird aus dem Bild 2.4 deutlich, welches die drei unterschiedlichen zeitlichen Verläufe des Ventilhubes, der Stellgröße bei der Raumtemperaturregelung, darstellt. So schließt das Regelventil bei dem Aufheizvorgang bereits vor Erreichen des Sollwertes, um dem Überschwingen der Temperatur entgegenzuwirken, während für konventionelle Regler hier erst eine entsprechende Regelabweichung vorliegen muß.

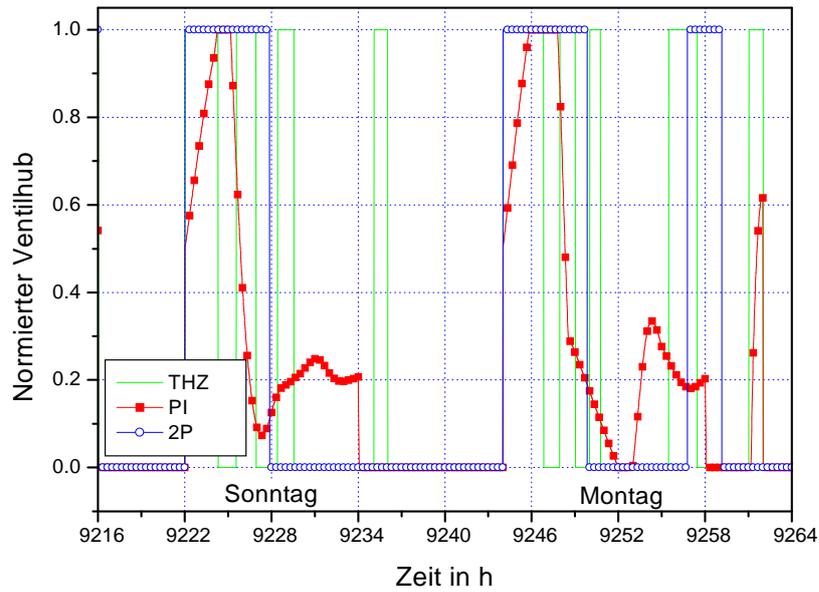


Bild 2.4: Zeitlicher Verlauf der Ventilhübe (Ausschnitt aus Heizperiode)

Im Bild 2.5 ist die Temperatur des Heizmediums am Vorlauf der Fußbodenheizung für jede Regelungsvariante aufgetragen.

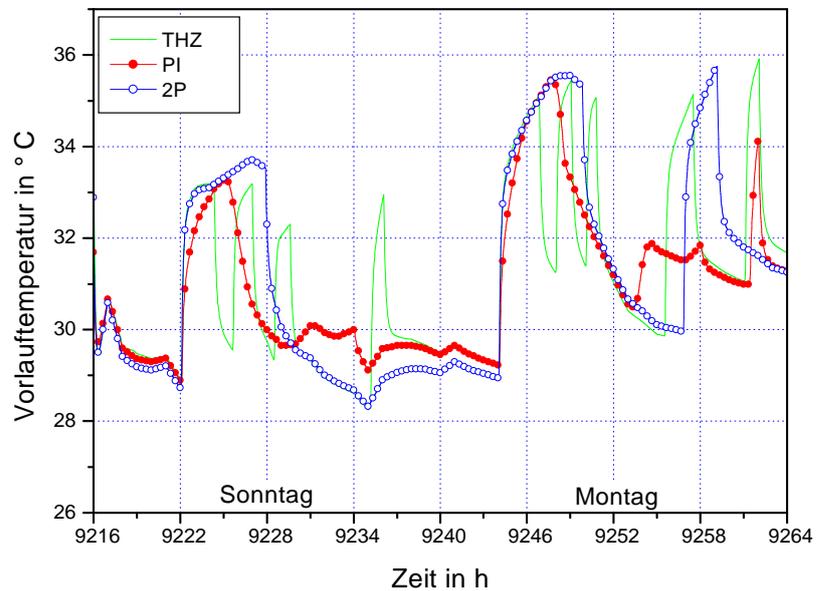


Bild 2.5: Zeitlicher Verlauf der Vorlauftemperatur (Ausschnitt aus Heizperiode)

Ungeachtet der außentemperaturabhängigen Vorregelung der Vorlauftemperatur  $\vartheta_V$  führt das Schließen des Stellventiles im Raumtemperaturregelkreis zu einer Auskühlung des Fuß-

## 2. Ergebnisse

---

bodenheizkreises, so daß sich der zeitliche Verlauf der Ventilhübe mit den schwankenden Vorlauftemperaturwerten deckt. Gut zu erkennen ist der sprunghafte Anstieg der Vorlauftemperatur nach der morgendlichen Sollwertänderung und dem beginnenden Aufheizvorgang.

Als eine weitere Kenngröße für die Qualität der Regelung ist im Bild 2.6 die mittlere absolute Regeldifferenz aufgetragen. Für diese Darstellung wurden nur die im Bilanzzeitraum der Monate November bis März berechneten Temperaturwerte berücksichtigt, um die während der Übergangszeit auftretenden Temperaturerhöhungen infolge solarer Wärmegewinne vernachlässigen zu können.

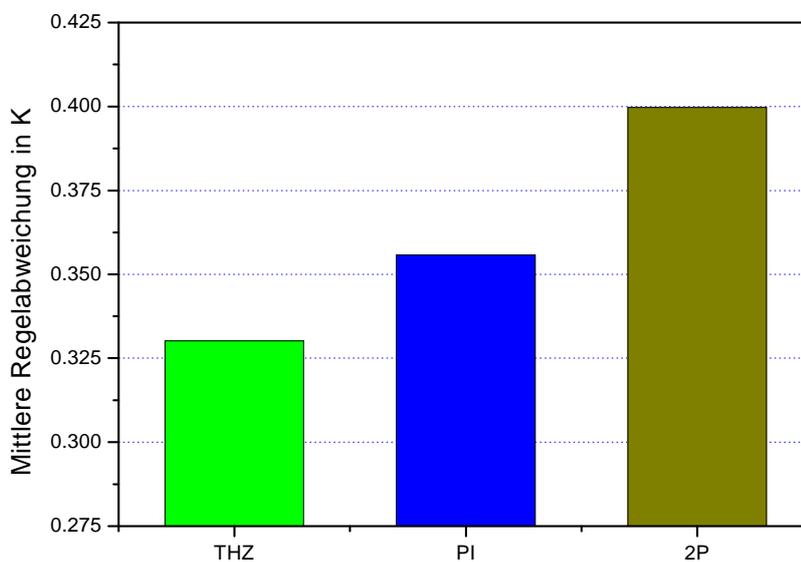


Bild 2.6: Mittlerer Betrag der Regeldifferenz während der Heizperiode (November - März)

Es zeigt sich, daß die mittlere absolute Regeldifferenz unabhängig vom eingesetzten Regelertyp einen nahezu gleichen Wert aufweist. Die maximale Differenz zwischen den einzelnen Reglern ist mit einem Wert von 0.08 K für den Nutzer sehr gering. Es muß an dieser Stelle aber auch darauf hingewiesen werden, daß die Verwendung von Mittelwerten für den Vergleich der Regelgüte nur eingeschränkt möglich ist, da extreme Regelabweichungen nivelliert werden und die Richtung der Regelabweichung nicht erkennbar ist (vgl. Bild 2.3).

## 2.2. Sollwertänderung

Die in dem Bild 2.7 dargestellten Zeitfunktionen veranschaulichen die Reaktionen der Raumlufttemperatur bei sprungförmiger Änderung des Sollwertes für die drei untersuchten Regelmechanismen. Bei dieser Simulation sind alle Randbedingungen konstant. Die Außentemperatur beträgt  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Solare Wärmegewinne treten nicht auf. Die sich periodisch wiederholenden Sollwertänderungen ermöglichen der Thermozyklischen Heizungsregelung das „Erlernen“ einer geeigneten Reaktion auf den vorgegebenen Störgrößeneinfluß.

Das Prinzip der Thermozyklischen Regelung verdeutlicht bei diesem Test seine Eignung zur komfortablen Regelung der Raumtemperatur. Der durch ein periodisches Schwingen gekennzeichnete Raumtemperaturverlauf weist eine Regelabweichung von maximal  $0.15\text{ K}$  auf. Das Unterschwingen der Temperatur ist dabei wieder geringfügig stärker ist als das Überschwingen.

Bei Einsatz des PI-Reglers beträgt die Regelabweichung  $0.1 - 0.3\text{ K}$ . Die Raumlufttemperatur hat während des Regelvorganges einen im Vergleich relativ konstanten Verlauf. Für den 2-Punkt-Regler ergeben sich Werte von etwa  $\pm 0.6\text{ K}$ .

Gegenüber der Simulation unter Beachtung aller Stör- und Einflußgrößen im Abschnitt 2.1 zeigt sich hier beim THZ- und dem PI-Regler eine Verbesserung der Regelqualität.

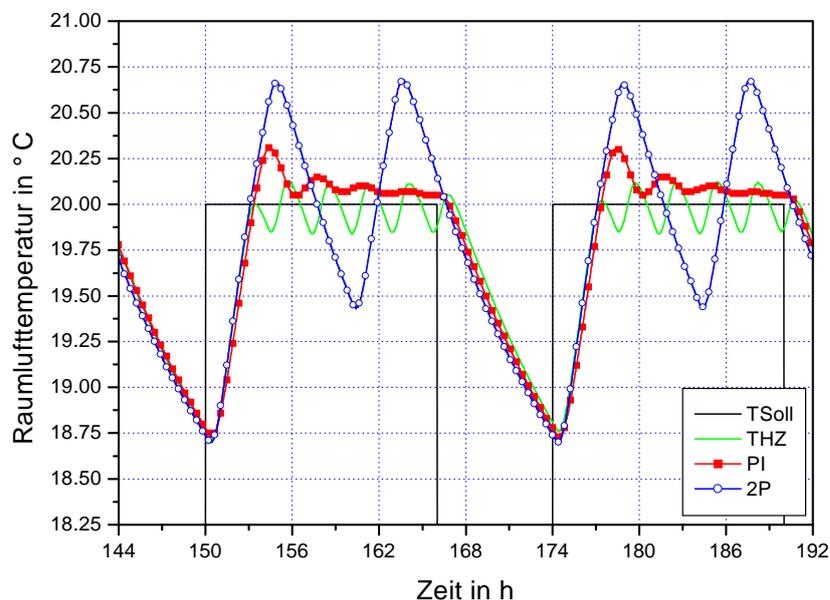


Bild 2.7: Reaktion bei Sollwertsprung (alle Randbedingungen konstant)

Im Bild 2.8 sind die zugehörigen normierten Ventilhubbe, die mit den Reglerausgangssigna-

## 2. Ergebnisse

---

len identisch sind, dargestellt.

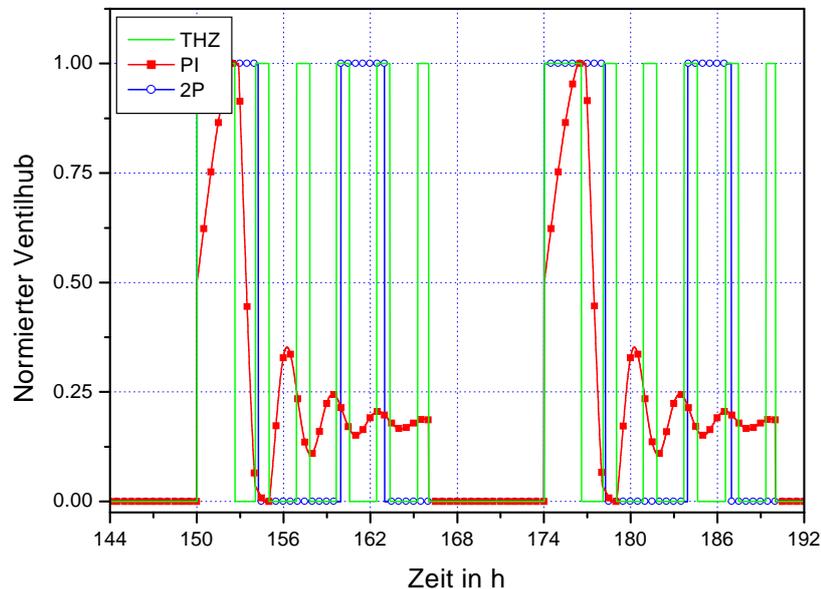


Bild 2.8: Ventilhub bei Sollwertsprung

### 2.3. Änderung der inneren Lasten

Der Raumlufttemperaturverlauf bei sich periodisch ändernden inneren Wärmelasten sowie die den Regelsignalen entsprechenden normierten Ventilhübe des Stellventiles im Raumtemperaturregelkreis sind in den Bildern 2.9 und 2.10 dargestellt. Die Zeitintervalle für das Auftreten innerer Wärmelasten sind gekennzeichnet. Auch bei dieser Simulation blieben alle Randbedingungen konstant. Die Außentemperatur beträgt  $-5^{\circ}\text{C}$ . Solare Wärmegewinne treten nicht auf.

Der PI-Regler zeigt bei diesem Test sehr gute Ergebnisse. Die unmittelbar durch den Wärmeeintrag verursachten Temperaturschwankungen liegen in einem Bereich von  $\pm 0.4\text{ K}$ . Der Störgrößeneinfluss wird relativ schnell auf eine Raumlufttemperaturdifferenz von unter  $0.1\text{ K}$  ausgegelt. Dafür wird nur der halbe zur Verfügung stehende Hubbereich genutzt. Auch die hervorragende Eignung des THZ-Reglers für die komfortorientierte Temperaturregelung wird offensichtlich. Die Schwingungsbreite der Raumlufttemperatur beträgt weniger als  $\pm 0.2\text{ K}$ . Unter dem Einfluß innerer Wärmelasten erhöht sich dieser Wert auf  $0.4 - 0.6\text{ K}$ .

Die maximalen Raumlufttemperaturen, die durch die inneren Wärmelasten verursacht werden sind nicht zwangsläufig ein Gütekriterium der verwendeten Regler. Vielmehr ist ent-

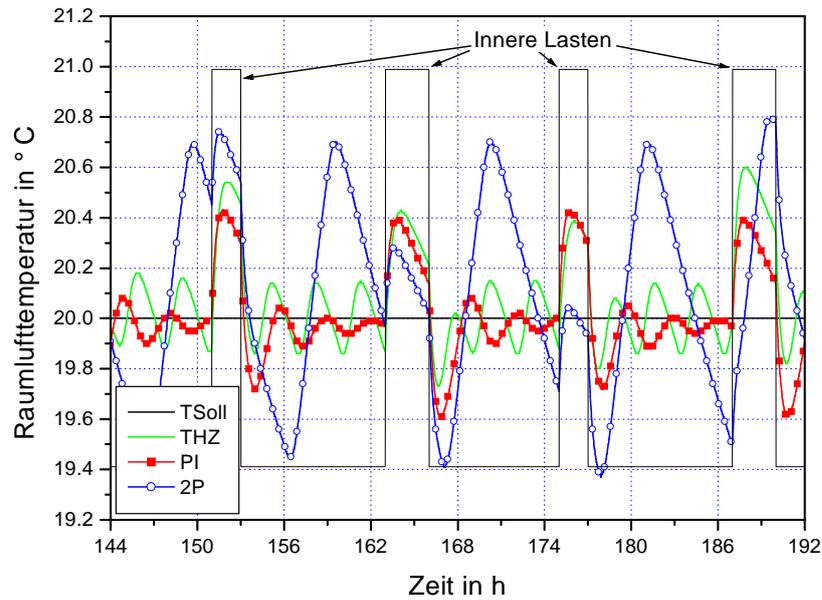


Bild 2.9: Reaktion bei sprungförmiger Änderung innerer Wärmelasten (Raumlufttemperatursollwert 20 °C)

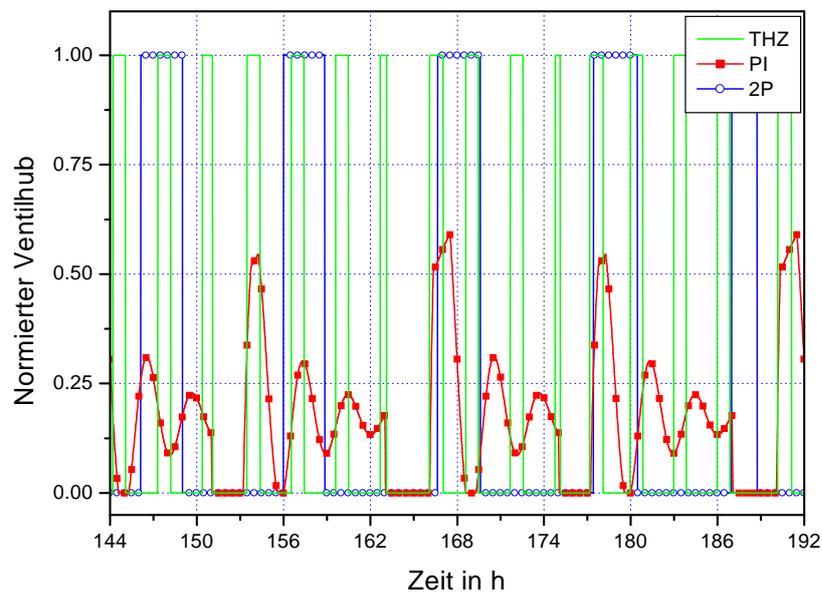


Bild 2.10: Ventilhub bei sprungförmiger Änderung innerer Wärmelasten

scheidend, ob die im Raum frei werdenden Wärmelasten das Aufheizen des Fußbodens überlagern oder durch eine Auskühlphase kompensiert werden können.

### 2.4. Einfluß der Fußbodenbeläge

Der Einfluß der unterschiedlichen Fußbodenbeläge auf die mittlere Regelabweichung  $\Delta\bar{\vartheta}_L$  und den Jahresheizenergiebedarf  $Q_H$  ist aus Tabelle 2.1 ersichtlich. Der für die Raumlufttemperatur an den jeweiligen Reglern eingestellte Sollwert ist in allen untersuchten Fällen gleich.

Bezeichnung	$\Delta\bar{\vartheta}_L$ in K			$Q_H$ in kWh		
	2P	PI	THZ	2P	PI	THZ
Keramische Fliesen	0.400	0.356	0.330	1578.1	1578.6	1577.0
Teppichboden	0.371	0.358	0.326	1629.7	1632.8	1626.1
Stabparkett Eiche	0.385	0.386	0.342	1667.3	1668.2	1659.6

Tabelle 2.1: Ergebnisse für die Heizperiode bei unterschiedlichem Fußbodenaufbau und Reglertyp

Aus den Ergebnissen lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Der Einfluß der Fußbodenbeläge auf das unterschiedliche Regelverhalten der drei untersuchten Reglerarten kann hinsichtlich der mittleren Regelabweichung (maximale Differenz 0.07 K) sowie des Heizenergiebedarfes (Unterschiede von 0.1 – 0.5%) vernachlässigt werden.
- Die Thermozyklische Regelung weist die geringste mittlere Regeldifferenz und den kleinsten Heizenergiebedarf auf.

Wie sich der Raumtemperaturverlauf bei THZ-Regelung je nach Fußbodenbelag ändert ist aus den Bildern 2.11 bis 2.13 ersichtlich. Das Regelverhalten der mit Fliesen bzw. Teppich ausgestatteten Fußböden weist in jedem Fall (Simulation der Heizperiode, sprunghafte Änderung der Sollwerte und sprunghafte Änderung der inneren Wärmelasten) eine hohe Übereinstimmung auf während der Parkettboden zu einem trägeren Verhalten und einem z. T. sehr stark ausgeprägten Unterschwingen der Raumlufttemperatur führt.

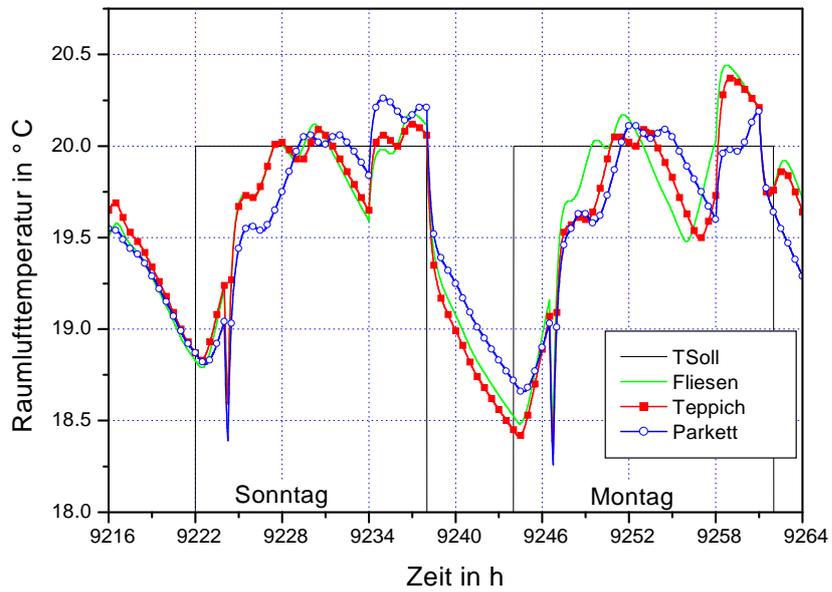


Bild 2.11: Einfluß des Fußbodenbelages bei THZ-Regelung; Ausschnitt aus Heizperiode

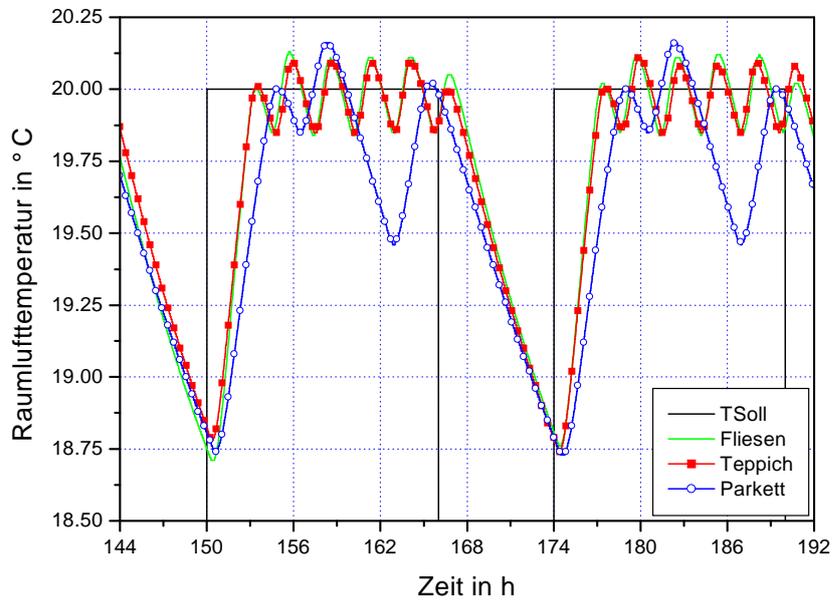


Bild 2.12: Einfluß des Fußbodenbelages bei THZ-Regelung auf die Reaktion bei Sollwertsprung

## 2. Ergebnisse

---

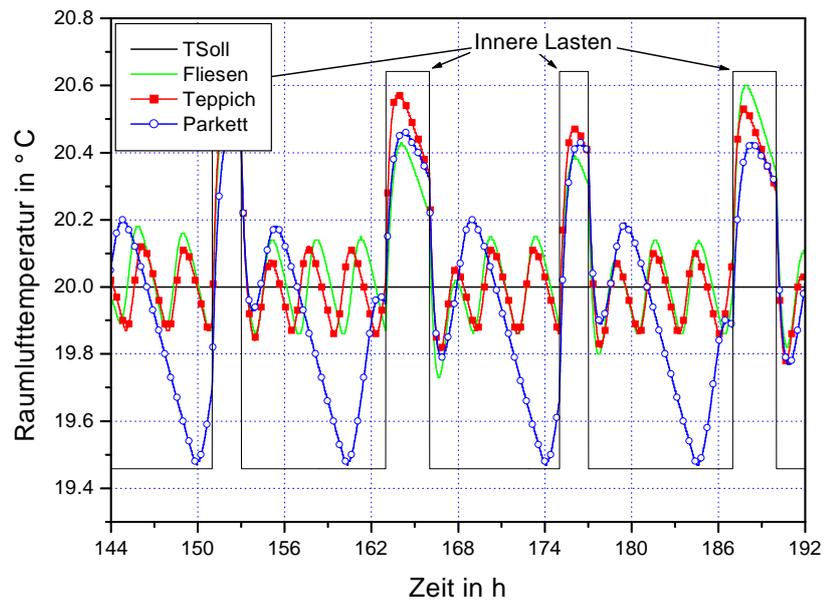


Bild 2.13: Einfluß des Fußbodenbelages bei THZ-Regelung auf die Reaktion bei sprungförmiger Änderung innerer Wärmelasten

---

### **3. Schlussfolgerungen**

Bei einem mit Fußbodenheizung ausgestatteten Raum handelt es sich um eine totzeitbehaftete und stark verzögernde Regelstrecke. Der Einsatz konventioneller Regler (PI-Regler, 2-Punkt-Regler) führt deshalb, je nach Reglereinstellung, zu mehr oder weniger deutlichen Abweichungen von dem vorgegebenen Temperatursollwert. Die Thermozyklische Heizungsregelung (THZ) bietet hier eine empfehlenswerte Alternative zur komfortablen Regelung der Raumtemperatur. Aufgrund der an das Verhalten der Regelstrecke laufend angepaßten Reglerparameter lassen sich die Regeleingriffe auf die voraussichtlichen Reaktionen des Raumes anpassen und die Regelqualität verbessern.

Eine Parametrierung des THZ-Reglers ist nicht erforderlich. Im Hinblick auf die in der Praxis bestehenden Unsicherheiten bei der Reglereinstellung (z. B. PI-Regler) und den damit verbundenen negativen Auswirkungen auf das Betriebsverhalten ist dieser Umstand als besonders vorteilhaft zu bewerten. Eine korrekte Bestimmung der Einstellparameter des PI-Reglers ist für die Installateure problematisch.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Reglerarten auf den Heizenergiebedarf können als vernachlässigbar eingeschätzt werden.

## A. Raumkennwerte

Beschreibung	Wert
Innere Abmessungen	3.6 m × 5.5 m × 2.8 m
Außenwandfläche	18.48 m <sup>2</sup>
Innenwandfläche(adiabat)	65.08 m <sup>2</sup>
Fensterfläche	7.00 m <sup>2</sup>
Verschattungsgrad	0.9
Luftwechsel	Zeitplan Bild <a href="#">A.2</a>
mittlere Außenlufttemperatur während der Heizperiode	5.1 °C
Innere Wärmegewinne	Zeitplan Bild <a href="#">A.3</a>

Tabelle A.1: Parameter Raum

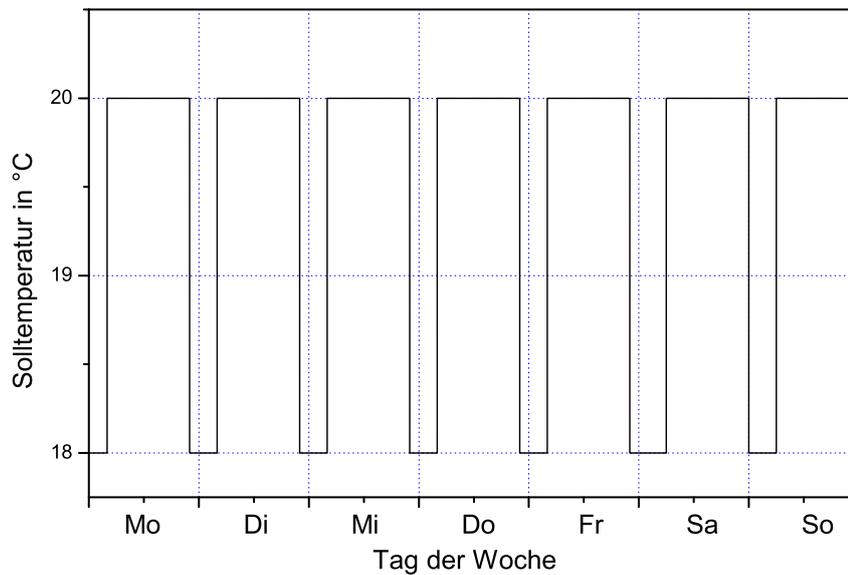


Bild A.1: Wochenplan für Solltemperaturverlauf bei PI- und THZ-Regelung; Sollwert bei TRV-Regelung konstant 20 °C

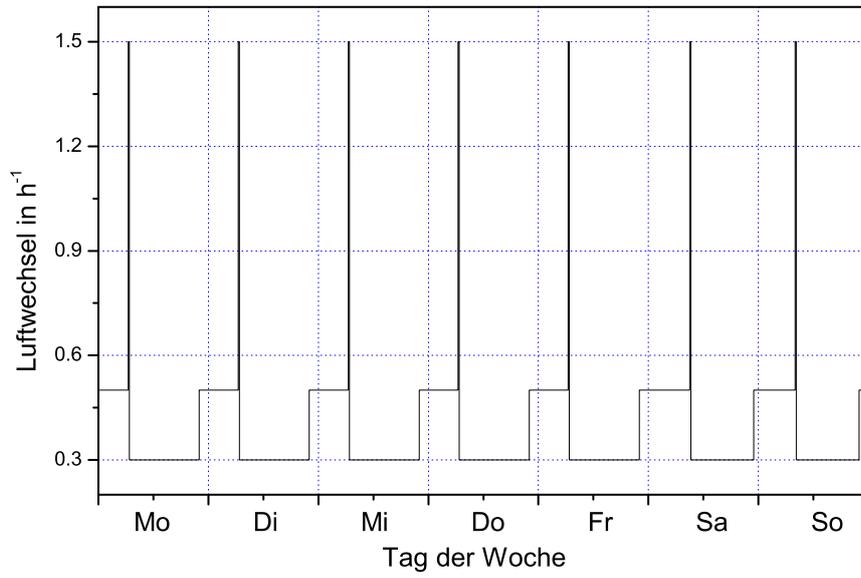


Bild A.2: Wochenplan für Außenluftwechsel

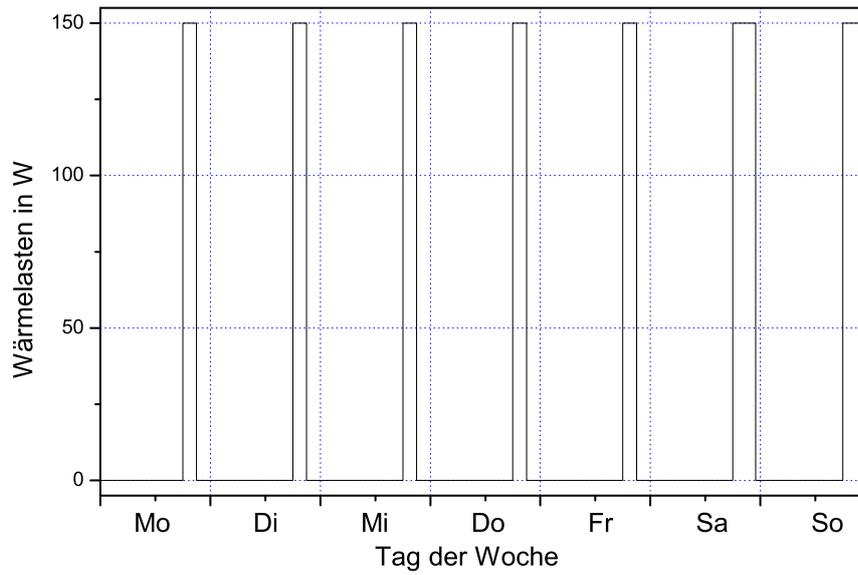


Bild A.3: Wochenplan für innere Wärmelasten

## B. Fußbodenaufbau

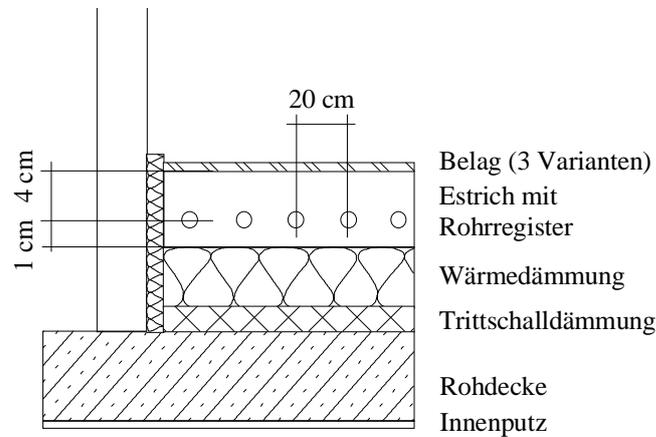


Bild B.1: Fußbodenaufbau

Beschreibung	$d$ in m	$\lambda$ in W/mK	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ in kJ/kg	$R_{\lambda,B}$ in m <sup>2</sup> K/W
Keramische Fliesen	0.013	1.08	1900	1.3	0.012
Teppichboden	0.0056	0.08	500	1.3	0.07
Stabparkett Eiche	0.022	0.21	900	1.3	0.105

Tabelle B.1: Stoffwerte des Fußbodenbelages

Beschreibung	$d$ in m	$\lambda$ in W/mK	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ in kJ/kg
Fußbodenbelag	vgl. Tab. B.1			
Estrich	0.05	1.2	2000	1.0
Heizungsrohre 17 × 2, Rohrabstand 20 cm				
Wärmedämmung	0.03	0.04	80	1.38
Trittschalldämmung	0.02	0.055	40	1.38
Rohdecke	0.16	1.35	2400	1.0
Innenputz	0.015	0.87	1800	1.0

Tabelle B.2: Fußbodenaufbau

## C. Heizungsanlage

Beschreibung	Wert
Auslegungstemperaturen (Vor-, Rücklauf-, Raumtemperatur)	45 °C/40 °C/20 °C
Nennmassestrom	162 kg/h
Heizkurve (mit Nachtabsenkung der Vorlauf-temperatur)	vgl. Bild C.1
Nachtabsenkung	täglich 24. <sup>00</sup> – 4. <sup>00</sup> Uhr

Tabelle C.1: Parameter Heizung

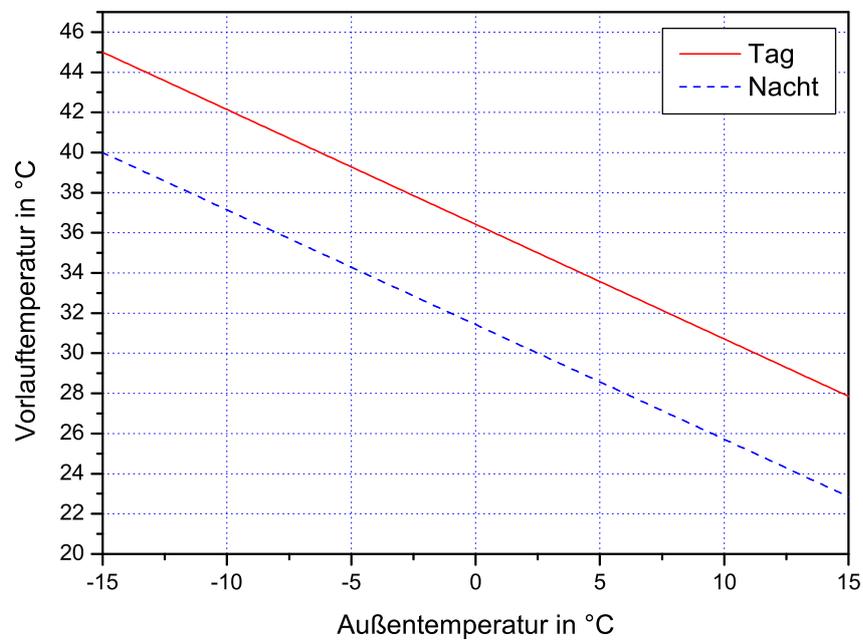


Bild C.1: Heizkurve

## D. Reglereinstellung

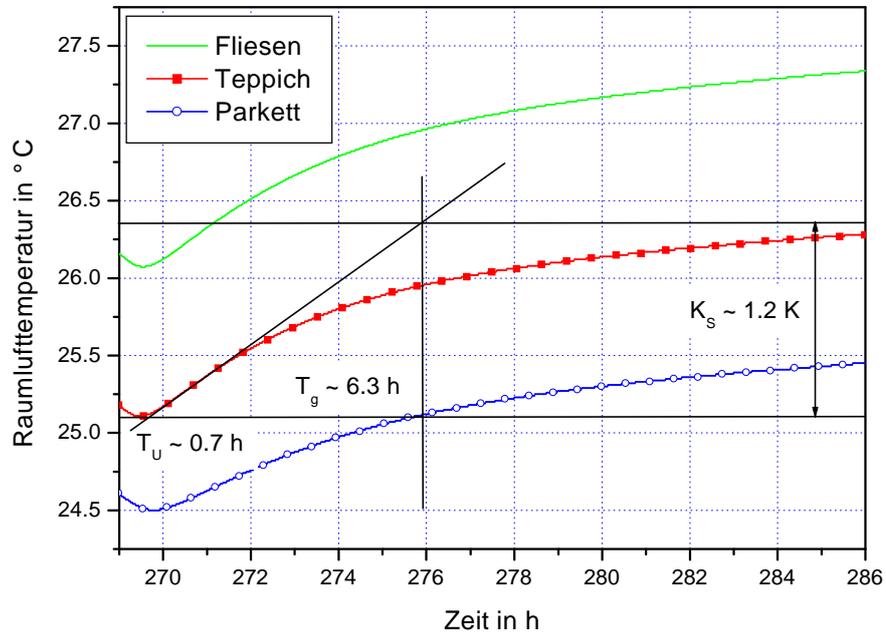


Bild D.1: Sprungantworten für verschieden Fußbodenbeläge

Einstellregeln	$K_R$ in $K^{-1}$	$T_n$ in h
<i>Samal</i>	6.0	2.1
<i>Chien, Hrones, Reswick</i>	2.6-5.3	2.1-7.6
<i>Ziegler / Nichols</i>	6.7	2.3
<i>Oppelt</i>	2.9	2.1
<i>Latzel</i>	1.7	3.3

Tabelle D.1: Kennwerte für PI-Regler

---

## Literatur

- [1] Selbstlernendes Regelverfahren und selbstlernendes Regelsystem zur Regelung einer Temperiereinrichtung. Europäische Patentnummer EP 0935 181 A2, veröffentlicht am 10.08.1999 Patentblatt 1999/32
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN19236 Messen, Steuern, Regeln - Optimierung, Begriffe*. 1977. – Beuth Verlag GmbH
- [3] GLÜCK, B.: *Strahlungsheizung. Theorie und Praxis*. Berlin : VEB Verlag für Bauwesen, 1981
- [4] GLÜCK, B.: *Thermische Bauteilaktivierung*. Heidelberg : C. F. Müller Verlag, 1999
- [5] KOSCHENZ, M. ; LEHMANN, B. ; HOLST, S.: Thermoaktive Bauteilsysteme TABS. Eine einfache und trotzdem genaue Methode zur Modellierung. . – Beitrag am TRNSYS-Usertag 2000, Stuttgart
- [6] NEUBERT, D. ; PERSCHK, A.: Ein Modul zur Heizanlagen simulation in TRNSYS. **In:** *HLH - Heizung Lüftung/Klima Haustechnik* 47 (1996), April, Nr. 4, S. 38,41–44,49. – ISSN 1436–5103
- [7] Transsolar Energietechnik GmbH. Stuttgart: *TRNSYS - a transient system simulation program*. 1996. – Version 14.2, Dokumentation