

Christoph Kempkes, Katrin Schalk, Clemens Felsmann,
Bert Oschatz, Michael Günther

**Energetische Bewertung thermisch
aktivierter Bauteile.
Dynamisch thermische Simulation,
messtechnische Validation,
vereinfachte Bewertungsansätze**



F 2739

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8155-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag



Fraunhofer Institut
Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Abschlussbericht

Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile – dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze

Der Forschungsbericht wurde im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

Aktenzeichen Z6-10.08.18.7 - 06.17 / II 2 - F20-06-009

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Projektleitung: Dipl.-Ing. Christoph Kempkes
Bearbeitung: Dipl.-Ing. Katrin Schalk
Dr.-Ing. Clemens Felsmann (ITG Dresden)
Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz (ITG Dresden)
Dr.-Ing. Michael Günther (Uponor)

Kassel im Dezember 2008

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	11
2	Thermisch aktivierte Bauteile	13
2.1	Allgemeines	13
2.2	Terminologie und Einsatz	13
2.3	Ausführung	14
2.4	Regelverhalten	14
2.5	Zuverlässigkeit, Fehlerpotenzial und Reparatur	15
2.5.1	Wasserverteilung – Rohrwerkstoffe und Zubehör	15
2.5.2	Hydraulik und Regelung	20
2.6	Lebensdauer und Wartung – Kennwerte	22
2.7	Ökobilanz und Lebenszyklusbetrachtung	23
2.8	Entwicklungspotenzial	26
3	Wärmeübergabeverlust	27
3.1	Definition	27
3.2	Nutzungsanforderungen – operative Temperatur	29
3.3	Vorgehensweise bei der Bestimmung – Festlegungen	29
3.3.1	Grundlegende Annahme	29
3.3.2	Heizfall	30
3.3.3	Kühlfall	31
3.3.4	Komfortanforderung im Heiz- und Kühlfall	32
3.4	Bewertung der Energieeffizienz unter Berücksichtigung von DIN EN 15251	32
3.5	Behandlung in der DIN V 18599	34
3.5.1	Übersicht	34
3.5.2	Übergabeverluste im Heizfall	34
3.5.3	Beispielrechnung für den Heizfall	36
3.5.4	Übergabeverluste im Kühlfall	37
3.6	Ergebnisse früherer Untersuchungen	38
3.6.1	TABS mit idealem Zusatzsystem	38
3.6.2	Wärmeübergabe von Flächenheizungen	40
4	Thermische Gebäudesimulation	41
4.1	Einführung	41
4.2	Die Simulationsumgebung IDA	41
4.3	TRNSYS	42
5	Validierung mittels Messwerten	43
5.1	Vorgehensweise	43
5.1.1	Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen	43
5.1.2	Vorhandene Messdaten	44
5.2	IDA-ICE	45
5.2.1	Validation des gesamten Raummodells mit Fußbodenkühlung	45
5.2.2	Ergebnis der Validierung	47
5.3	TRNSYS	48

6	Validierung mit RADTEST	55
7	Modellbildung Referenzfall	59
7.1	Raummodell	59
7.1.1	Geometrie und Bauteile	59
7.2	Nutzungsrandbedingungen	61
7.3	Klimarandbedingungen	62
7.4	Modellierung des TABS	63
8	Ergebnisse Referenzfall	65
8.1	Nutzenergiebedarf für das untersuchte Modell	65
8.1.1	Berechnung nach DIN V 18599	65
8.1.2	Simulationsergebnis	65
8.1.3	Unterschiede zwischen IDA-ICE und TRNSYS	66
8.2	Aufwandszahlen für den Referenzfall	69
8.2.1	Vorgehensweise	69
8.2.2	Ergebnis	71
9	Variantenbildung	73
9.1	Untersuchte Einflussgrößen	73
9.1.1	Innere Last	73
9.1.2	Regelung	74
9.1.3	Bauweise	74
9.1.4	Wärmeschutz	74
9.1.5	Lüftung	75
9.1.6	Sonnenschutz	75
9.1.7	Komfort	75
9.1.8	Betrieb	76
9.1.9	Einbautiefe	76
9.1.10	Kühllast	76
9.1.11	TABS mit idealem Zusatzsystem	76
9.2	Übersicht und Nomenklatur	78
10	Auswertung	81
10.1	Zielwertbetrachtung	81
10.2	Abhängigkeit vom Nutzenergiebedarf	82
10.3	Innere Wärmegewinne	84
10.4	Regelung	84
10.4.1	Vorlauftemperaturregelung	84
10.4.2	Höhe der Vorlauftemperatur	86
10.5	Bauweise	87
10.6	Wärmeschutz	88
10.7	Lüftung	88
10.8	Sonnenschutz	90
10.9	Komfort	90
10.10	Betriebszeiten	92
10.11	Einbautiefe	94
10.12	TABS mit idealem Zusatzsystem	95
10.13	Gesamtübersicht	96
10.14	Zusammenfassung	103

11	Empfehlungen für die Normung	107
11.1	Wärme- und Kälteübergabe im Raum	107
11.2	Verteilung	109
12	Zusammenfassung und Ausblick	110
13	Literatur	113
	Anhang	117
	Anhang - A Eingabedaten und Randbedingungen für IBP18599	117
	Anhang - B Ergebnisse Aufwandszahlen aller Varianten	119
	Anhang - C Ergebnisse Aufwandszahlen TABS Grundlast	123
	Anhang - D Normenvorschlag	126
	Abbildungsverzeichnis	126
	Tabellenverzeichnis	133

Abkürzungsverzeichnis

CE	Conformité Européenne, „Übereinstimmung mit EU-Richtlinien“
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN V	Deutsches Institut für Normung - Vornorm
DIN EN ISO	Deutsches Institut für Normung – Europäische Norm - internationalen Normungsorganisation
FBH	Fußbodenheizung
EIP	Eco - Indicator Punkte
EnEV	Energie-Einsparverordnung
HC	Heating and cooling
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IDA-SE	IDA Simulation Environment
IDA-ICE	IDA Indoor Climate and Energy
IEA	International Energy Agency
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
ITG	Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden
KRM	Kapillarrohrmatte
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
LCC	Life Cycle Costing -Lebenszykluskosten
NMF	Neutral Model Format
PCM	Phase Change Material (Phasenwechselmaterial)
PB	Polybuthan
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
prEN	Europäischer Norm-Entwurf
RADTEST	Radiant Heating and Cooling Test Cases
SHC	Solar Heating and Cooling
TABS	Thermisch aktivierte Bauteilssysteme
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRNSYS	The Transient Energy System Simulation Tool
UBP	Umweltbelastungspunkte
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WRG	Wärmerückgewinnung
ZUB	Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e. V.

1 Einleitung und Zielsetzung

Wasserführende Rohrregister in Betondecken, die im Rahmen dieses Berichts als thermisch aktivierte Bauteilsysteme (TABS) bezeichnet werden, sind mittlerweile weit verbreitet. Besonders zur Raumkühlung werden sie vermehrt in Gewerbe- und Bürogebäuden eingesetzt. Ein Vorteil gegenüber anderen Systemen ist die große Wärme übertragende Fläche. Dies führt zu vergleichsweise geringen Temperaturdifferenzen zwischen dem Raum und dem Wärme übertragenden Medium. Zudem gibt es einen zeitlichen Versatz zwischen Be- und Entladung des Systems. Umweltenergien, die im Tagesverlauf im Vergleich zum anfallenden Bedarf vielfach antizyklisch zur Verfügung stehen, lassen sich so besser nutzen. Bei niedrigen Bedarfswerten lassen sich Gebäude auch mit den TABS beheizen.

Aufgrund der Trägheit der TABS lässt sich die Wärmeabgabe jedoch nur begrenzt regeln. Auf schnelle Lastwechsel (sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall) kann das System lediglich durch den Selbstregeleffekt reagieren. Gleichen sich die Temperaturen der Raumluft und der Bauteiloberfläche einander an, verringert sich der Wärmestrom und es wird somit weniger Leistung übergeben. Vergrößert sich die Differenz zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur hingegen erhöht sich die Leistungsabgabe.

Der Nutzenergiebedarf eines Raumes wird letztendlich durch die Anforderungen des Nutzers bestimmt. Von einem Heiz- und Kühlsystem wird erwartet, die thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Das ideale System tut dies immer, überall und ausreichend. In der Realität gibt es kein System, welches diese Anforderungen mit dem theoretisch minimalen Energiebedarf einhält. Diesen Mehraufwand (tatsächlicher Energiebedarf minus theoretisch erforderlichem Bedarf) quantifizieren die so genannten Übergabeverluste.

Die Normenreihe DIN V 18599 bewertet den Energiebedarf eines Gebäudes. Bei der Berechnung werden die Übergabeverluste miteinbezogen. Für den Heizfall existieren für zahlreiche Systeme, unterschiedliche Regler und Einbausituationen Kennwerte, um die Übergabeverluste zu berücksichtigen. Thermisch aktivierte Bauteile werden derzeit wie Flächenheizungen bewertet. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, mit Hilfe thermischer Simulationswerkzeuge Wärmeübergabeverluste für thermisch aktivierte Bauteile in Anlehnung an die DIN V 18599 zu bestimmen. Für den Heizfall kann auf die etablierte Vorgehensweise zurückgegriffen werden. Wird diese jedoch auf den Kühlfall übertragen ergeben sich für die TABS sehr hohe Übergabeverluste. Daher wird unter Berücksichtigung der Anforderungen des Nutzers an den Komfort eine Vorgehensweise erprobt, die es ermöglichen soll, TABS im Kühlfall mit weiteren Übergabesystemen zu vergleichen.

Zunächst werden die thermisch aktivierten Bauteile und ihre Besonderheiten im Vergleich zu anderen Systemen zur Raumheizung und -kühlung beschrieben (Kapitel 2). In Kapitel 3 folgt eine Diskussion der Aspekte der Wärmeübergabeverluste und deren Behandlung bei der energetischen Bewertung. Die Vorgehensweise der Berechnung im Rahmen der DIN V 18599 wird dokumentiert und beispielhaft angewendet.

Die Variantenuntersuchungen wurden parallel mit zwei Software Tools durchgeführt. Beim Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) kam IDA-ICE zum Einsatz, der Projektbeteiligte, das Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (ITG), nutzte TRNSYS. Die verwendeten Tools werden in Kapitel 4 kurz vorgestellt.

Mittels beim Auftragnehmer vorhandener Messdaten eines Büroraumes wurden Validationen der Rechenprogramme durchgeführt. Dazu wurde in IDA-ICE und TRNSYS jeweils das komplette Raummodell, inklusive Fußbodenheizungen, nachgebildet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dokumentiert.

Im Weiteren folgen die Beschreibung des für die eigentlichen Untersuchungen verwendeten (von dem in der Validierung eingesetzten Modell verschiedenen) Raummodells, die Vorstellung der untersuchten Varianten sowie die Auswertungen.

2 Thermisch aktivierte Bauteile

2.1 Allgemeines

Heutige energieoptimierte Gebäude haben einen vergleichsweise niedrigen Heiz- und Kühlbedarf. In ihnen lässt sich ohne aufwändige Gebäudetechnik ein angenehmes Raumklima erreichen. Dazu müssen folgende Maßnahmen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein: Sehr guter Wärme- und Sonnenschutz, thermische Speicherfähigkeit, Luftdichtheit, Luftwechsel und Wärmerückgewinnung. Wird das Gebäude sorgfältig geplant und werden alle Anforderungen aufeinander abgestimmt, ist es in der Regel möglich, auf aktives Kühlen zu verzichten. Eine Möglichkeit der passiven Kühlung ist die freie Nachtlüftung mit oder ohne maschineller Unterstützung. Solche Konzepte wurden in den letzten Jahren erfolgreich in Büro- und Gewerbebauten umgesetzt. Bei lang anhaltenden Hitzeperioden mit hohen Temperaturen auch in den Nachtstunden reichen diese Maßnahmen jedoch oft nicht aus, um am Tag ein behagliches Raumklima sicherzustellen. Deutlich wirkungsvoller sind thermisch aktivierte Bauteilsysteme (TABS). Bei diesem Konzept werden Rohrregister in die Gebäudestruktur integriert. Zumeist wird Wasser als Medium genutzt, um das Bauteil zu kühlen. Aufgrund der großen Wärme übertragenden Fläche reichen Temperaturen in der Nähe der Raumlufttemperatur aus, um den Raum zu konditionieren. So wird es möglich, die TABS mit ressourcenschonenden regenerativen Energien zu versorgen. Wird zum Beispiel die Kälte aus dem Erdreich genutzt, muss lediglich die Energie zu ihrer Verteilung aufgewendet werden. Gebäude mit geringem Nutzwärmebedarf können mit TABS auch beheizt werden. [1]

2.2 Terminologie und Einsatz

Obwohl das System der wasserführenden Rohrsysteme im Beton schon seit längerem verbreitet ist, hat sich bisher keine einheitliche Bezeichnung etabliert. Je nach Anwendungsfall werden unter anderem Termini wie Betonkernaktivierung oder -temperierung, thermoaktive Bauteilheizung bzw. -kühlung oder eingebettetes Flächenheiz- und Flächenkühlsystem verwendet. Als Oberbegriff scheint sich die Abkürzung TABS durchzusetzen. Ob TABS nun „thermoaktive“ oder „thermisch aktivierte“ Bauteilsysteme sind, bleibt dem Anwender überlassen. Da Estrich und Fußbodenaufbau Ausbauteile sind, die von der Tragkonstruktion zumeist durch eine Dämmung getrennt sind, werden Fußbodenheizungen in dieser Arbeit nicht als TABS bezeichnet. Beide, TABS und Fußbodensysteme werden als bauteilintegrierte Heiz- und Kühlsysteme bezeichnet.

In der Praxis kommen TABS in verschiedenen Systemkombinationen zum Einsatz:

- als reine Bauteilkühlung mit konventionellen Heizsystemen kombiniert
- als einzige Heiz- und Kühlfläche im Raum in Kombination mit einer mechanischen Lüftung oder

- als Grundlastsystem. Aufgrund der thermischen Trägheit und der daraus folgenden eingeschränkten Regelbarkeit kommen ergänzende flinkere Systeme zur bedarfsgerechten Raumregelung zum Einsatz.

2.3 Ausführung

Direkt in den Betonkern der Decken bzw. Böden werden heute Rohre aus vernetztem Polyethylen (PE-X) oder seltener Verbundrohre mit Aluminiumkern gegossen (Bild 2-1). Sie haben üblicherweise einen Durchmesser von 15 bis 20 mm und liegen in Abständen von 10 bis 30 cm meist innerhalb der statisch neutralen Zone. Bild 7-3 auf Seite 63 zeigt das im Rahmen dieses Vorhabens untersuchte System im Schnitt.



Bild 2-1 links: Rohrleitungen zwischen der Bewehrung, rechts: Einbringen des Ortbetons [4].

Aufgrund der Anordnung der Rohrschlangen im Deckenaufbau können unterschiedliche Wärmeleistungen zu unterschiedlichen Zeiten gewählt werden. Alle Schichten mit hohem Wärmedurchgangswiderstand vermindern die Leistungsfähigkeit. So sind abgehängte Decken nicht mit TABS vereinbar. Diese vermindern nicht nur die Wärmeübertragung durch Konvektion, sondern auch den direkten Strahlungsaustausch. Freie Betonoberflächen jedoch sind akustisch „hart“ und es sollten gegebenenfalls zusätzliche schallabsorbierende Flächen vorgesehen werden.

Für das Jahr 2003 wurde der Anteil gewerblicher Neubauten mit geplanter oder realisierter thermischer Bauteilaktivierung auf bis zu ein Drittel geschätzt. [1]

2.4 Regelverhalten

Hohe Ansprüche an einen individuellen thermischen Komfort können allein durch TABS nur begrenzt erfüllt werden. Bei der thermischen Aktivierung von

Bauteilsystemen variieren die Temperaturen innerhalb gewisser Grenzen. So kann also nicht von einem Kühlsystem gesprochen werden, welches die Raumtemperatur bei unterschiedlichen Außen- und Raumzuständen stets zuverlässig in einem definierten Behaglichkeitsbereich (beispielsweise 23-26 °C) hält. Eine Aufklärung aller Beteiligten über Vor- und Nachteile sowie Leistungs- und Betriebsverhalten sollte selbstverständlich sein. [2]

Das Grundprinzip der TABS, eine aktive Speichermasse zur Vergleichmäßigung des Tagesganges der Raumtemperatur einzusetzen, erfordert im Grunde nur eine einfache Regelung. Bei mittleren Wassertemperaturen (20 °C bis 24 °C) um den Sollwert der Raumtemperatur (22 °C bis 24 °C) kann man sich hinsichtlich der Regelung fast allein auf den Selbstregeleffekt verlassen. Folgende Gründe sprechen allerdings dafür, nicht ganz auf eine Regelung zu verzichten:

- Leistungsvariationen durch niedrigere oder höhere Wassertemperaturen
- Vermeidung von Tauwasserausfall aufgrund niedrigerer Wassertemperaturen
- Änderung der Betriebsintervalle vorwiegend zur Energieeinsparung.

Die Regelung sollte ermöglichen, folgende Parameter zu ändern:

- Betriebszeit,
- Wassertemperatur,
- Wassermenge.

Infolge des guten Selbstregeleffektes des Systems genügen meist einfache Regelsysteme. Es ist empfehlenswert, die Außentemperatur in die Regelung der Wassertemperatur einzubeziehen. [4]

2.5 Zuverlässigkeit, Fehlerpotenzial und Reparatur

2.5.1 Wasserverteilung – Rohrwerkstoffe und Zubehör

Hinsichtlich der Rohrwerkstoffe in Flächenheiz- und -kühlsystemen dominieren Kunststoffrohre, vor allem Rohre aus vernetztem Polyethylen (PE-X) eindeutig. Dieser dauerelastische Rohrwerkstoff wird durch das Verdichten des Betons durch Rütteln hoch beansprucht, ohne dass sich Schädigungen nachweisen lassen. Ungeeignet sind stets Rohrwerkstoffe, die sich unter mechanischer Belastung dauerhaft verformen können.

Im weitaus geringeren Umfang werden Kunststoffrohre aus Polypropylen (PP), Polybuten (PB) sowie Kupfer- (Cu) und Mehrschichtverbundrohre (MLCP bzw. MP) eingesetzt. Bauwerksintegrierte Stahlrohre werden hingegen kaum noch eingebaut.

Im Zusammenhang mit den Entwicklungen der Preise in der Baubranche werden gegenwärtig auch wieder unvernetzte Polyethylenrohre (PE-RT) eingesetzt, die man noch vor wenigen Jahren als wenig geeignet angesehen hatte. Diese Rohre sollten deshalb – wenn überhaupt - nur in Systemen mit sehr niedrigen Heizwassertemperaturen eingebaut werden. Vor allem besteht jedoch die Ge-

fahr der Beschädigung während der Montage, wenn mechanische Einwirkungen nicht ausgeschlossen werden können.

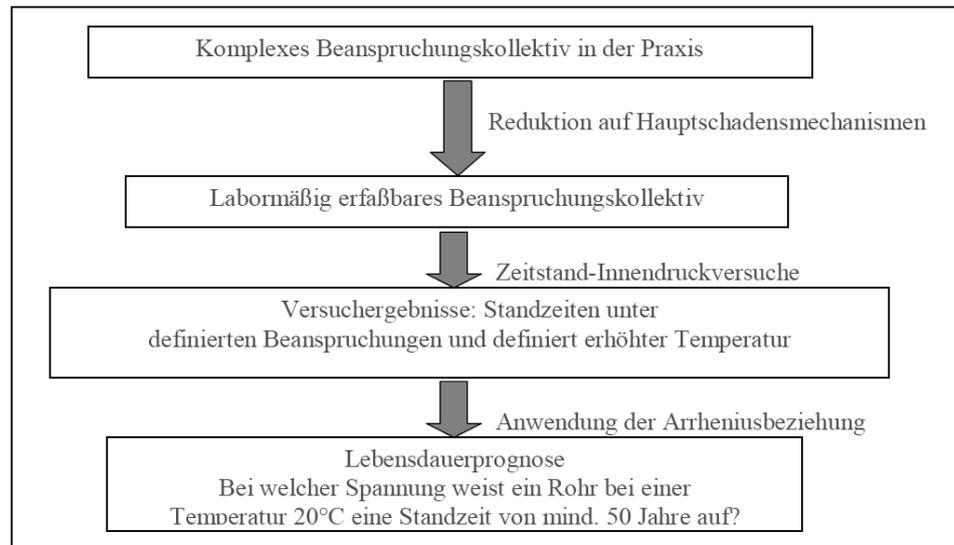
Im Rahmen der Planung und Ausführung sind besondere Maßnahmen für diejenigen Rohrleitungen zu treffen, die einen vom Baustoff Estrich oder Beton gravierend abweichenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweisen. In diesem Sinne ist die gerade Länge eines Estrich umschlossenen Kupferrohres begrenzt und die Bögen müssen abgepolstert werden.

Zur Beurteilung der Eignung eines Rohrwerkstoffes für die Montage innerhalb eines Bauteils und den Betrieb als Flächenheizung werden folgende grundlegenden Bewertungsgrößen herangezogen:

- Zeitstands - Innendruckfestigkeit unter Berücksichtigung des Rohrwerkstoffes, der Wanddicke, der Temperatur und des Druckes Bezugnahme auf 100 Jahre nach der Norm
 - Langzeitversuche bei Temperaturen bis 95°C
- Kerbschlagzähigkeit und Spannungsrissbildung
 - Tests hinsichtlich der Auswirkungen von Beschädigungen der Heizrohr-oberfläche
 - PP – Rohre schadensträchtig, deshalb hier Warmverlegung
 - PE-X Rohre aufgrund der Raumnetzgitterstruktur sehr widerstandsfähig
- Alterungs- und ggfs. UV-Strahlungsbeständigkeit
 - Entgegenwirken einer Versprödung infolge thermischer Oxidation und UV-Strahlung (Rohre verpackt lagern)
 - Schutz gegen Auswaschen der Stabilisatoren durch fließendes Wasser
- Beurteilung der Lebensdauer unter realistischen Baubedingungen:
 - ergänzende Untersuchungen zu den idealisierten Laborversuchsbedingungen.

Im Rahmen der (Kunststoff-)Rohrproduktion werden deshalb spezielle Verfahren angewandt, damit die Rohre der Lebenserwartung des Baukörpers entsprechen. Hierzu zählen z.B. Thermostabilisierung, Zugabe von Antioxidantien, ggfs. Zuschlagstoffe wie Graphit zum Erreichen einer UV-Beständigkeit etc.

Die Vorgehensweise für die Lebensdauervorhersage von Kunststoffrohren lässt sich grob wie folgt darstellen:



Folgende Auswahl an Normen für verschiedene Versuche zur Lebensdauer-
vorhersage sollen hervorgehoben werden:

- DIN EN ISO 9080 „Materialuntersuchung am Probekörper Rohr“
- DIN 8075 „Rohre aus Polyethylen hoher Dichte“
- DIN EN ISO 1167-1 „Rohre, Formstücke und Zubehör aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren“
- DIN EN ISO 2578 „Bestimmung der Temperatur-Zeit-Grenzen bei lang anhaltender Wärmeeinwirkung“
- IEC 60216 „Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials - Choice of test criteria“
- DIN EN ISO 899 1 und 2 „Zeitstandzug- und Zeitstandbiegeversuch“ .
- DIN EN 1902 „Zeitstandscherversuche“ .

Aus bisherigen Untersuchungen und Erfahrungen kann folgende Quintessenz abgeleitet werden: Die Lebensdauerprognose an Kunststoffrohren kann aufgrund langjähriger Erfahrung im Bereich bis 50 Jahre unter der Beachtung bestimmter Randbedingungen als gesichert betrachtet werden. Im Bereich der Lebensdauerprognose bis 100 Jahre können sich bisher vernachlässigte Einflussgrößen gegebenenfalls stärker auswirken.

Um eine Lebensdauer von 100 Jahren eines Kunststoffrohrleitungssystems in der Praxis zu erreichen, ist für eine genaue Analyse der Einsatzbedingungen sowie sorgfältige Planung und Installation zu sorgen. Gegebenenfalls ist die vorhergesagte Lebensdauer durch Abminderungsfaktoren zu reduzieren.

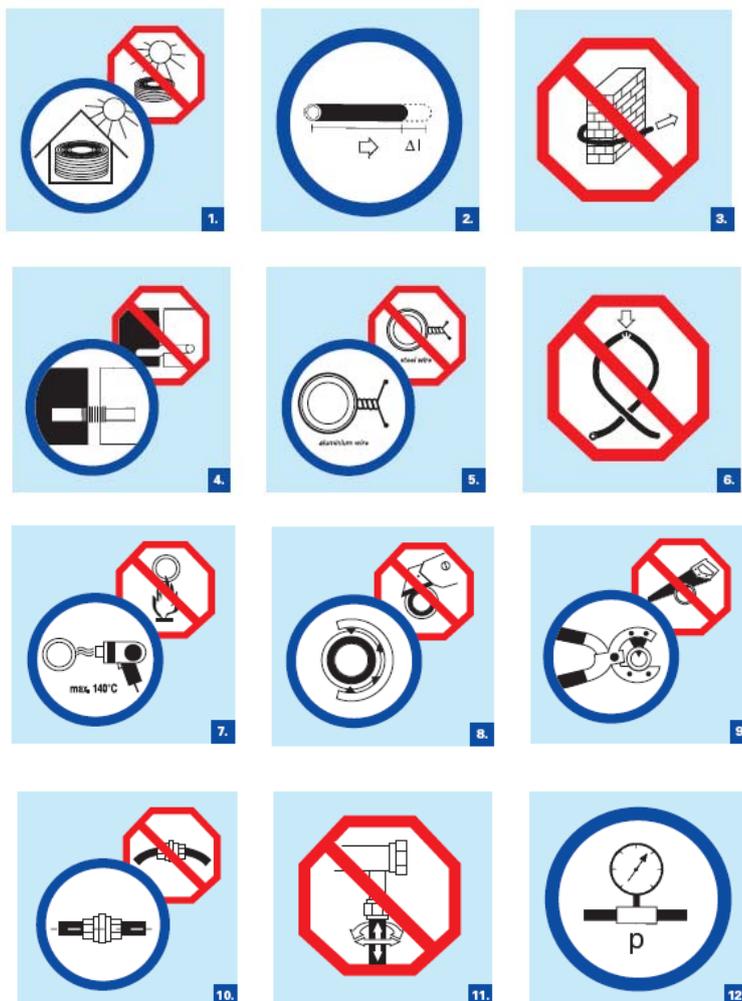
Die weit reichenden und ausgereiften Gütesicherungssysteme in Deutschland tragen einen großen Anteil zur Sicherung der Qualität und somit auch der zu erwartenden Lebensdauer von Kunststoffrohrleitungssystemen bei. Es ist allerdings notwendig durch ständige Weiterentwicklung die verschiedenen, gleich-

zeitig ablaufenden Alterungsmechanismen in Kunststoffrohren zu beobachten, erfassen und mathematisch zu beschreiben.

Neben den unter Laborverhältnissen gewonnenen Erkenntnissen zur Lebensdauer ist das Betrachten mechanischer Beanspruchungen der Rohre unter rauen Baustellenbedingungen zu analysieren. Die mechanische Beanspruchung reicht dabei vom Kontakt des Rohres mit den geriffelten Bewehrungsseisen des Betons bis zum Verdichten des Baustoffes mit Rüttlern.

Die Hersteller von Kunststoffrohren (PEX) geben folgende, grafisch dargestellte Montagehinweise und weisen damit auch auf typische Materialeigenschaften hin (Bild 2-2):

- 1** UV-Schutz, **2** Thermische Längenänderung, **3** Abrollvorrichtung, **4** Fugenquerung, **5** Rohrbefestigung, **6** Rohrknickstellen, **7** Beseitigen der Knickstellen, **8** Schneiden des Schutzrohres, **9** Schneiden des Rohres, **10** Rohrverbinder, **11** Verteileranschlussverbinder, **12** Druckprobe, **13** Lösungsmittel, **14** Frostschutz, **15** Verwertung/Recycling



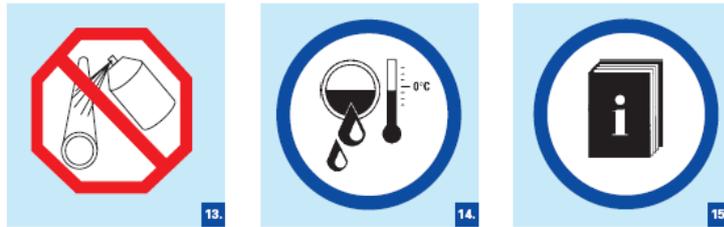


Bild 2-2: Montagehinweise für PEX – Rohrsysteme.

Besonderer Wert ist auf die Sauerstoffdichtheit der Rohre zu legen. Damit werden Korrosionsschäden an metallischen Einbauten im Heizsystem vermieden. Als sauerstoffdicht nach DIN 4726 gelten sowohl Kupfer- und Mehrschichtverbundrohre als auch Kunststoffrohre mit geeigneter Sauerstoffdiffusionssperrschicht.

Die Kunststoffrohre werden danach als sauerstoffdiffusionsdicht eingestuft, wenn entsprechend der Vorgabe der DIN 4726 ein Grenzwert von 0,10 mg/(m³.d) Sauerstoff, bezogen auf 40°C und das innere Rohrvolumen, nicht überschritten wird. Sollten Rohrwerkstoffe eingesetzt werden, die nicht sauerstoffdiffusionsdicht sind (z.B. Kapillarrohrmattensysteme), so gelten folgende Forderungen:

- Systemtrennung mit Hilfe eines Wärmeübertragers
- Einbau nichtkorrosiver Bauteile im Sekundärnetz.

Rohrschäden können durch Anbohren während des Innenausbau oder durch Einfrieren des Wassers in Winterbaustellen (Bild 2-3) auftreten.

Deshalb sollte die Rohrlage exakt vermerkt oder geortet werden. Auf Frostschutz (Beigabe von Glykol sowie vor dem Heizbetrieb notwendiges Entfernen zum Vermeiden von Korrosion in der Anlage) oder besser Frostfreiheit ist zu achten.

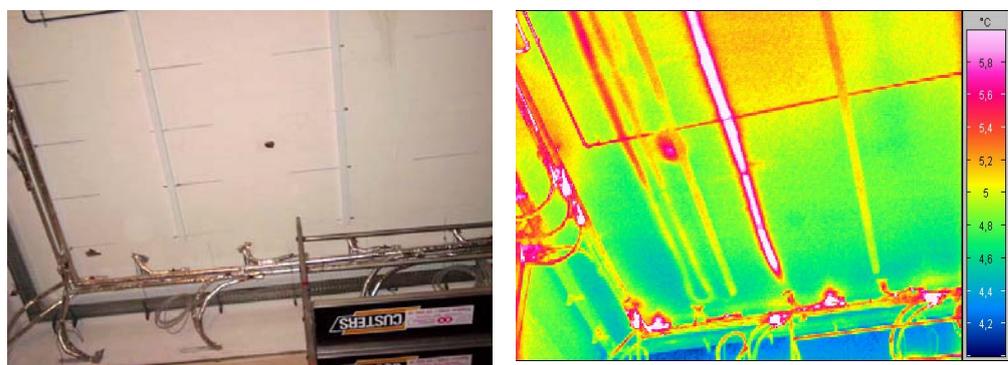


Bild 2-3: Frostschaden und Thermogramm einer thermisch aktivierten Decke.

Für den Fall eines Rohrschadens mit Wasseraustritt im Baukörper, bemerkt über einen Druckabfall im Heiz- bzw. Kühlsystem, stehen im Wesentlichen folgende Leckage - Ortungstechniken zur Verfügung:

- Anfertigen eines Thermogramms (Thermografie).
- Auflegen einer temperaturempfindlichen HS – Monitor – Folie.
- Scannen der Oberfläche mit einem Ultraschallmessgerät (Bosch Wallscanner).
- akustische Verfahren.

Ein beschädigtes Kunststoffrohr ist zu reparieren, indem ein neues Rohrstück eingesetzt wird. Dieses kann nach DIN 4726 sowohl mit lösbaren (Klemmverbindern nach DIN 8076) als auch mit unlösbaren Verbindungen (Pressfittings) eingesetzt werden.

Fittings und Rohr sind vom Hersteller auf dauerhafte Dichtheit prüfen (Zeitstands - Innendruckversuch und Temperaturwechselbelastung) und sollten auch aus Haftungsgründen vom gleichen Hersteller sein, der die Fertigungstoleranzen beider Komponenten aufeinander abstimmt. Die Fittings dürfen nur in geraden Rohrleitungsabschnitten eingebaut werden.



Bild 2-4: Während des Innenausbaus beschädigtes (links) und repariertes Rohr.

Hierzu abschließend soll auf neue europäische Normen, Verordnungen und Richtlinien hingewiesen werden. Dazu zählen u. a. folgende:

- Europäische Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG.
- DIN EN 15015 – Kunststoff – Rohrleitungssysteme für Warm- und Kaltwasser nicht für den menschlichen Gebrauch – Eigenschaften für die Gebrauchstauglichkeit von Rohren, Formstücken und deren Verbindungen.
- CE – Kennzeichnung von Kunststoff – Rohrleitungssystemen.

2.5.2 Hydraulik und Regelung

Das Planen und Betreiben der TABS -Hydraulik und -Regelung unterliegt im Vergleich zu anderen Wasser führenden Systemen keinen besonderen Anforderungen. Dennoch soll auf folgendes Fehlerpotenzial hingewiesen werden:

- Fehlerhafte Hydraulikkonzepte

Die benötigten Wassermasseströme sind für den Heiz- und Kühlfall festzulegen. Das Festlegen der optimalen Betriebsweise der Umwälzpumpe muss dabei durchaus unterschiedliche Druckverluste einzelner Komponenten (z.B. Heizkessel und Kaltwassersatz) und den Teillastbetrieb (z.B. Abschalten einzelner Kreise) berücksichtigen.

Anlagenhydraulik und (raumweise) Leistung der TABS sind aufeinander abzustimmen. Das gilt vorrangig für die Wahl der Systemtemperaturen, insbesondere der Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur.

Ausgedehnte Rohrleitungssysteme sind mit geeigneten, nach der Wirtschaftlichkeit bemessenen Wärmedämmsystemen auszustatten.

Im Zusammenhang mit der freien Kühlung über Erdwärmesonden oder Rückkühler ist deren erzielbare Vorlauftemperatur mit der für das Betreiben der TABS notwendigen Vorlauftemperatur zu vergleichen.

- Unterlassener hydraulischer Abgleich

Rohrregister bzw. einzelne Heiz- und Kühlkreise sind gemäß VOB und weiteren Vorschriften hydraulisch abzugleichen. Hierzu sollte eine Fachunternehmererklärung abgegeben werden.

- Verschlammungs- und Korrosionsprobleme

Es sind normgemäß (z.B. prEN 15377, prEN 1264, DIN 4726) nur sauerstoffdichte Kunststoffrohre einzusetzen, die zu keiner besonderen Anforderungen hinsichtlich des Korrosionsschutzes der Anlage führen. Bei Verwendung nicht sauerstoffdiffusionsdichter Werkstoffe (z.B. PP-R bei Kapillarrohrmatten) sind die Systemtrennung und sekundärseitige Verwendung korrosionsunanfälliger Werkstoffe geboten.

Bei weit verzweigten Rohrleitungssystemen großer Leitungslängen mit unterschiedlicher Rohrwerkstoffen kann die Wasserbehandlung eine gleich bleibend gute Wasserqualität unterstützen. Jedoch wird auch oft auf Wasserzusätze verzichtet, deren Dosierung nicht in gleich bleibender Qualität gesichert werden kann.

- Fehlerhafte Regelungsstrategien

Gebäudeleittechniker, Betreiber und Nutzer sind über die Bauvorhaben bezogene Regelstrategie zu unterrichten.

Die Betriebsführung sollte über 2 Jahre kontrolliert und auf die realen Verhältnisse des genutzten Objekts angepasst werden.

Eine präzisierte Regelstrategie ergibt sich im Zusammenhang mit geplanten Absenk- oder Abschaltzeiten. Hierbei müssen die Energieeinsparung und das Erreichen thermischer Behaglichkeit zu Nutzungsbeginn nach dieser Phase in Übereinstimmung gebracht werden.

Das simultane Heizen und Kühlen einzelner Gebäudezonen ist grundsätzlich auszuschließen.

Flächenkühlsysteme erfordern die Taupunktkontrolle und die darauf abgestimmte Betriebsweise. Es ist sowohl über die Regeltechnik (z.B. Taupunktfühler in einem Referenzraum oder Montage mehrerer Taupunktwärter) als auch die geeignete Betriebsweise (z.B. Anheben der Vorlauftemperatur oder Abschalten des Kühlkreises bei Kondensationsgefahr an der Bauteiloberfläche) zu befinden.

2.6 Lebensdauer und Wartung – Kennwerte

Es ist erforderlich, als Grundlage der wirtschaftlichen Planung und Nutzung eines Gebäudes, zunächst eine Vorstellung über den Lebenszyklus des Gebäudes zu entwickeln, um dann dessen Eigenschaften danach auszurichten.

Hierzu zählt vor allem die Gestaltung der Bauteile. Im Idealfall entspricht die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Gebäudes der technischen Lebensdauer der Bauteile oder einem Vielfachen davon. Aus genau diesen Überlegungen heraus hat PFARR [23] bereits vor vielen Jahren an folgendem Beispiel gezeigt, wie aus der technischen Lebensdauer bestimmter Bauteile die wirtschaftliche Nutzungsdauer (in der Abb. 3 als angenommene wirtschaftliche Lebensdauer bezeichnet) abgeleitet werden kann. In diesem Sinne wird für Gewerbebauten festgestellt: Je höher der Anteil technischer Anlagen ist, desto kürzer ist die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Gebäudes anzusetzen. Thermisch aktive Bauteile verkörpern demnach einen relativ geringen TGA - Anteil am Gebäude und sind zudem langlebiger als alternative Systeme zur Raumheizung und -kühlung.

Kosten = 100%		n = angenommene wirtschaftliche Lebensdauer in Jahren	% - Wert vom abschreibungsfähigen Betrag
Gebäudeanteil	Anlagenanteil		
85	15	33	3,0
75	25	31	3,2
70	30	29	3,4
60	40	27	3,7
50	50	25	4,0
40	60	22	4,5
30	70	20	5,0

Bild 2-5: Die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Gewerbebauten in Abhängigkeit vom Anteil technischer Anlagen nach PFARR [23].

Der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ des Bundesministeriums für Verkehrs-, Bau- und Wohnungswesen [21] enthält Richtwerte für die Lebenserwartung der

Bauteile bzw. Bauteilschichten von Gebäuden. Tabelle 2-1 enthält Angaben zu Komponenten der TGA.

Tabelle 2-1: Lebenserwartung von TGA – Komponenten (Richtwerte) [21].

Bauteil / Bauteilschicht		Lebenserwartung von – bis [a]	mittlere Lebenserwartung [a]
36.	Heizungsanlagen		
	Brennstoffbehälter	15 – 30	20
	Brenner mit Gebläse	10 – 20	12
	Zentrale Wassererwärmer, Heizkessel	15 – 25	20
	Erdwärmetauscher	50 – 80	60
	Pumpen, Motoren, Wärmepumpen	10 – 15	12
		30 – 50	40
	Heizleitungen	30 – 30	25
	Heizflächen und Armaturen	10 – 15	12
	Mess-, Steuer-, Regelanlagen		
37.	Raumluftechnische Anlagen		
	Raumluftechnische Geräte	10 – 20	15
	Raumluftechnische Kälteanlagen	10 – 25	15
	Wärmerückgewinnungsanlagen	15 – 25	20
	Filteranlagen, allgemein	12 – 20	15
	Mess-, Steuer-, Regelanlagen	10 – 20	15
	Luftleitungen	30 – 40	35

Die Lebensdauer der Kunststoffrohre ist normgemäß mit 100 Jahren bedeutend länger als die angegebenen 30 Jahre. Der Wartungsaufwand besteht im gelegentlichen Spülen der Gesamtanlage.

Die Lebensdauer einer Wärmepumpe und auch eines Kaltwassersatzes ist u. a. von den Schaltzyklen des Verdichters und der Einhaltung der Mindestlaufzeiten abhängig. In der Regel hat der Verdichter eines Kältekreislaufes eine Lebensdauer von ca. 40.000 Betriebsstunden. Dies entspricht bei 2000 Volllaststunden pro Jahr einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren.

Der Wartungsaufwand für Wärmepumpen und Kaltwassersatzes ist im Regelfall weit geringer als nach VDI 2067 prozentual in Abhängigkeit der Leistungsgröße ausgewiesen.

2.7 Ökobilanz und Lebenszyklusbetrachtung

Thermisch aktive Bauteilsysteme, bestehend aus fest mit dem Baukörper verbundene Rohre oder Rohrregister einschließlich Fittings, Verteiler/Sammler und Zubehör können unter folgenden Aspekten bewertet werden:

- Energetischer Aufwand von der Herstellung (sog. graue Energie) über die Nutzung bis zu Ausbau, Entsorgung bzw. Recycling
- Ökobilanz des Systems (Belastung von Luft, Erde und Wasser)
- Lebenszyklusbetrachtung (Life Cycle Costs).

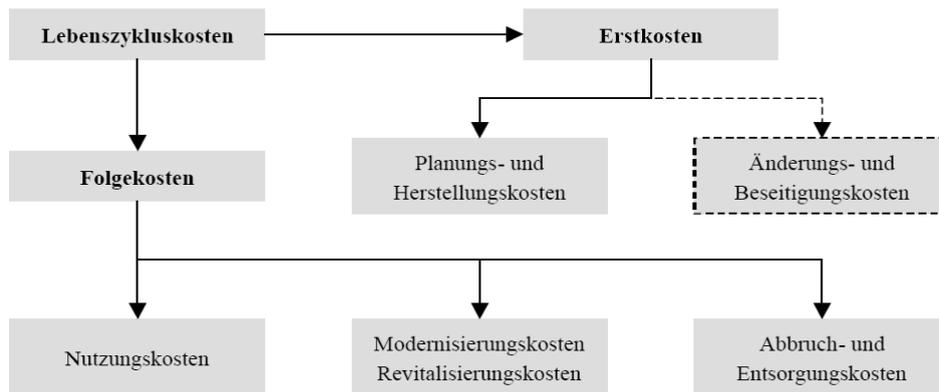


Bild 2-6: Gliederung der Lebenszykluskosten von Gebäuden nach GRAUPNER & RIEGEL [22].

Die Lebenszykluskosten LCC können wie folgt berechnet werden:

$$LCC = E + \sum_{i=1}^m N_i + \sum_{j=1}^n M_j + \sum_{k=1}^o R_k + A \quad [€] \quad (2.1)$$

hierin sind:

LCC	Lebenszykluskosten	E	Entwicklungs- und Erstellungskosten
N	Nutzungskosten	m	Anzahl der Nutzungsphasen
M	Modernisierungskosten	n	Anzahl der Modernisierungen
R	Revitalisierungskosten	o	Anzahl der Revitalisierungen
A	Abbruch- und Entsorgungskosten		

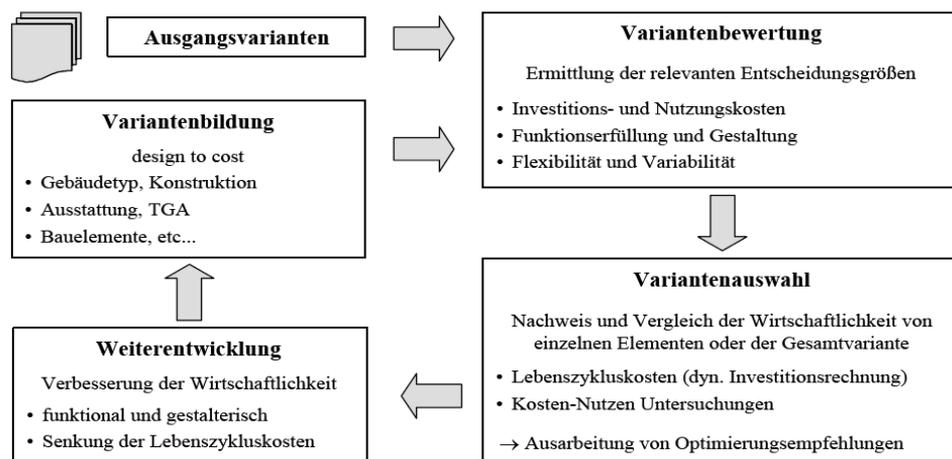


Bild 2-7: Ablauf einer lebenszyklusorientierten Planung nach MÖLLER

Ökobilanz verschiedener Rohrwerkstoffe (Untersuchung von Geberit)

Nachfolgende Darstellungen aus Untersuchungen eines Systemherstellers beziehen sich auf die Rohrwerkstoffe PE-X (Kunststoff), Mehrschichtverbundrohr (PE – Al – PE), Kupfer verzinkter Stahl und Edelstahl. Die Rohre mit einem Innendurchmesser von 20 mm sollen eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren erreichen.

Es wird der Lebenszyklus von der Gewinnung der Rohstoffe über die Rohrproduktion bis zum Entsorgen des Materials berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden Montage, Montagematerial, Fittings und Hilfsstoffe sowie Nutzung und Ausbau der Rohre.

PE-X- Rohre sind zu 100% Neuware und werden in einer Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) entsorgt. Das Aluminium des Mehrschichtverbundrohres wird zu 97% nach der Trennung vom Kunststoff wieder verwendet. Während der Produktion des Rohres beträgt der Schrottanteil des Aluminiums 25%.

Beim Kupferrohr wird von 50% Schrottanteil, bei Edelstahl von 87% und bei C-Stählen von 40% Schrott ausgegangen. Metallrohre können zu 100% recycelt werden und führen damit zu keiner Umweltbelastung.

Bild 2-8 zeigt die die Umweltbelastung der verschiedenen Rohre in Eco - Indikator Punkten (EIP99/Niederlande). Bewertet man die Versorgungsrohre mit der UBP97 Methode (Schweizer Methode, Umweltbelastungspunkte) ergeben sich prinzipiell die gleichen Aussagen. Die PE-X – Rohre schneiden am Besten ab und sind auch unter dem Aspekt der Ökobilanz für Thermisch aktive Bauteile sehr geeignet.

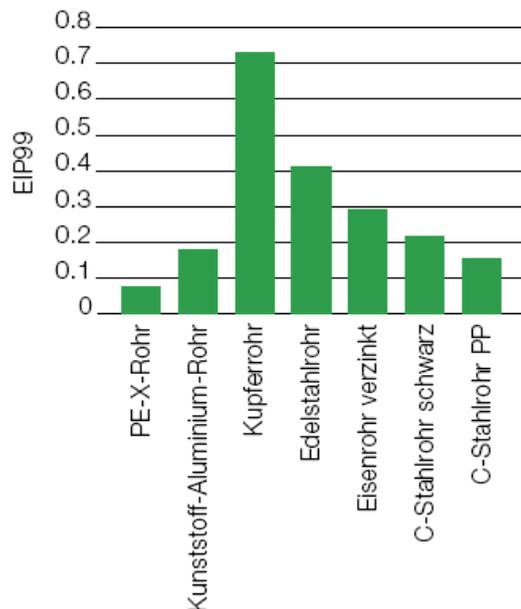


Bild 2-8: Ökobilanz verschiedener Rohrwerkstoffe.

2.8 Entwicklungspotenzial

Folgende Entwicklungspotenziale ergeben sich für thermisch aktive Bauteil-Systeme:

- optimale Systemkonfiguration und Betriebsweise unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien (z.B. Unterstützung der Erdreichregeneration, Nutzung der Gebäudefassade als Massivabsorber)
- objektbezogenes Monitoring und rechnergestützt angepasste Betriebsführung
- Verbesserung baukonstruktiver und wärmetechnisch relevanter Bauteileigenschaften (z.B. bauteilintegrierte Wärmedämmung, Verbesserung der Raumakustik)
- Kombination von TABS mit neuen Speichertechnologien (z.B. PCM).

3 Wärmeübergabeverlust

3.1 Definition

Die folgenden Definitionen ausgewählter energetischer Kenngrößen sind der DIN V 18955 Teil 1 entnommen. Bild 3-1 dient der Veranschaulichung.

Der **Nutz- oder Heizwärmebedarf** ist der rechnerisch ermittelte Wärmebedarf, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen innerhalb einer Gebäudezone während der Heizzeit benötigt wird.

Analog dazu ist der **Nutzkälte- oder Kühlbedarf** definiert, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen in den Zeiträumen benötigt wird, in denen die Wärmequellen eine höhere Energiemenge anbieten, als benötigt wird.

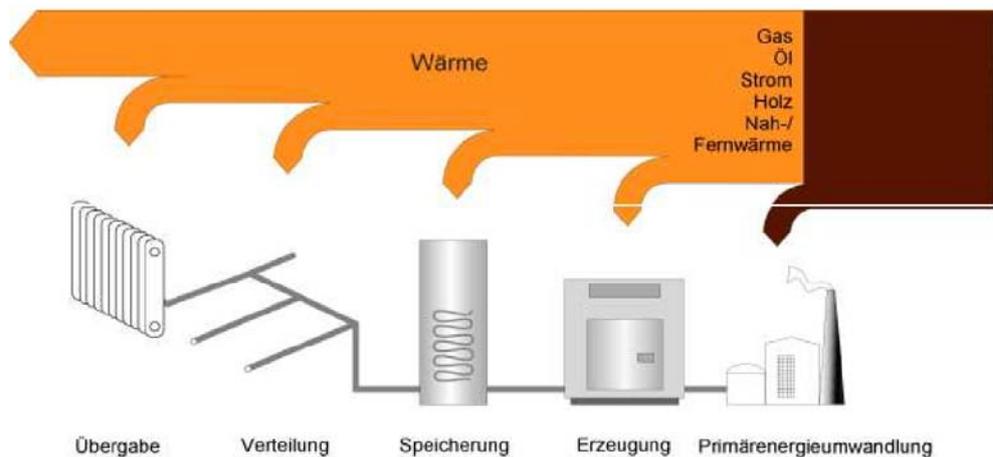


Bild 3-1: Prozesskette der Anlagentechnik, vom Primärenergiebedarf (rechts) zum Nutzenergiebedarf (links) und die jeweiligen Verluste. Die für jeden Schritt nötige Hilfsenergie ist hier nicht dargestellt. [25]

Der **Nutzenergiebedarf** ist der Oberbegriff für Nutzwärme- und -kältebedarf sowie Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser, Beleuchtung und eventuell Beheizung.

Auf Grundlage des Nutzenergiebedarfs kann unter Einbeziehung der Anlagentechnik der **Endenergiebedarf** berechnet werden. Er quantifiziert die Energiemenge, die der Heizungsanlage, der raumluftechnischen Anlage und den Warmwasserbereitungs- und Beleuchtungsanlagen zur Verfügung gestellt wird, um die festgelegten Nutzungsanforderungen zu erfüllen. Der Endenergiebedarf wird an der „Schnittstelle Gebäudehülle“ übergeben und stellt somit die Energiemenge dar, die der Verbraucher für eine bestimmungsgemäße Nutzung unter normativen Randbedingungen benötigt.

Der **Primärenergiebedarf** schließlich ist die Größe, an die im Rahmen einer Bewertung von Gebäuden Anforderungen gestellt werden. Er bezieht auch die Energiemenge mit ein, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen.

Verluste sind Energieabgaben, die in den technischen Prozessschritten zwischen dem Nutzenergiebedarf und dem Endenergiebedarf auftreten. Die Prozessbereiche sind die Übergabe, die Verteilung, die Speicherung und die Erzeugung.

Die **Aufwandszahl** ist das Verhältnis von Aufwand zu erwünschtem Nutzen (Bedarf) bei einem Energiesystem.

Im Rahmen dieses Vorhabens soll lediglich der **Übergabeverlust**, also der Aufwand für die Wärme- bzw. Kälteübergabe im Raum bestimmt werden.

Der Begriff „Übergabe“ wird in der DIN V 18599-5 als Prozessbereich in der Anlagentechnik beschrieben, bei dem Energie unter Einhaltung der festgelegten Anforderungen in den Raum übergeben wird. Die Anforderungen werden in diesem Fall durch den Nutzerkomfort definiert. Aus physikalischer Sicht erscheinen Verluste bei der Wärme- oder Kälteübergabe im Raum schwer vorstellbar. Die Wärme, die bereits im Raum angekommen ist, kann schließlich nicht auf dem Weg vom Wärmeübergabesystem (Heizkörper, Fußbodenheizung, TABS ...) zum Raum verloren gehen. Wenn allerdings berücksichtigt wird, dass z. B. im Heizfall je nach Regelung und Übergabesystem die mittleren Temperaturen im Raum über dem Sollwert liegen können, ist der Begriff sinnvoll, da dann erhöhte Transmissions- und Lüftungswärmeverluste auftreten. [6]

Die Wärmeübergabe im Heizfall wurde bereits vielfach untersucht. Neben anderen hat Bauer [3] eine Vorgehensweise für die Bestimmung eingeführt. Wie sich später noch zeigen wird, führt die analoge Vorgehensweise für den Kühlfall bei ausschließlicher Konditionierung mittels TABS zu einigen Fragestellungen.

Die zentrale Überlegung der Übergabeverluste fasst Schnieders [6] folgendermaßen zusammen: Es wird eine gewisse Menge Energie benötigt, um den vom Nutzer geforderten Komfort im Raum herzustellen. Ein ideales System stellt diesen Komfort mit einem Minimum an Energie her. Ein reales System kann die Energie nicht exakt so zuführen, wie sie benötigt wird, nämlich zur optimalen Zeit, am optimalen Ort und im optimalen Maß. Es erfordert demzufolge einen höheren Energieaufwand.

Heizsysteme werden durch einen Vergleich von Aufwand und Nutzen beurteilt. Der Nutzen oder vielmehr die Aufgabe eines Heizsystems besteht darin, in einem Gebäude für die Nutzer thermisch behagliche Verhältnisse zu schaffen. Dies gilt analog für ein Kühlsystem. Bauer [3] verwendet daher stets den Terminus „Nutzenübergabe“.

3.2 Nutzungsanforderungen – operative Temperatur

Die Nutzungsanforderungen an den Innenraum beinhalten mehrere Aspekte. Einer davon ist die thermische Behaglichkeit. Als Maßstab für deren Bewertung hat sich unter anderem die operative Temperatur durchgesetzt. Sie wird auch als empfundene Temperatur bezeichnet und ist ein gewichteter Mittelwert aus Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen (in der Regel aus flächengewichteten Oberflächentemperaturen berechnet). Im weiteren wird unter Temperatur immer die operative Temperatur verstanden, anderenfalls ist explizit von Lufttemperatur die Rede. In den folgenden Untersuchungen bezüglich der Übergabeverluste wird die operative Temperatur als Regel- und Anforderungsgröße verwendet. In DIN V 18599-10 sind die Soll-Raumtemperaturen für den Heizfall auf 21 °C und für den Kühlfall auf 24 °C festgelegt. Im Heizfall können die 21 °C tatsächlich als Anforderungsgröße für die Nutzung verstanden werden. Im Kühlfall kennzeichnen die 24 °C eher einen Mittelwert über den Bilanzzeitraum.

Vorgreifend auf Kapitel 3.4 sei hier bereits auf die nach DIN EN 15251 empfohlenen Temperaturbereiche hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit verwiesen. In Tabelle 3-1 auf Seite 33 sind die empfohlenen Innentemperaturbereiche für ein Bürogebäude für die Gebäudekategorien I bis III definiert. Für den Großteil der Untersuchungen werden der für Kategorie II empfohlene obere Grenzwert im Kühlfall herangezogen (26°C). Im Heizfall greift der untere Grenzwert der Kategorie I von 21°C, analog zur Soll-Raumtemperatur nach DIN V 18599. Wenn nachfolgend von Nutzungsanforderungen die Rede ist, sind die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit, die hier im Wesentlichen auf Grundlage der operativen Temperatur bewertet wird, gemeint. Es sind die oben dokumentierten Empfehlungen der DIN EN 15251 für Bürogebäude der Kategorie II einzuhalten.

Die bereits vorhandenen Kenngrößen für die Bewertung der Wärmeübergabeverluste in Rahmen der Norm (siehe Tabelle 3-3) wurden durch rechnerische Untersuchungen mittels dynamischer Simulationen ermittelt. Die Methode war prinzipiell identisch mit der im Folgenden beschriebenen und beruht auf der gleichen grundlegenden Annahme (siehe Kapitel 3.3.1), jedoch wurden die vorhandenen Kennwerte durch Extrapolation ausgehend von einem jahresmittleren Typtag ermittelt.

Für die Bestimmung der Kälteübergabeverluste im Rahmen der DIN V 18599-5 gibt es bisher keine Kenngrößen, denen tiefergehende rechnerische Untersuchungen zugrunde liegen.

3.3 Vorgehensweise bei der Bestimmung – Festlegungen

3.3.1 Grundlegende Annahme

Der Nutzer stellt das Heiz- bzw. Kühlsystem zur Raumkonditionierung immer so ein, dass während der Nutzungszeit keine Unterschreitung (Heizfall) bzw. Überschreitung (Kühlfall) der festgelegten Grenztemperatur zugelassen wird. [3]

3.3.2 Heizfall

Zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen ist jedem Raum ein definierter Wärmestrom zuzuführen. Das zeitliche Integral des Heizlastganges ergibt den Referenzwärmedarf $Q_{\text{Heiz,ideal}}$. Im Simulationsmodell wird der Referenzwärmebedarf mit einem idealisierten Anlagenmodell berechnet, bei dem die benötigte Heizleistung verlust- und verzögerungsfrei, d.h. ohne zusätzlichen energetischen Aufwand zur Verfügung gestellt wird. Der Referenzwärmebedarf entspricht in seiner Definition dem Nutzwärmebedarf nach DIN V 18599 (siehe Kapitel 3.1). Kein reales Heizsystem ist in der Lage, die benötigte Heizleistung genau in dem Maße zur Verfügung zu stellen, wie sie benötigt wird, um die Nutzungsanforderungen zu erfüllen. Für TABS trifft dies aufgrund ihres trägen Verhaltens in besonderem Maße zu. Bild 3-2 zeigt beispielhaft die Temperaturschwankungen in einem simulierten Betriebsfall im Vergleich zum idealen Referenzfall.

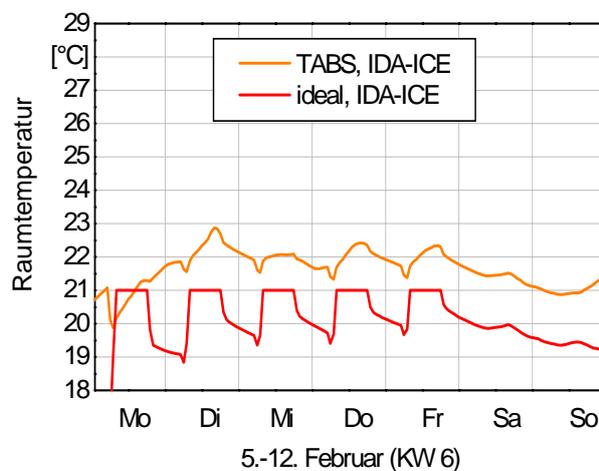


Bild 3-2: Wochengang der Raumtemperatur des idealen und des TAB Systems im Heizfall, Westbüro, stündliche Mittelwerte. Die Temperatureinbrüche zu Beginn jedes Arbeitstages resultieren aus Inbetriebnahme der, bereits zwei Stunden vor der Nutzungszeit einsetzenden, Lüftung.

Wie aus Bild 3-2 ersichtlich ist der Temperatureinbruch am Montag Morgen aufgrund der einsetzenden Lüftung um 5:00 Uhr für die nachfolgende Unterschreitung der Soll-Temperatur während der Nutzungszeit verantwortlich. Die Temperaturkurve an den restlichen Tagen liegt dagegen deutlich über dem Soll-Wert. Dies ist der Forderung, niemals die 21 °C während der Nutzungszeit zu unterschreiten, geschuldet. Nun könnte durch weiter optimierte Regelung, bspw. ein noch früheres Einsetzen der Heizung oder höhere Vorlauftemperaturen an dem, dieser Woche vorausgegangen Sonntag, der Temperatureinbruch abgeschwächt werden. Damit wäre es theoretisch möglich, die gesamte Temperaturkurve geringfügig nach unten zu verschieben. In der Folge würden sich geringere Aufwandszahlen ergeben. Aufgrund der Annahme, dass in der Praxis die Regelungen selten so optimiert werden können und werden, wie das rechnerisch der Fall ist, bleibt die Referenzvariante so bestehen.

Wird das System in der Simulation nun so betrieben, dass die vorgegebene Solltemperatur niemals unterschritten wird, ergibt sich der dynamisch errechnete

Wärmebedarf als Summe des zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen erforderlichen Nutzwärmebedarfs einschließlich der Wärmeübergabeverluste des Heizsystems ($Q_{\text{Heiz,tabs}}$). Die Aufwandszahl e_{Heiz} für die Wärmeübergabe errechnet sich aus dem Energiebedarf $Q_{\text{Heiz,tabs}}$ bezogen auf den Referenzbedarf $Q_{\text{Heiz,ideal}}$:

$$e_{\text{Heiz}} = \frac{Q_{\text{Heiz,tabs}}}{Q_{\text{Heiz,ideal}}}$$

Alternativ erfolgt die Darstellung in Form von Nutzungsgraden.

3.3.3 Kühlfall

Zunächst wird die grundlegende Annahme (vgl. Seite 29) auf den Kühlfall übertragen: Der Nutzer stelle das Kühlsystem stets so ein, dass die geforderte Temperatur niemals überschritten wird. Analog zur Vorgehensweise im Heizfall weist die Simulation mit dem idealen Kühlsystem die minimal benötigte Leistung zur Einhaltung dieser Anforderung aus ($Q_{\text{Kühl,ideal}}$). Die Aufwandszahl ergibt sich durch Bezug des Energiebedarfs unter Einsatz des TABS auf den Referenzbedarf:

$$e_{\text{Heiz}} = \frac{Q_{\text{Kühl,tabs}}}{Q_{\text{Kühl,ideal}}}$$

Die Schwankungen der Raumtemperatur sind im Vergleich zur Heizperiode während der Kühlperiode deutlich höher. Das Bild 3-3 veranschaulicht dies.

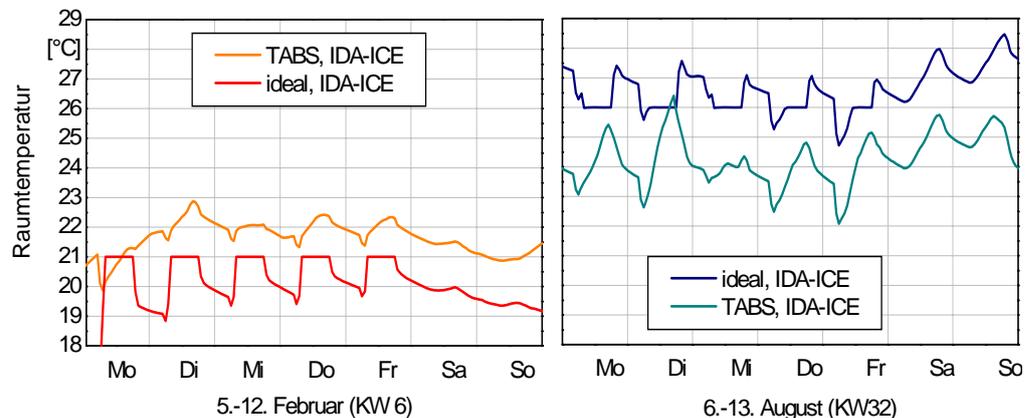


Bild 3-3: Wochengang der Raumtemperaturen des idealen und TAB Systems im Heizfall (links) und im Kühlfall (rechts), IDA-ICE, Westbüro, stündliche Mittelwerte.

Im folgenden Kapitel wird dieses Vorgehen in Bezug auf den Kühlfall diskutiert.

3.3.4 Komfortanforderung im Heiz- und Kühlfall

Durch die Darstellung der Temperaturverläufe beider aufeinander bezogenen Systeme (Bild 3-3: jeweils „ideal“ und „TABS“) wird deutlich, dass die mittlere Temperatur im TABS-Betrieb im Heizfall deutlich über der des idealen Systems liegt, im Kühlfall deutlich darunter. Besteht der gewünschte Nutzerkomfort nun darin, die vorgegebenen Sollwerte möglichst nicht zu unter- bzw. überschreiten wird die Anforderung erfüllt. Lautet die Anforderung hingegen, die mittleren Abweichungen zwischen den Temperaturen des Betriebs- und Idealfalls sollen möglichst gering sein, erfüllt dieser Betriebszustand die Anforderungen nicht. Dies würde bedeuten, den Temperaturverlauf im Heizfall zu senken und im Kühlfall anzuheben, um im Mittel vergleichbare Temperaturen zu erhalten. Das Bild 10-1 auf Seite 81 zeigt für eine Sommerwoche denselben Temperaturverlauf im TABS-Betrieb, das ideale System hält jedoch eine Temperatur von 24,5 °C während der Nutzungszeit ein. So liegen die beiden Temperaturkurven deutlich näher beieinander. Im folgenden Kapitel 3.4 werden die Komfortbereiche I bis III nach DIN EN 15251 vorgestellt. 24,5°C entspricht dem Zielwert aller Kategorien für den Kühlfall.

Es ist aber nicht zwingend erforderlich, die bisherige Vorgehensweise zur Bestimmung der Übergabeverluste im Heizfall auf den Kühlfall zu übertragen. Vielmehr sollte grundsätzlich zwischen Heiz- und Kühlfall unterschieden werden:

- Gebäude ohne Heizung gibt es für gewöhnlich nicht, Gebäude ohne Kühlung hingegen schon.
- Die Differenz zwischen Außen- und Raumtemperatur ist im Sommer deutlich geringer als im Winter.

Die Festlegungen für die Untersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens sind:

- Im Heizfall gilt die Anforderung 21 °C nie zu unterschreiten (**Grenzwertbetrachtung**).
- Im Kühlfall werden die Variantenuntersuchungen mit beiden Bezugsgrößen durchgeführt: sowohl **Grenzwertbetrachtung** mit 26 °C (Komfortkategorie II) als Grenzwert für den TABS-Betrieb und das ideale System als auch **Zielwertbetrachtung** mit 24,5 °C als Anforderung an das ideale System (Die Temperaturen im TABS-Betrieb dürfen weiterhin bis zum Grenzwert ansteigen.)

Im Anhang finden sich die Ergebnisse. Die Aufwandszahl wurde unter zu Grundlegung des Grenzwertes ermittelt, die Aufwandszahl_ziel nach Zielwertbetrachtung.

3.4 Bewertung der Energieeffizienz unter Berücksichtigung von DIN EN 15251

Der Energiebedarf und -verbrauch von Gebäuden hängt unter anderem stark von den Anforderungen an die Nutzung (Temperatur, Lüftung, ...) ab. Eine energetische Bewertung ohne eine Bewertung des Innenraumklimas ist daher nicht sinnvoll. Die DIN EN 15251 legt die Kriterien für das Innenraumklima fest,

die bei Energieberechnungen anzuwenden sind. Es ist vorgesehen, das Innenraumklima hinsichtlich mehrerer Komfortkriterien zu bewerten. Ziel ist es, jedes Gebäude hinsichtlich sechs Kriterien in die Klassen I, II und III (I = höchster, III = geringster Komfort) einzustufen. Im Folgenden werden die beiden Kriterien

- thermische Behaglichkeit im Winter und
- thermische Behaglichkeit im Sommer

weiterverfolgt. In der Tabelle 3-1 sind die für energetische Berechnungen empfohlenen Innentemperaturen (operative Temperaturen) für Büroräume nach Tabelle A.3 [10] aufgeführt.

Tabelle 3-1: Nach DIN EN 15251 [10] empfohlene Innentemperaturbereiche bei Energieberechnungen für Büros, Sitzende Aktivitäten: ~ 1,2 met.

Kategorie	Heizfall [°C]	Kühlfall [°C]
	Bekleidung ~ 1,0 clo	Bekleidung ~ 0,5 clo
I	21,0-23,0	23,5-25,5
II	20,0-24,0	23,0-26,0
III	19,0-25,0	22,0-27,0

Der Mittelpunkt des Temperaturbereichs sollte als Zielwert angesetzt werden, die Temperatur kann jedoch aufgrund von Energiesparmaßnahmen oder Regelalgorithmen innerhalb dieses Bereichs schwanken. Relevant ist dies für die Untersuchungen nur für den Kühlfall. Dort liegt der Zielwert bei 24,5°C. Im Heizfall werden analog zur Vorgabe nach DIN V 18599 21°C als Ziel- und Grenzwert angesetzt.

Im Anhang G der DIN EN 15251 sind empfohlene Kriterien für zulässige Abweichungen aufgeführt. Tabelle 3-2 gibt Hinweise auf die Dauer der Abweichungen.

Tabelle 3-2: Beispiele für die Dauer der Abweichungen, die 3 % bzw. 5 % der Zeit entsprechen, Tabelle G.1 aus DIN EN 15251 [10].

3 % bzw. 5 % der Zeit	Täglich min	Wöchentlich Stunden	Monatlich Stunden	Jährlich Stunden
Arbeitsstunden	15/24	1/2	5/9	61/108
Stunden insgesamt	43/72	5/9	22/36	259/432

Die in diesem Vorhaben untersuchten Raummodelle sind durch die Konditionierung mit thermisch aktivierten Bauteilen in besonderem Maße Temperaturschwankungen unterworfen. Es wurde also zunächst der Anspruch verfolgt, die Raumtemperaturen in den nach Tabelle 3-1 definierten Bereichen zu halten. Zudem dürfen in Anlehnung an DIN EN 15251 die Grenzen des Temperaturbereichs im Kühlfall und der untere Grenzwert im Heizfall jeweils in 5% der Nutzungszeit über-, bzw. unterschritten werden. Aufgrund der Simulationsergebnisse (Stundenmittelwerte) werden die minütlichen Abweichungen nicht unter-

sucht. Wie sich später zeigt ist die Anforderung an die wöchentliche Häufigkeit des Auftretens von Temperaturabweichungen von höherer Relevanz.

3.5 Behandlung in der DIN V 18599

3.5.1 Übersicht

Die Normenreihe DIN V 18599 wurde 2005 veröffentlicht. Sie beschreibt ein Berechnungsverfahren für die energetische Bewertung von Gebäuden. Zur Bestimmung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für die Beheizung und Warmwasserbereitung werden erstmals die Bereiche Kühlung und Beleuchtung miteinbezogen. Die DIN V 18599 dient als Berechnungsverfahren im Rahmen der Energieeinsparverordnung für Nichtwohngebäude und bildet die Grundlage für den künftig obligatorisch zu erstellenden Energiepass.

Das Rechenverfahren für die Bestimmung des Endenergiebedarfs von Heizsystemen nach DIN V 18599-5 beinhaltet die Berücksichtigung der „Verluste zur Wärmeübergabe im Raum“. In DIN V 18599-7 wird „die Kälteabgabe der Übergabe für das Raumkühlsystem“ berechnet. Klassische Flächenheizsysteme können für den Heizfall innerhalb der Normensystematik auf einfache Weise mit genügender Genauigkeit energetisch abgebildet werden. Im Kühlfall ist durch die Verwendung lediglich eines Wertes diese Genauigkeit noch nicht gewährleistet.

3.5.2 Übergabeverluste im Heizfall

Das Rechenverfahren für die Bestimmung des Primärenergiebedarfs nach [DIN V 18599-5] beinhaltet die Berücksichtigung der „Verluste zur Wärmeübergabe im Raum“. Dabei ist $Q_{h,ce}$ der Wärmeverlust der Übergabe für das Heizsystem an die jeweilige Umgebung (z.B. Raum, Zone, Keller) mit der Einheit kWh (ce bedeutet control and emission). Die Berechnung erfolgt monatlich nach folgender Gleichung:

$$Q_{h,ce} = \left(\frac{f_{Radiant} \cdot f_{int} \cdot f_{hydr}}{\eta_{h,ce}} - 1 \right) \cdot Q_{h,b}$$

mit:

$Q_{h,ce}$	zusätzlicher Verlust der Wärmeübergabe (im Monat) [kWh]
$f_{Radiant}$	Faktor für Strahlungseinfluss (nur relevant bei Heizungen in Hallen, deren Höhe $h > 4$ m) [-]
f_{int}	Faktor für intermittierenden Betrieb (als intermittierender Betrieb wird die zeitabhängige Möglichkeit zur raumweisen Temperaturabsenkung verstanden) [-]
f_{hydr}	Faktor für den hydraulischen Abgleich, ist derzeit gleich 1 zu setzen [-]
$\eta_{h,ce}$	Gesamtnutzungsgrad für die Wärmeübergabe im Raum [-]
$Q_{h,b}$	Nutzwärmebedarf (im Monat) [kWh]

Für alle im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Varianten sind f_{radiant} , f_{int} und f_{hydr} gleich 1. Nacht- und Wochenendabsenkungen sind bei der Bedarfsermittlung in Teil 2 der Norm erfasst und fallen nicht unter „intermittierenden Betrieb“. Die oben angegebene Gleichung vereinfacht sich dadurch zu:

$$Q_{h,ce} = \left(\frac{1}{\eta_{h,ce}} - 1 \right) \cdot Q_{h,b}$$

Der Gesamtnutzungsgrad berechnet sich immer aus drei Anteilen, welche der Tabelle 3-3 entnommen werden können:

$$\eta_{h,ce} = \frac{1}{(4 - (\eta_L + \eta_C + \eta_B))}$$

mit:

- η_L Teilnutzungsgrad für vertikales Lufttemperaturprofil [-]
- η_C Teilnutzungsgrad für Raumtemperaturregelung [-]
- η_B Teilnutzungsgrad für spezifische Verluste der Außenbauteile [-]

Beispielsweise im Fall von Elektro- oder Luftheizungen wird auf diese Aufgliederung verzichtet und je nach Ausführung und Regelung ein Gesamtnutzungsgrad angegeben.

Der Teilnutzungsgrad η_L bewertet das sich einstellende vertikale Lufttemperaturprofil hinsichtlich der Nutzung. Eine Flächenheizung im Boden hat dort durchgängig den optimalen Teilnutzungsgrad von „1“. Wand- und Deckenheizungen hingegen schneiden aufgrund der für das Temperaturprofil ungünstigeren Anordnung schlechter ab, und zwar mit den Faktoren 0,96 und 0,93 (siehe Tabelle 3-3).

Die Regelfähigkeit aufgrund der Regeleinrichtung wird bewertet. Der PI-Regler schneidet hier durchweg am besten ab, aufgrund des trägeren Verhaltens einer bauteilintegrierten Flächenheizung ist der Nutzungsgrad hier gegenüber dem eines Heizkörpers jedoch geringer.

In der Norm sind tabellarisch die Teilnutzungsgrade für

- reine Heizflächen (Heizkörper)
- bauteilintegrierte Heizflächen (Flächenheizungen)
- Elektroheizung
- Luftheizungen
- Räume höher 4 m und höher 10 m

angegeben.

Bisher werden die thermisch aktivierten Bauteile analog zu den bauteilintegrierten Heizflächen bewertet. Tabelle 3-3 zeigt die Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen der DIN V 18599-5.

Tabelle 3-3: Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen der DIN V 18599-5 [12].

Einflussgrößen		Teilnutzungsgrade			
		η_L	η_C	η_B	
Raumtemperaturregelung	Wärmeträgermedium Wasser				
	– unregelt		0,75		
	– unregelt mit zentraler Vorlauftemperaturregelung		0,78		
	– unregelt mit Mittelwertbildung ($\beta_V - \beta_R$)		0,83		
	– Führungsraum		0,88		
	– Zweipunktregler/P-Regler		0,93		
	– PI-Regler		0,95		
	Elektroheizung				
– Zweipunktregler		0,91			
– PI-Regler		0,93			
System	Fußbodenheizung			η_{B1}	η_{B2}
	– Nasssystem	1		0,93	
	– Trockensystem	1		0,96	
	– Trockensystem mit geringer Überdeckung	1		0,98	
	Wandheizung	0,96		0,93	
	Deckenheizung	0,93		0,93	
Spezifische Wärmeverluste Verlegeflächen	Flächenheizung ohne Mindestdämmung nach DIN EN 1264				0,86
	Flächenheizung mit Mindestdämmung nach DIN EN 1264				0,95
	Flächenheizung mit 100 % besserer Dämmung als nach DIN EN 1264 erforderlich				0,99

Der jährliche zusätzliche energetische Bedarf für die Wärmeübergabe $Q_{n,ce,a}$ ist die Differenz der Ergebnisse der dynamischen Simulation für den Bedarf unter Einsatz des TABS $Q_{Heiz,tabs}$ und dem Nutzwärmebedarf $Q_{Heiz,ideal}$. Eine Ausweisung monatlicher Teilwerte erfolgt nicht.

3.5.3 Beispielrechnung für den Heizfall

Der Referenzfall aus Kapitel 7 soll innerhalb der bestehenden Normensystematik bezüglich der Übergabeverluste bewertet werden. Aus oben angegebener Tabelle 3-3 werden folgende Teilnutzungsgrade entnommen:

Raumtemperaturregelung:

- unregelt mit zentraler Vorlauftemperaturregelung) $\eta_C = 0,78$

System:

- Deckenheizung $\eta_L = 0,93$ und $\eta_{B1} = 0,93$

Spezifische Wärmeverluste Verlegeflächen:

- Mindestdämmung nach DIN EN 1264 $\eta_{B2} = 0,95$

$$\eta_{h,ce} = \frac{1}{(4 - (\eta_L + \eta_C + \eta_B))} = \frac{1}{(4 - (0,93 + 0,78 + 0,94))} = 0,74$$

Es ergibt sich ein Gesamtnutzungsgrad $\eta_{h,ce}$ von 0,74 und eine **Aufwandszahl** als Kehrwert des Nutzungsgrades von **1,35**. Das heißt, 35% des Nutzwärmebedarfs würden als Wärmeübergabeverluste in die Bilanzierung einfließen.

3.5.4 Übergabeverluste im Kühlfall

Der Nutzenergiebedarf für die Kälteversorgung der Raumkühlung berechnet sich nach DIN V 18599-7 allgemein zu:

$$Q_{c,outg} = Q_{c,b} + Q_{c,ce} + Q_{c,d} + Q_{c,s}$$

mit:

$Q_{c,outg}$	Erzeugernutzkälteabgabe an das Raumkühlsystem [kWh]
$Q_{c,b}$	Nutzenergie für Raumkühlung [kWh]
$Q_{c,ce}$	Kälteabgabe der Übergabe für das Raumkühlsystem [kWh]
$Q_{c,d}$	Kälteabgabe der Verteilung für das Raumkühlsystem [kWh]
$Q_{c,s}$	Kälteabgabe der Speicherung für das Raumkühlsystem [kWh]

Der Verlust der Übergabe wird mit den Werten der Tabelle 3-4 berechnet nach:

$$Q_{c,ce} = ((1 - \eta_{c,ce}) + (1 - \eta_{c,ce,sens})) \cdot Q_{c,b}$$

mit:

$\eta_{c,ce}$	Nutzungsgrad der Übergabe Kälte
$\eta_{c,ce,sens}$	sensibler Nutzungsgrad der Übergabe Raumkühlsystem [-]

Tabelle 3-4: Faktoren (Jahresmittelwert) Raumkühlung, Tabelle 8 nach DIN V 18599-7 [11]

Kältesystem	$\eta_{c,ce,sens}$	$\eta_{c,ce}$	$\eta_{c,d}$
Kaltwasser 6/12	0,87	1,00	0,90
Kaltwasser 8/14 (z. B. Ventilatorkonvektor)	0,90	1,00	0,90
Kaltwasser 14/18 (z. B. Ventilatorkonvektor, Induktion)	1,00	1,00	1,00
Kaltwasser 16/18 (z. B. Kühldecke)	1,00	1,00	1,00
Kaltwasser 18/20 (z. B. Bauteilaktivierung)	1,00	0,90	1,00
Direktverdampfung	0,87	1,00	0,90 = 1, wenn in der Maschine schon berücksichtigt

$\eta_{c, ce, sens}$ berücksichtigt die ungewollte Entfeuchtung in realen Luftkühlern und spielt bei den hier betrachteten Systemen keine Rolle.

Für alle TABS gilt demnach eine Aufwandszahl analog zur Definition auf Seite 31 von

$$e_{Kühl,tabs} = (1 - 0,9) + 1 = 1,1.$$

3.6 Ergebnisse früherer Untersuchungen

Zur Bestimmung der Übergabeverluste mittels thermischer Gebäudesimulation gibt es seit Ende der achtziger Jahre einige Untersuchungen. Für die Vielzahl der Autoren sei hier stellvertretend Bauer [3] erwähnt. Hier wurden neben Heizkörperheizungen auch Fußbodenheizungen untersucht, die den TABS am nächsten kommen. Es wurde der Einfluss der Einbausituation, der Art des Systems, der möglichen Betriebsführung und der Raumregelung untersucht.

3.6.1 TABS mit idealem Zusatzsystem

Die wohl einzige Untersuchung bezüglich der Wärmeübergabeverluste thermisch aktivierter Bauteile sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlfall stammt von Burkard [2]. Es wird davon ausgegangen, dass in der Praxis in der Regel Zusatzsysteme erforderlich sind, um den gewünschten Komfort sicherzustellen.

Burkards Vorgehen ist im Heizfall analog zu Bauer [3]. Es werden keinerlei Unterschreitungen der Solltemperatur zugelassen. Dies wird im Betrieb mit TABS erreicht, indem zusätzlich ein ideales System aktiviert wird, welches die geforderten Temperaturen sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall einhalten kann. Die vorher diskutierte Problematik bezüglich sinnvoller Festlegungen an die Anforderungen wird damit hinfällig. Da TABS den benötigten Bedarf in dieser Untersuchung also nur anteilig liefern, wird in der Arbeit für jede ermittelte Aufwandszahl der zugehörige Deckungsanteil der Systeme ausgewiesen.

Burkard untersucht im Wesentlichen die Betriebsführung von TABS. So werden die unregelmäßige Variante, die Regelung nach Raumlufttemperatur und nach Rücklauftemperatur untersucht. TABS sind jeweils während der Übergangszeit aktiv oder ausgeschaltet. Zusätzlich wird die durchgängige Betriebsweise und die Nacht- und Wochenendabschaltung modelliert.

Es werden die Behaglichkeitskriterien der DIN 1946-2 zugrundegelegt. Die operativen Temperaturen sollen sich demnach zwischen 20°C und 26°C bewegen. In Abhängigkeit der Außenlufttemperatur ist ab 29°C ein Anstieg der operativen Raumtemperatur um ein Drittel der Differenz zwischen Außenlufttemperatur und 26°C zulässig.

Bei der **unregelmäßigen Variante** treten die höchsten Aufwandszahlen auf. Mit Deckungsraten von 93% bis 97% im Kühlfall liegen die Aufwandszahlen (für beide Systeme zusammen!) zwischen 1,65 und 1,75, wenn in der Übergangszeit die TABS ausgeschaltet bleiben.

Bei vergleichbaren Deckungsraten im Heizfall von fast 100% liegen die Aufwandszahlen mit 1,72 und 1,87 über diesen Werten. Die Werte bei Betrieb während der Übergangszeit sind in beiden Fällen nochmals höher (rund 2).

Die Wochenendabschaltung beider Systeme führt für den Heiz- und Kühlfall zu sinkenden Übergabeverlusten.

Bei der **Regelung nach Raumlufttemperatur** treten insgesamt niedrigere Verluste auf. Der günstigste Fall ist hier, beide Systeme durchgängig zu betreiben. Für den Heizfall führt dies zu einer Deckungsrate von 88% und einer Aufwandszahl von 1,21. Im Kühlfall betragen diese Werte 89% und 1,54.

Wird das ideale System nachts und/oder am Wochenende abgeschaltet, während das TABS durchläuft, steigen die Deckungsrate und der Aufwand in Heiz- und Kühlfall. Bei Betrieb in der Übergangszeit ist zwar eine Erhöhung beider Werte ebenfalls nachweisbar, jedoch deutlich geringer als im unregelmäßigen Betrieb. Durch die Regelung schaltet sich das System nur bei Bedarf ein, hat also geringere Laufzeiten.

Die **Regelung nach der Rücklauftemperatur** führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die Regelung nach Raumlufttemperatur.

In den vorangegangenen Fällen war die Vorlauftemperatur in den einzelnen Perioden konstant: In den Heizperioden 24°C, in der Übergangszeit 22,5°C und in der Kühlperiode 21,5°C.

Die ebenfalls untersuchte außenlufttemperaturgesteuerte Vorlauftemperatur hat kaum Einfluss. Der Energieaufwand wird reduziert, aber bei geringeren Deckungsraten. Dabei spielt es ebenfalls keine Rolle, ob die momentane oder die über 24 bzw. 48 Stunden gemittelte Außenlufttemperatur zur Regelung herangezogen wird.

Es wird bestätigt, dass bei geeigneter Betriebsführung der TABS in Kombination mit dem Zusatzsystem Lastspitzen deutlich reduziert werden können. Im durch-

gängigen Betrieb verringern TABS die Spitzenheizlast um die Hälfte und die Spitzenkühllast um bis zu zwei Drittel.

3.6.2 Wärmeübergabe von Flächenheizungen

Auch Schnieders vom Passivhausinstitut [6] hat sich der Frage nach den Wärmeübergabeverlusten von Flächenheizungen gewidmet.

Unter Zugrundelegung seines Nutzermodells, welches Abweichungen von der gewünschten Temperatur nach oben und unten zulässt, treten in diesen Untersuchungen keine nennenswerten Übergabeverluste auf. Gleichzeitig wurde eine unterschiedliche Regelgüte zwischen der Flächenheizung und flinkeren Heizsystemen bestätigt. Flächenheizungen weisen im Durchschnitt größere Abweichungen von den Sollwerten auf. Für den Passivhausbereich wurden auch diese Unterschiede als unbedeutend eingestuft. [6]

4 Thermische Gebäudesimulation

4.1 Einführung

Die thermisch-energetische Gebäude- und Anlagensimulation ermöglicht die dynamische Berechnung des thermischen und energetischen Verhaltens von Gebäuden unter Einfluss der nutzungsbezogenen und klimatischen Randbedingungen. Um ein der Realität möglichst nahes Abbild zu schaffen, müssen diejenigen Aspekte des realen Systems, welche im Zentrum des Interesses stehen, hinreichend genau modelliert werden können. Das Ergebnis sind Zeitreihen thermischer Größen wie z.B. Raum-, Oberflächen-, Vor- und Rücklauftemperaturen und energetischer Größen wie Heiz- und Kühlleistungen und -bedarfe. Im Rahmen dieses Vorhabens ist das Verhalten der thermisch aktivierten Bauteilsysteme (TABS) und damit ihre Auswirkungen auf den Energiebedarf von besonderem Interesse. Die TABS werden in der Realität ebenso wie das Modell in der Simulation von diversen Umgebungsbedingungen beeinflusst.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde zwei unterschiedliche Simulationsprogramme IDA und TRNSYS verwendet. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die Modelvorhersagen gegeneinander abgleichen zu können und so, ungeachtet der bekannten Unterschiede in den Programmen, bereits während der Durchführung der Simulationsrechnungen eine Art vergleichende Validierung zu ermöglichen.

4.2 Die Simulationsumgebung IDA

IDA SE (Simulation Environment) kommt aus Schweden und ist ein Simulationswerkzeug für modulare Systeme. Innerhalb dieser Umgebung gibt es die Applikation Indoor Climate and Energy (ICE). Hier sind eine Vielzahl spezieller Komponenten für die thermische Gebäudesimulation zusammengestellt und anwenderfreundlich aufbereitet.

Die physikalischen Eigenschaften und Funktionsweisen einzelner Komponenten (Module oder Objekte) werden in Form von Gleichungen erfasst. Formuliert werden die Module mit dem NMF-Code (*Neutral Model Format*). Diese programmunabhängige Programmiersprache wurde entwickelt, um physikalische kontinuierliche Zusammenhänge zu beschreiben. Alle ICE-Module stehen dem Anwender in Form des NMF-Codes zur Verfügung. So können die mathematischen Vorgänge nachvollzogen und gegebenenfalls angepasst werden. Ein veränderter oder neu erzeugter Code wird dem NMF-Translator übergeben, um ihn in Fortran oder C übersetzen zu lassen. Neben dem Translator gibt es zwei weitere Grundelemente von IDA: Der IDA-Modeller, die grafische Benutzeroberfläche, der die Module untereinander verknüpft und der IDA-Solver, dem nach Fertigstellung das Modell zur Berechnung übergeben wird.

IDA-ICE wurde 1998 auf den Markt gebracht, 2001 erschien die im Rahmen dieses Vorhabens verwendete Version 3.0. Mittlerweile ist Version 4.0 einsatzbereit.

Für das modellierte TABS wird das Makro HC-floor (Heating and Cooling) verwendet. Dieses erzeugt im Boden-, bzw. Deckenaufbau eine Heizschicht mit der Dicke Null, die an die benachbarten Schichten einen über die Fläche gleichmäßigen Wärmestrom übergibt. Parameter wie Rohrdurchmesser und –abstände werden also nicht modelliert. Standardmäßig stehen im Modul zwei Regler und ein Mischventil zur Verfügung. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Modul angepasst um die angestrebten Regelungen zu realisieren.

4.3 TRNSYS

TRNSYS ist ein modular aufgebautes Gebäudesimulationsprogramm. Der Anwender hat die Möglichkeit eigene Programmcodes einzubinden. Ursprünglich entwickelt wurde das Programm in den 1970er Jahren an der University of Wisconsin (USA). Die Programmiersprache ist FORTRAN. Das Programm hat seit seiner erstmaligen Veröffentlichung eine Vielzahl von Änderungen und Ergänzungen erfahren. Es wird heutzutage weltweit eingesetzt. Von Seiten der Programmierer wird großer Wert auf die Programmvalidierung gelegt. Entsprechende Nachweise sind öffentlich verfügbar.

Die Modellierung der TABS erfolgt mit Hilfe einer eigenentwickelten Programmierungsumgebung auf Grundlage des Standard-Mehrzonenmodells. Das TABS-Modell ist flexibel einsetzbar und erlaubt die Vorgabe sowohl von Temperaturen als auch Wärmeströmen in der zu aktivierenden Wandschicht. In Kombination mit einem weiteren Programmmodul zur Abbildung hydraulischer Warm- und Kaltwassernetze lassen sich die Wärmeströme im Bauteil allein durch Vorgabe der hydraulischen Kenngrößen Vorlauftemperatur und Massestrom ermitteln. Der Wärmefluss vom Rohrnetz an das Bauteil wird auf der Grundlage eines quasi-stationären 2-D Temperatur- und Wärmestromprofils im Bauteil approximiert. Dazu sind nicht nur die bauphysikalischen Eigenschaften des Baukörpers sondern auch die Beschaffenheit der Rohrleitungssysteme (Dimension und Verlegeabstand) zu berücksichtigen.

Die Regelung des TABS kann auf vielfältigste Art und Weise nachgebildet werden. Entsprechende Regelvorschriften können entweder in Gleichungsform definiert oder mittels vorhandener Programmmodule simuliert werden.

Das TABS-Modell wurde bereits in vielen anderen Projekten erfolgreich eingesetzt. Eine spezielle Validierung des Modells ist erfolgt. Weiterführende Informationen hierzu finden sich im Abschnitt 5.3.

5 Validierung mittels Messwerten

5.1 Vorgehensweise

Als Validierung wird die Prüfung eines Lösungsansatzes bezeichnet. In diesem Zusammenhang bedeutet dies, zu überprüfen, ob das erstellte Raummodell die wirklichen Verhältnisse ausreichend genau abbildet. Für den Büroraum des ZUB sind umfangreiche Messdaten vorhanden, so dass bei angepassten Randbedingungen (z.B. interne Lasten, Luftwechselrate, Vorlauftemperatur, Sonnenschutz, Massenstrom des Heiz- bzw. Kühlmediums) die per Simulation ermittelten Ergebnisse (z.B. Oberflächentemperatur, Rücklauftemperatur, Wärmemenge, Raumlufttemperatur) mit den gemessenen verglichen werden können. Das Ergebnis einer Validierung kann entweder eine Bestätigung des gewählten Ansatzes (Verifikation) oder eine Widerlegung (Falsifizierung) sein. Schließlich können die Untersuchungsergebnisse so ausfallen, dass weder Verifikation noch Falsifizierung möglich ist.

5.1.1 Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen

Das Gebäude des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) wurde zwischen 2000 und 2001 auf dem Gelände der Universität Kassel als Anbau an ein bestehendes Gebäude errichtet. Bauherr war der ZUB e.V., welcher 1998 in Zusammenarbeit dreier Fachbereiche (Bauphysik, Technische Gebäude Ausrüstung und Experimentelles Bauen) gegründet wurde. Der wissenschaftliche Schwerpunkt des Zentrums ist die Forschung im Bereich des umweltbewussten Bauens. Zudem versteht sich das ZUB als Schnittstelle zwischen der angewandten Forschung und der Praxis. So finden mittlerweile zahlreiche Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen in den Räumlichkeiten statt.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Solaroptimiertes Bauen, Teilkonzept 3, Solaroptimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf“ (SolarOpt) des Ministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde das ZUB als Demonstrationsobjekt gefördert. Gegenstand der Förderung war in der Phase I eine integrale Planung, gefolgt von einer detaillierten Messwerterfassung mit anschließender Auswertung in der Phase II. Auf einen Teil dieser Messdaten wird im Rahmen dieses Vorhabens zurückgegriffen, um das Raummodell mit thermisch aktivierten Bauteilen in der Simulationsumgebung zu validieren.

5.1.2 Vorhandene Messdaten

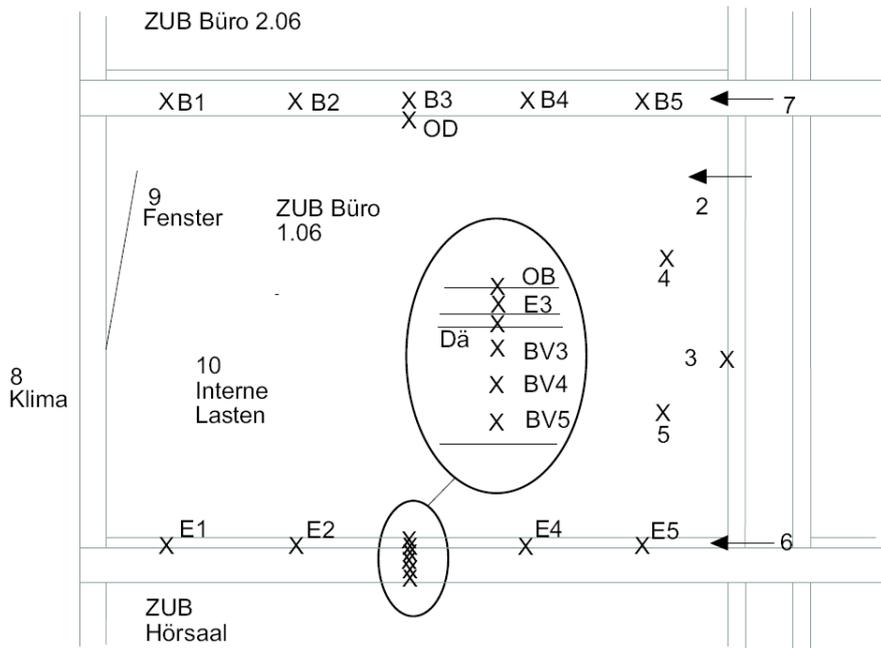


Bild 5-1: Vorhandene Messdaten für den Büroraum 1.06 im ZUB.

- | | |
|--------|---|
| 1 | Lufttemperatur Flur im 1. OG [°C] |
| 2 | Auslasstemperatur der Zuluft [°C], errechneter Volumenstrom für Büro [m ³ /h] |
| 3 | Raumsensor für Lufttemperatur [°C], Luftfeuchte, VOC [skt] und CO ₂ [ppm]
Lichtstärke [lux], Anwesenheit [-], Höhe 1,60 m |
| 4 | Lufttemperatur [°C], h = 2,0 m |
| 5 | Lufttemperatur [°C], h = 1,0 m |
| 6 | Vor- und Rücklauftemperatur Estrichsystem [°C], Wärmemenge [Wh/h]
Betriebsart (aus, Heizen, Kühlen), Betrieb Pumpe (0, 1) und Öffnung Ventil |
| 7 | Vor- und Rücklauftemperatur Betonsystem [°C], Wärmemenge [Wh/h]
Betriebsart (aus, Heizen, Kühlen), Betrieb Pumpe (0, 1) und Öffnung Ventil |
| 8 | Klima (Lufttemperatur [°C], rel. Feuchte [%], Windrichtung [°] und -geschwindigkeit [m/s], globale und diffuse Strahlung [W/m ²], Südstrahlung [W/m ²]) |
| 9 | Öffenbares Fenster, erfasste Zustände: Dreh-, Kippstellung und Oberlicht [min/h] |
| 10 | Interne Lasten, gem. Stromverbrauch für Steckdosen und Beleuchtung [Wh/h] |
| B 1-5 | Horizontale Temperaturverteilung in der Betondecke [°C] |
| E 1-5 | Horizontale Temperaturverteilung im Fußbodenaufbau (Estrich) [°C] |
| OD | Oberflächentemperatur Decke [°C] |
| OB | Oberflächentemperatur Boden [°C] |
| Dä | Temperatur in der Dämmschicht [°C] |
| BV 3-5 | vertikale Temperaturverteilung im Boden unterhalb der Dämmschicht [°C] |

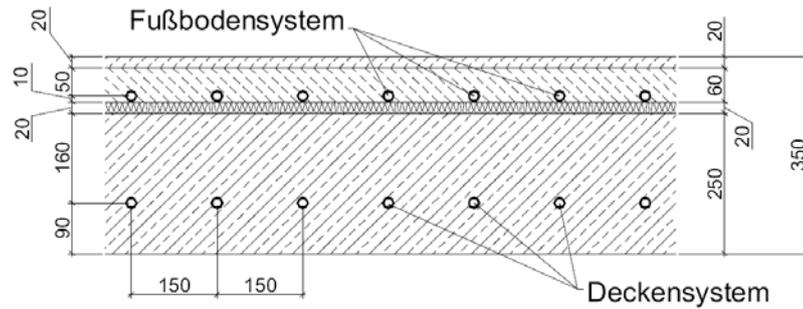


Bild 5-2: Aufbau Heiz- und Kühlsystem in der Decke bzw. dem Fußboden, Maße in mm.

5.2 IDA-ICE

5.2.1 Validation des gesamten Raummodells mit Fußbodenkühlung

Im Rahmen dieses Vorhabens ist eine Diplomarbeit entstanden, welche sich ausführlich der Validation des Modells des ZUB-Büros widmet. In Schalk [5] ist die mit IDA-ICE durchgeführte Validation ausführlich dokumentiert. An dieser Stelle werden kurz die Vorgehensweise geschildert und die wesentlichen Erkenntnisse dokumentiert.

Das Simulationsmodell des ZUB-Raumes weist sehr viele Randbedingungen auf, die das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Um diese zu begrenzen wurde für die Untersuchungen eine Sommerwoche ausgewählt. In diesem Zeitraum waren die Lüftungsanlage und die Beleuchtung ausgeschaltet, die Fenster größtenteils geschlossen und es wurde über das Fußbodensystem gekühlt. Die Vorlauftemperatur sowie der Massenstrom, die Kühlzeiten, die Zeiten der Anwesenheit, die internen Lasten und die Fensteröffnungszeiten konnten aus den Messwerten abgeleitet werden. Über eine wichtige Einflussgröße, den Zustand des Sonnenschutzes, gab es keine Aussagen.

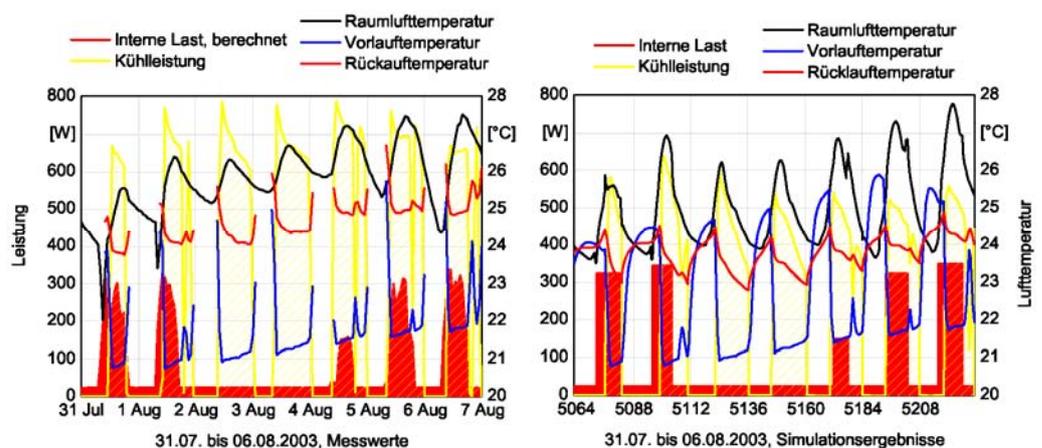


Bild 5-3: Systemtemperaturen und Last, links: Messwerte, rechts: Simulationsergebnisse (sim00).

Bild 5-3 zeigt den Verlauf der System- und Raumlufthtemperatur sowie die in das System eingebrachte Wärmemenge und die ermittelten internen Lasten. Auffällig beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten ist, dass die Kühlleistung in der Simulation deutlich geringer ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ist dementsprechend ebenfalls kleiner. Recht gut stimmen die Maximalwerte der Raumlufthtemperaturen überein, die Schwankungen sind jedoch in der Simulation größer und der Temperaturanstieg über den Wochenverlauf nicht so ausgeprägt. Um die Übereinstimmung zu verbessern, wurden diverse Randbedingungen variiert. Tabelle 5-1 zeigt auszugsweise die Parametervariationen, die schließlich zur „sim12“ führen.

Tabelle 5-1: Vergleich charakteristischer Werte der Messung mit denen der Simulation mit variierten Randbedingungen, die Temperaturspreizung ist die mittlere Differenz zwischen Rück- und Vorlauftemperatur inklusive der Zeiten, in denen die Kühlung ausgeschaltet und damit die Differenz gleich Null ist. Die Temperaturen in Klammern entsprechen der Wandtemperatur der Kalksandsteinwand, an der der Sensor montiert ist.

Randbedingungen	Kühl- energie [kWh]	Max. Temp- eratur [°C]	Mittlere Temp- eratur [°C]	Mittlere Temp- eratur- sprei- zung [K]
Messung	56,93	27,51	25,80	2,88
sim00 wie zuvor definiert	39,14	27,76	25,02	0,97
sim01 wie 00, „well-mixed“	40,77	28,73 (27,78)	25,74 (25,68)	1,12
sim05 wie 01, Massenstrom 0,08 kg/s	44,40	28,39 (27,45)	25,45 (25,37)	0,60
sim07 wie 05, $F_c=0,35$	47,83	28,94 (27,91)	25,75 (25,60)	0,74
sim12 wie 07, Massenstrom 0,051 l/s	44,40	29,34 (28,31)	26,08 (26,02)	1,32

Die simulierten Raumlufthtemperaturen weisen noch immer eine deutlich größere Schwankung als die gemessenen Werte auf. Der Vergleich mit der simulierten Wandtemperatur deutet darauf hin, dass der Fühler, der an dieser Wand montiert ist, einen Mittelwert zwischen Wand- und Oberflächentemperatur misst. Doch auch die Wandtemperaturen schwanken im Tagesverlauf mehr als die gemessene Temperatur (siehe Bild 5-5, rechts unten). Hier könnten noch Untersuchungen hinsichtlich einer Massenerhöhung im Raummodell oder die Berechnung der operativen Temperatur anschließen. Bild 5-4 zeigt analog zu Bild 5-3 die Ergebnisse der „sim12“.

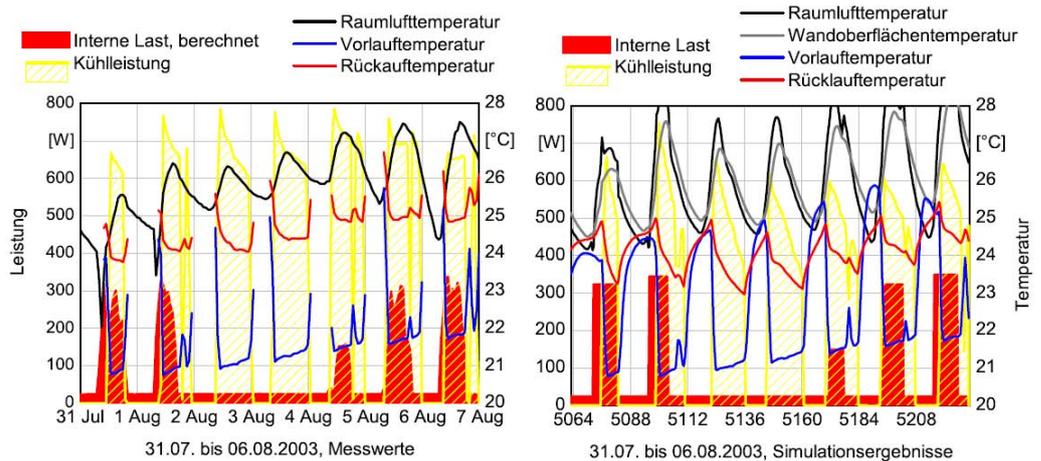


Bild 5-4: Systemtemperaturen und Last, links: Messwerte, rechts: Simulationsergebnisse (sim12).

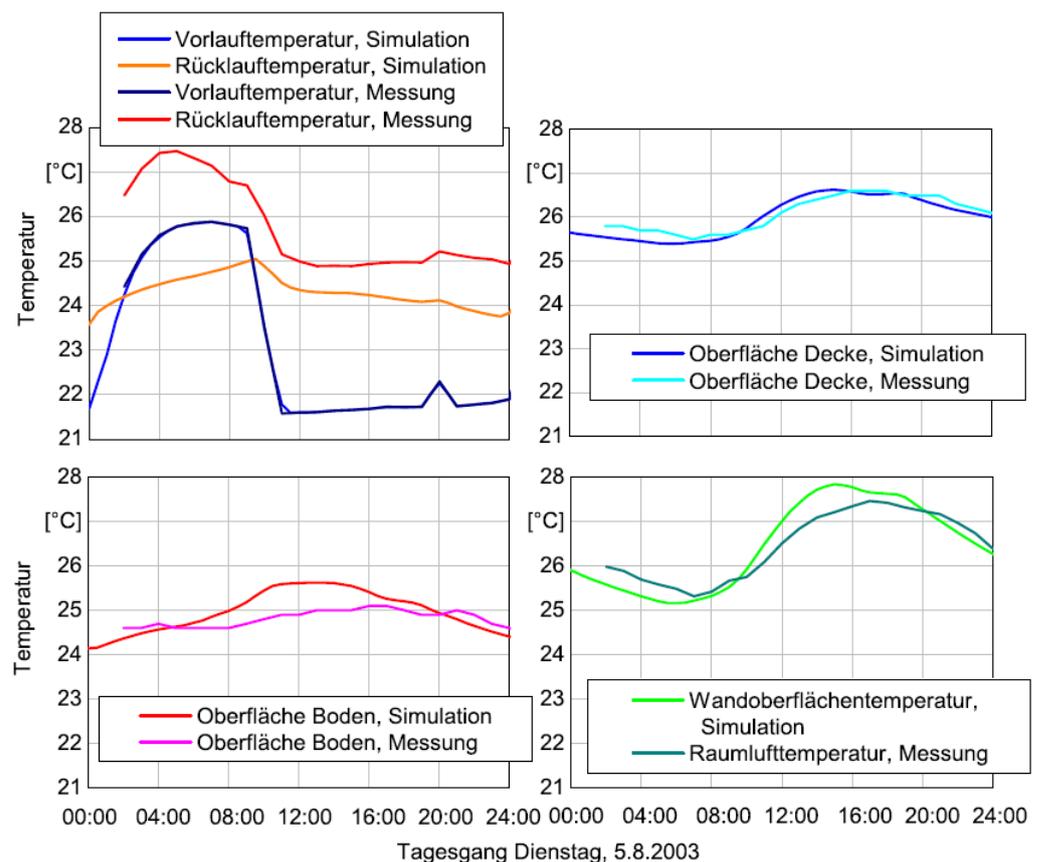


Bild 5-5: Tagesgang der Oberflächen-, System- und Raum- bzw. Wandtemperaturen, Messwerte im Vergleich zu Simulationsergebnissen (sim12).

5.2.2 Ergebnis der Validierung

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden der Einfluss veränderter Kopplungen des Modells an den Flurbereich, unterschiedliche Sonnenschutzzustände,

veränderte Eingangsbedingungen durch die Variation der Einschwingphase und die Modellierung mit einem errechneten vertikalen Temperaturgradienten für die Raumluft auf die Ergebnisgrößen geprüft. Als Vergleichsgrößen mit den Messwerten dienten dabei die Kühlleistung, mittlere und maximale Temperaturen und die mittlere Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur (vgl. Tabelle 5-1). Das letztendlich realistischste und am besten angenäherte Modell (sim12) weist etwa 20% weniger Kühlleistung bei ähnlichen mittleren Temperaturen auf. Diese bleibende Differenz hat in der Simulation folgende Ursache: Die Rücklauftemperatur ist zu Beginn der Kühlzeit im Tagesverlauf rund 0,5 K und am Ende der Kühlzeit rund 1 K niedriger als die gemessene Rücklauftemperatur. Durch diese geringere Differenz ist folgerichtig auch die Kühlleistung geringer. Die Oberflächentemperaturen von Boden und Decke, die für den Wärmestrom ausschlaggebenden Größen, stimmen im Wochenverlauf jedoch recht gut mit den gemessenen Temperaturen überein (vgl. Bild 5-5). Diese Diskrepanz kann im Wesentlichen zwei Ursachen haben: Das recht einfache Modell für die TABS bzw. die Fußbodenheizung als homogene Heiz-/Kühlschicht innerhalb des Fußbodenaufbaus bildet die Realität nicht hinreichend genau ab oder die Messwerte sind nicht detailliert genug, um als Eingangs- und Vergleichsgrößen zu dienen. Jeder Sensor weist zudem gewisse Messungenauigkeiten auf. Diese können bei den hier für die Langzeitmessungen eingesetzten Fühlern bis zu $\pm 0,5$ K betragen. Die Validation ist dann also das Ergebnis der Summe aller Fehler.

Die Messwerte können mit Hilfe des Raummodells in IDA-ICE in gewissen Grenzen nachempfunden werden. Für die exakte Validation des Moduls für die TABS sind die Messwerte hingegen nicht geeignet. Falls ein Feldversuch unter realen Bedingungen überhaupt dazu dienen kann, sollten temporär sensiblere Fühler installiert und die Randbedingungen (insbesondere der Zustand des Sonnenschutzes, die Unsicherheiten bzgl. seiner physikalischen Kenngrößen bleiben allerdings bestehen) genau dokumentiert werden.

5.3 TRNSYS

In Anlehnung an Schalk [5] soll für die Validierung des Simulationsmodells zunächst der Zeitraum Donnerstag 31.07.2003 – Mittwoch 06.08.2003 genutzt werden. Für eine Validierung des Raummodells sind nicht alle notwendigen Informationen in ausreichender Qualität vorhanden. Dazu zählen insbesondere:

- Raumnutzung

Grobe Belegungsmuster lassen sich nur anhand der zur Verfügung stehenden Informationen zur Öffnung von Fenster und Türen (Fenster- und Türkontakte), der Beleuchtung sowie des Elektroenergiebezugs über Steckdosen ableiten. Weiterführende Hinweise zur Art der Nutzung sind nicht gegeben.

- Verschattung

Es sind keine Aussagen über die Aktivitäten der Verschattung möglich. Aufgrund der vollverglasteten Fassade hat aber gerade diese Größe einen entscheidenden Einfluss auf das Raumverhalten.

- Lüftung

Es sind lediglich die Öffnungsdauer von Fenster und Türen bekannt aus denen eine natürliche Außenlüftungsrate abgeleitet werden könnte. Der von der Lüftungsanlage eingebrachte Luftvolumenstrom kann aus dem Gesamtvolumenstrom des betreffenden Gebäudeteils nur näherungsweise ermittelt werden.

Anstelle einer Validierung des kompletten Raummodells soll daher hier nur beispielhaft das Simulationsmodell für das Fußbodensystem überprüft werden. Die Aufgabe besteht darin, Kühlleistung und Rücklauftemperatur aus dem Fußbodenheizungssystem mit Hilfe des Simulationsmodells zu berechnen und mit den Messwerten zu vergleichen. Das Fußbodensystem wird während des für die Validierung genutzten Zeitraumes zur Raumkühlung eingesetzt. Das Deckensystem ist während des hier gewählten Beobachtungszeitraumes nicht in Betrieb.

Über Messfühler im Innern des Fußbodens werden sowohl die vertikale Temperaturverteilung in der Mitte des Fußbodens als auch die horizontale Verteilung entlang der Rohrleitung in der Estrichschicht erfasst. Aus Bild 5-6 ist die Anordnung aller Messpunkte im Raum ersichtlich.

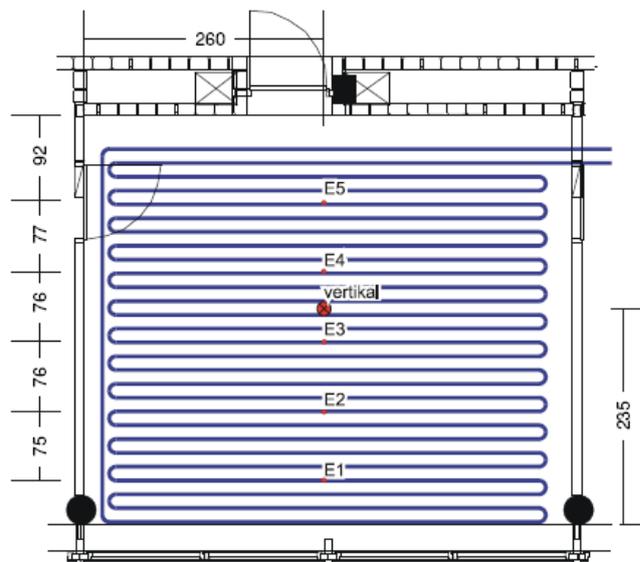


Bild 5-6: Anordnung der horizontalen Messfühler in der Estrichschicht und Lage der vertikalen Messpunkte (links) [19].

In Bild 5-7 sind Messwerte für das Fußbodensystem sowie die in Raummitte gemessene Lufttemperatur dargestellt. Die Vorlauftemperaturen im Kühlfall betragen 21...22°C bei einer Temperaturspreizung von 3K. Die nächtlich auftretenden höheren Vorlauftemperaturen von 24...26°C sind auf das Abschalten der zentralen Kälteerzeugung zurückzuführen. Während dieser Zeiten erfolgt lediglich eine Umwälzung des Kaltwassers innerhalb des Gebäudes. Die Temperaturspreizung beträgt dann nur noch etwa 1K.

Das Regelventil ist durchgängig geöffnet, so dass von einem konstanten Massestrom ausgegangen werden kann. Dieser beträgt laut Messprotokoll etwa 180 kg/h.

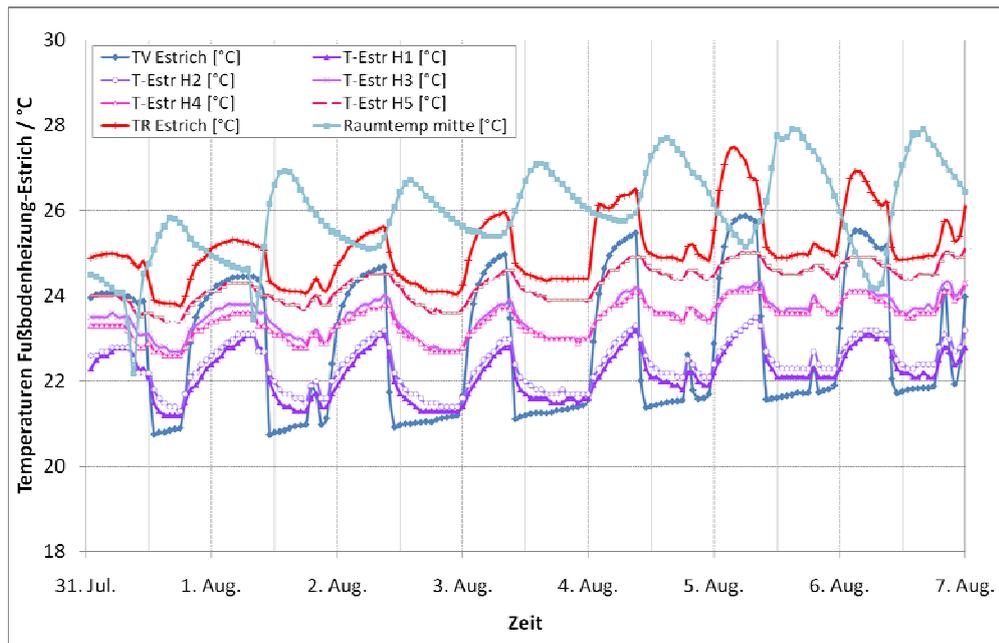


Bild 5-7: Messwerte für horizontale Messpunkte E1...E5 im Fußboden und Lufttemperatur in Raummitte.

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle auch die Ventilkennlinien angegeben (Bild 5-8), die jedoch in diesem Fall ohne Relevanz für das Verhalten des Fußbodensystems sind, da das Regelventil durchgängig geöffnet ist.

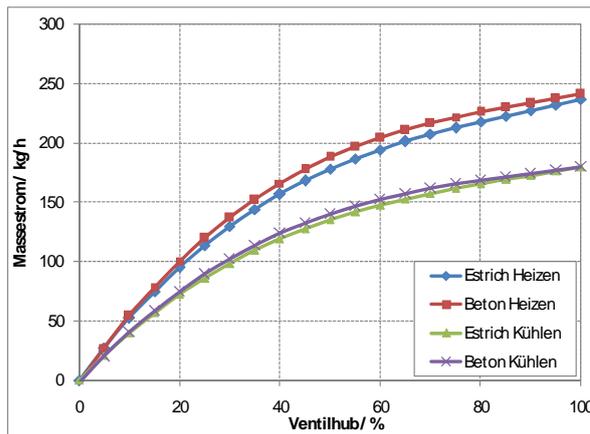


Bild 5-8: Ventilkennlinien für die Regelventile von Fußbodensystem (Estrich) und Deckensystem (Beton); Approximation aus Messwerten.

Wie aus Bild 5-7 zu erkennen ist, sind die Messwerte nur bedingt zu Validierungszwecken geeignet, da keine ausreichende Verlässlichkeit der Daten gegeben ist. So unterscheiden sich die Temperaturen H1 und H2 sowie H3 und H4 nur unwesentlich, was der zu erwartenden Auskühlung des Kühlmediums entlang des Strömungsweges widerspricht. Bemerkenswert ist zudem, dass die Rücklauftemperatur die Raumtemperatur z. T. deutlich überschreitet. Da eine nur kurzfristige Raumtemperaturabsenkung, z. B. infolge Lüftung nicht vorliegt, könnten folgende Ursachen in Frage kommen:

- Die gemessene Raumtemperatur unterscheidet sich deutlich von der Temperatur des Fußbodens und lässt keine Rückschlüsse auf dessen tatsächlichen thermischen Zustand zu. Die Temperatur des Fußbodens wird zwar ebenfalls messtechnisch erfasst. Die Messung erfolgt aber nur an einem Punkt und ist somit nicht repräsentativ. Die Messwerte sind in Bild 5-7 nicht dargestellt, entsprechen aber näherungsweise der Temperatur H5 und sind somit tiefer als die Rücklauftemperatur. Es kann außerdem davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Möblierung sowie der Aktivierung der Verschattung die hier nicht direkt berücksichtigte solare Absorption auf der Fußbodenoberfläche relativ klein ist.
- Zusätzlich Wärmegewinne und/oder -verluste an den Anbindeleitungen werden in Abhängigkeit der Anordnung der Temperatursensoren bei der Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen erfasst.
- Bild 5-9 zeigt die Einbausituation der Messfühler für die Vor- und Rücklauf-temperaturmessung sowie die Regelventile im Rücklauf.



Bild 5-9: Messfühler zur Erfassung der Vorlauftemperatur (links) und der Rücklauftemperatur (rechts) sowie Regelventile (ebenfalls rechts).

- Es gibt eine Beeinflussung der zentralen Kältebereitung auf den Massestrom der dezentralen Kälteabnehmer, d. h. der Massestrom durch das Fußbodensystem ändert sich, auch wenn das Regelventil durchgängig geöffnet bleibt. Ein geringerer Massestrom hätte eine größere Temperaturspannung zur Folge. Außerdem steigt der Einfluss externer Wärmegewinne.

Insgesamt gesehen reagiert die Rücklauftemperatur deutlich stärker auf Änderungen der Vorlauftemperatur, als dies bei den Temperaturen H1...H5 zu beobachten ist.

Für die Validierung wird der ausgewählte Büroraum vollständig nachgebildet. Die Festlegung der Randbedingungen sowie die Auswertung der Daten erfolgte jedoch ausschließlich im Hinblick auf das Fußbodensystem. Dabei wurde versucht, soweit wie möglich Messwerte zu nutzen, um die aus fehlenden Informationen (siehe oben) resultierenden Unsicherheiten zu minimieren.

Als Eingangsdaten in das Modell wurden vorgegeben:

- Gemessene Vorlauftemperatur und Massestrom für das Fußbodensystem,
- angrenzenden Raumtemperaturen oberhalb und unterhalb der gesamten Decken/Fußbodenkonstruktion.

Als Ausgabedaten waren mit Hilfe des Modells zu berechnen:

- Rücklauftemperatur für das Fußbodensystem,
- die an das Bauteil übertragene Heiz-/Kühlleistung.

Ergebnisse der Simulation im Vergleich mit Messwerten für die Rücklauftemperatur sind in Bild 5-10 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass berechnete und gemessene Rücklauftemperaturen während der täglichen Kühlphasen sehr gut übereinstimmen. Lediglich während der nächtlichen Betriebszustände ohne zentrale Kühlung sind deutliche Temperaturdifferenzen (0,5...1,5 K) zwischen Rechen- und Messwert zu beobachten. Die in den Simulationsrechnungen ermittelte Rücklauftemperatur weicht während dieser Zeiten nur um 0...0,5 K von der Vorlauftemperatur ab, d. h. es wird keine thermische Leistung übertra-

gen. Dies entspricht auch der Vorgabe einer gebäudeinternen Umwälzung ohne Einbeziehung der zentralen Kälteerzeugung.

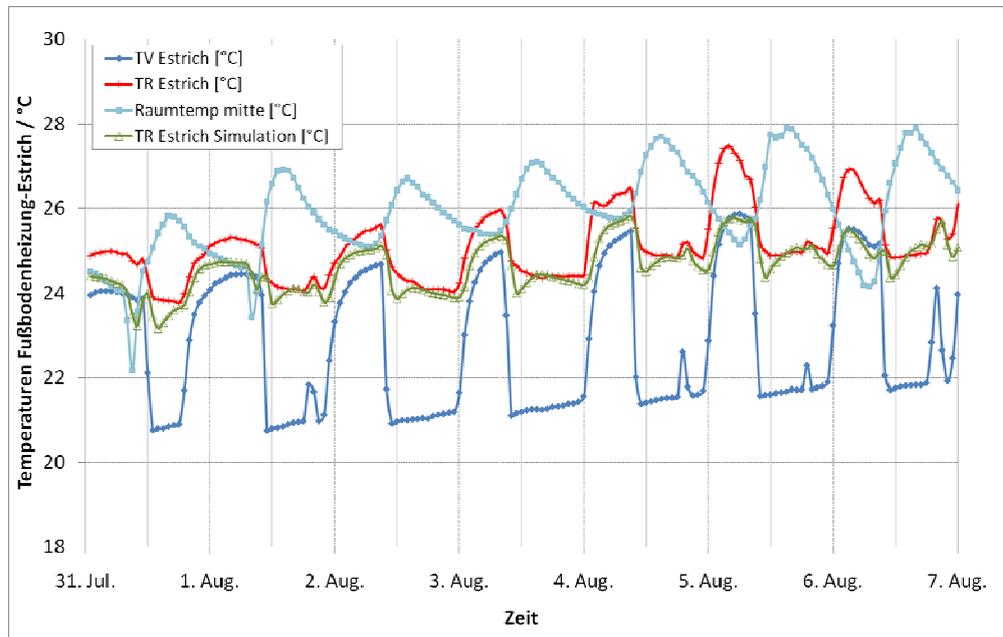


Bild 5-10: Berechneter Verlauf der Rücklauftemperatur im Fußbodensystem im Vergleich mit ausgewählten Messwerten.

Die zugehörige Darstellung der Heiz-/Kälteleistung in Bild 5-11 zeigt eine grundlegende Übereinstimmung von Messung und Simulation, jedoch:

- Die gemessene Spitzenlast unmittelbar nach Zuschaltung der zentralen Kälteerzeugung wird in der Simulation nicht erreicht.
- Während der nächtlichen Betriebsphasen, in denen lediglich eine Umwälzung des Wasserinhalts innerhalb des Gebäudes, nicht jedoch eine zentrale Wärmeabfuhr erfolgt, wird keine Kühlleistung ausgewiesen. Mit Hilfe des Simulationsmodells lässt sich jedoch auch für diese Betriebszustände eine Auskühlung des Fußbodens nachweisen.

Hinsichtlich der in dem untersuchten Zeitraum insgesamt übertragenen Kälteenergie ergibt die Simulationsrechnung einen um etwa 12% größeren Wert (63,9kWh anstelle von 57,1kWh). Werden nur die Zeitabschnitte mit zentraler Kälteerzeugung ausgewertet ergibt sich eine Abweichung von unter 5% (54,4kWh).

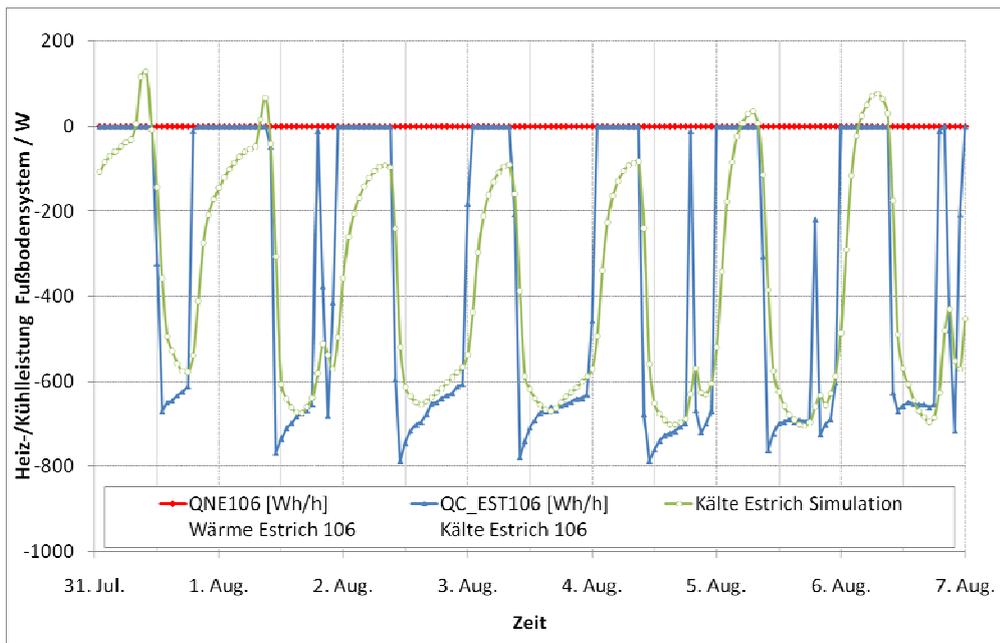


Bild 5-11: Heiz-/Kühlleistung Fußbodensystem im Vergleich mit Simulationsergebnissen.

Trotz der für eine exakte Validierung nur unzureichenden Belastbarkeit der vorhandenen Messwerte konnte somit gezeigt werden, dass das thermische Verhalten des Fußbodensystems ausreichend genau nachgebildet werden kann. Eine Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle (z.B. TABS im Deckensystem) ist aufgrund der prinzipiell gleichartigen Modellierungsansätze möglich.

6 Validierung mit RADTEST

Die Internationale Energieagentur (IEA) hat in den Jahren 1996-2002 im Rahmen ihres Solar Heating and Cooling Programms (SHC) das Forschungsprojekt Task22 durchgeführt. Innerhalb dieses Projektes wurde u. a. ein Testverfahren zur Validierung von Rechenmodellen für die thermische Bauteilaktivierung erarbeitet. Bei diesem sogenannten RADTEST (Achermann, et al., 2003 [20]) handelt es sich um ein vergleichendes Testverfahren, bei dem die Ergebnisse mehrerer Simulationsprogramme miteinander verglichen werden. Rechenmodelle gelten als validiert, wenn deren Ergebnisse innerhalb eines aus allen vorliegenden Ergebnissen abgeleiteten Bereiches liegen und Änderungen der Simulationsrandbedingungen zu ähnlichen Änderungen der berechneten Größen führen.

In RADTEST sind die jährliche Heiz- und Kühlenergie, sowie die Raum- und ggf. Systemtemperaturen für ein einfaches Gebäude (Bild 6-1), das unterkellert und mit einer Fußbodenheizung ausgestattet ist, zu berechnen.

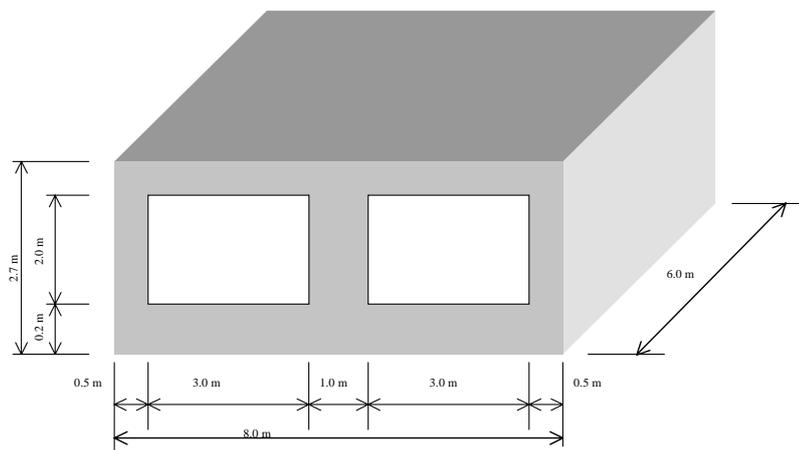


Bild 6-1: Gebäude aus RADTEST [20].

Die Modellierung der Fußbodenheizung erfolgt auf zweifache Weise:

- ein vereinfachtes Modell mit Vorgabe einer einheitlichen Schichttemperatur oder
- ein detailliertes Modell mit Nachbildung des hydraulischen Systems.

Bild 6-2 zeigt schematisch die beiden unterschiedlichen Modellierungsansätze. Für das hydraulische System sind das Verlegemuster und die Rohrdimensionierung bekannt, Bild 6-3.

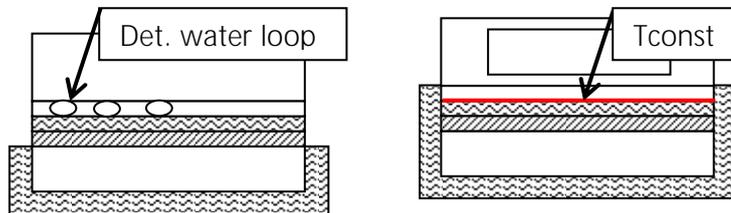


Bild 6-2: Unterschiedliche Modellierungsansätze in RADTEST: Vereinfacht (links) oder detailliert (rechts).

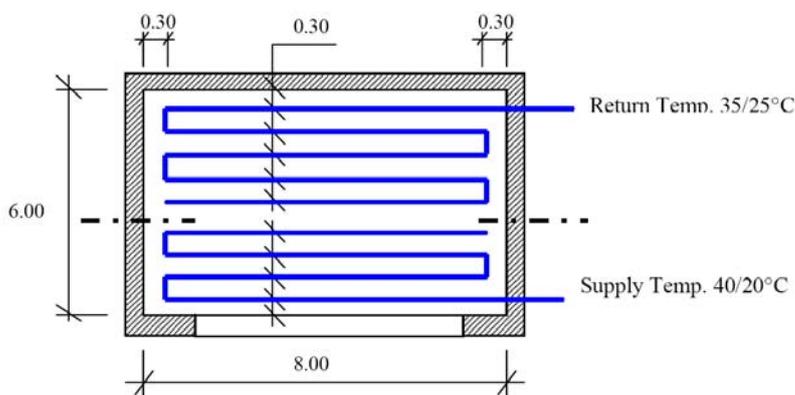


Bild 6-3: Verlegemuster für detailliertes Modell in RADTEST.

Das Simulationsprogramm TRNSYS hat das Validierungsverfahren durchlaufen. Es sollen hier nur beispielhaft drei Ergebnisreihen aufgeführt werden. Ausführliche Ergebnisse sind in Achermann [20] enthalten. So sind in Bild 6-4 die Raumtemperaturen, in Bild 6-5 die zeitlichen Verläufe der Oberflächentemperatur des Fußbodens und in Bild 6-6 die Rücklauftemperaturen, wie von den entsprechenden Simulationsprogrammen berechnet, jeweils für eine ausgewählte vier-tägige Sommerperiode dargestellt.

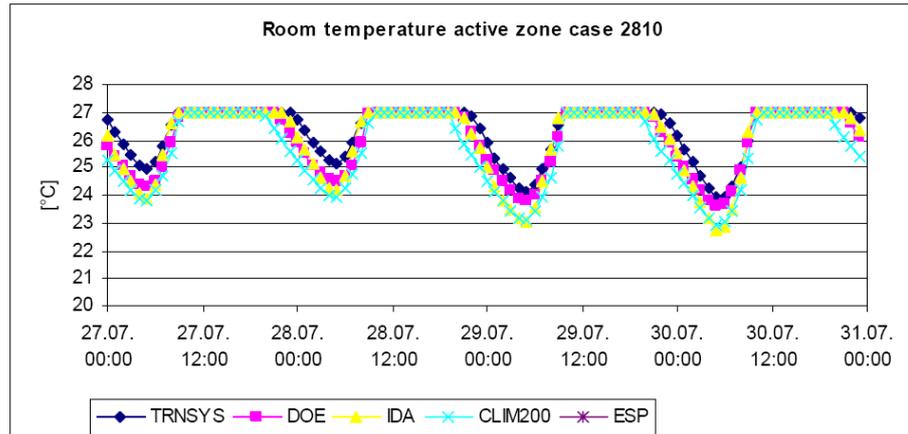


Bild 6-4: Raumtemperaturen im Sommer (Case 2810 aus RADTEST).

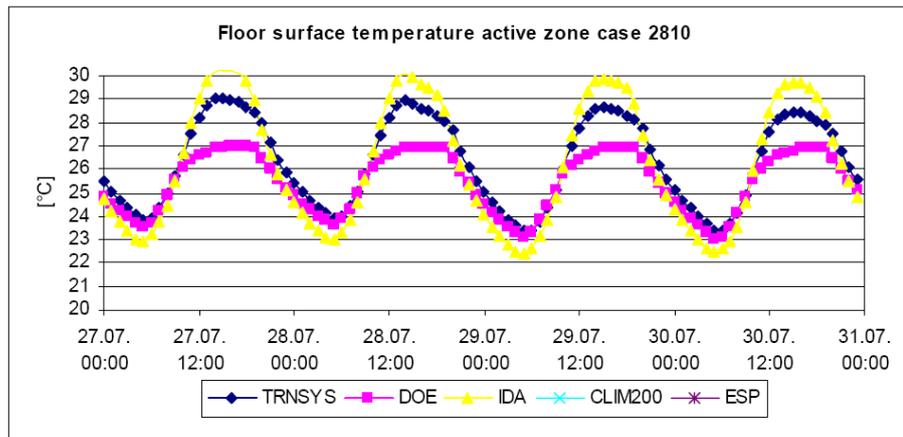


Bild 6-5: Oberflächentemperatur Fußboden im Sommer (Case 2810 aus RADTEST).

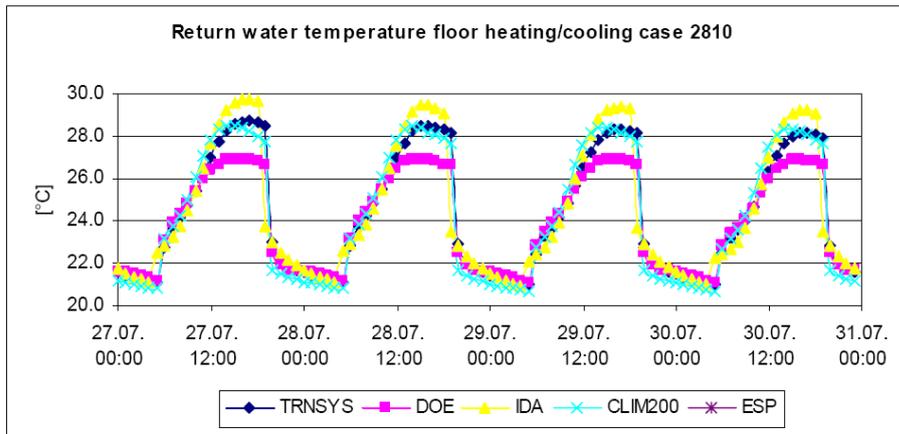


Bild 6-6: Rücklauftemperatur Fußboden im Sommer (Case 2810 aus RADTEST).

Es ist eine Übereinstimmung zwischen den Programmen zu erkennen. Sowohl TRNSYS als auch IDA-ICE erfüllen die Hauptkriterien des Testverfahrens und können somit als validiert gemäß RADTEST angesehen werden.

7 Modellbildung Referenzfall

Es wird zunächst eine Referenzvariante definiert und für diese die Bestimmung der Aufwandszahl dokumentiert. Von dieser ausgehend werden Varianten gebildet. Tabelle 9-3 auf Seite 79 gibt einen Überblick über die untersuchten Randbedingungen.

7.1 Raummodell

Die folgenden Angaben kennzeichnen das Raummodell und die Nutzungsrandbedingungen für die Referenzvariante. Abweichungen von diesen Angaben für Parametervariationen sind an entsprechender Stelle dokumentiert.

7.1.1 Geometrie und Bauteile

Das Simulationsmodell stellt analog zu Hauser, Kempkes [7] und Olesen [8] einen Ausschnitt aus einem zweihöftigen Bürogebäude dar. Ergebnisse werden anhand eines Zentralraumes [26] (Büro Ost, bzw. West) diskutiert. Dieser soll das thermische Verhalten aller Gebäuderäume die wenigstens zwei Räume von Dach-, Eck- und Erdgeschossräumen entfernt liegen kennzeichnen. Lediglich die beiden Wände mit den Fenstern grenzen an die Außenluft. Die beiden Innenwände senkrecht zur Fassade sowie Boden und Decke stellen die Systemgrenzen dar. Diesseits und jenseits der Innenwände liegen exakt die gleichen Randbedingungen in Form der Raumlufttemperatur, der Wärmeübergangskoeffizienten und der durch Strahlung induzierten Oberflächenwärmequelle dar. Die Innenwand parallel zur Fassade ist jeweils mit dem Flur verbunden. Auf der Unterseite des Fußbodens, d. h. der Deckenfläche des darunterliegenden Raumes, herrscht die gleiche Quellenstärke wie auf der Deckenunterseite des betrachteten Raumes. [26]

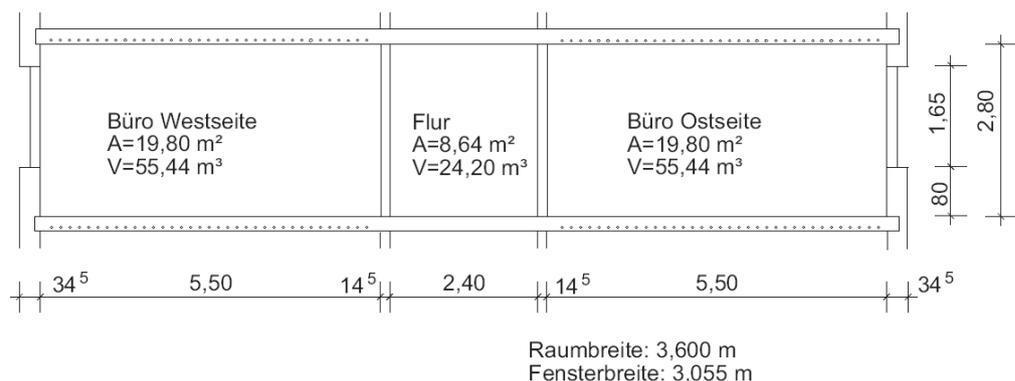


Bild 7-1: Raumgeometrie des untersuchten 3-Zoners.

Tabelle 7-1: Materialkennndaten der modellierten Bauteile, der Emissionsgrad ε wird für alle Baustoffe mit 0,9 angenommen.

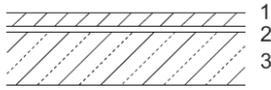
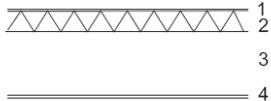
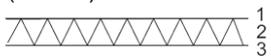
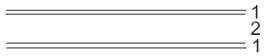
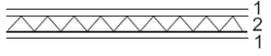
Bauteil	Material	λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	c [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	s [m]
1 Geschossdecke 	1 Estrich	1,4	2000	1000	0,045
	2 Trittschalldämmung	0,04	50	1380	0,020
	3 Stahlbeton	2,1	2400	1000	0,180
2 Außenwand, schwer (EnEV, Referenzfall)  U= 0,241 W/(m ² ·K)	1 Außenputz	0,7	1000	1000	0,008
	2 Dämmung	0,04	40	1380	0,140
	3 Kalksandstein	0,56	1200	1000	0,240
	4 Innenputz	0,35	1200	1000	0,015
2 Außenwand, schwer (Kempkes/Olesen) U= 0,37 W/(m ² ·K)	1,3 und 4 wie oben				
	2 Dämmung	0,04	40	1380	0,080
2 Außenwand, schwer (Passivhaus) U= 0,099 W/(m ² ·K)	1,3 und 4 wie oben				
	2 Dämmung	0,035	40	1380	0,33
2a Außenwand, leicht (EnEV)  U= 0,24 W/(m ² ·K)	1 Aluminium	200	2600	1000	0,002
	2 Dämmung	0,04	30	1000	0,16
	3 Aluminium	200	2600	1000	0,002
3 Innenwand, schwer  Grundvariante	1 Putz	0,35	1200	1000	0,015
	2 Kalksandstein	0,99	1800	1000	0,115
3a Innenwand, leicht 	1 Gipskarton	0,21	900	1000	0,025
	2 Dämmung	0,04	20	1000	0,060

Tabelle 7-2: Kenndaten der Fenster und des Sonnenschutzes.

4 Fenster Büroraum (EnEV, Referenzfall) $A = 5,04 \text{ m}^2$ (3,055 m · 1,65 m)	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $U_f = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Rahmenanteil = 30% $g = 0,58 \tau_e = 0,50$	Sonnenschutz durch außen liegende, drehbare Lamellenjalousie, $F_c = 0,25$, Abminderungsfaktor des Transmissionsgrades durch den Sonnenschutzes: 0,15 nach DIN 4108-6, lichtabhängige, automatische Steuerung: ab $300 \text{ W}/\text{m}^2$ Gesamtstrahlung auf die Fassade wird der Sonnenschutz aktiviert, sinkt die Strahlung unter $200 \text{ W}/\text{m}^2$ öffnet er wieder.
4a Fenster Büro- raum (Kempkes/Olesen)	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $U_f = 2,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Rahmenanteil = 30% $g = 0,58 \tau_e = 0,50$ sonst wie oben	
4b Fenster Büro- raum (Passivhaus)	$U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $U_f = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Rahmenanteil = 30% $g = 0,55 \tau_e = 0,46$ sonst wie oben	

7.2 Nutzungsrandbedingungen

Tabelle 7-3: Nutzungsrandbedingungen Flur.

Nutzungszeiten	wochentags von 7:00 bis 18:00 Uhr
Nacht- und Wochenendabsenkung	4 K
Ideale Heizung	21 °C
Kühlung	keine
Mechanischer Luftwechsel	kein
Infiltration	keine
Interne Wärmequellen	nur Beleuchtung: 22 W, 50% konvektiv
Feuchteintrag	kein

Tabelle 7-4: Nutzungsrandbedingungen Büro.

Nutzungszeiten	wochentags von 7:00 bis 18:00 Uhr
Nacht- und Wochenendabsenkung	4 K
Betrieb Heizung und Lüftung	5:00 bis 18:00 Uhr
Ideale Beheizung	21 °C
Ideale Kühlung	26°C
Mechanischer Luftwechsel	1,5 1/h, während der Betriebszeiten 80% WRG, 6. Mai bis 23. September WRG aus, dann Außenluft
Infiltration, zusätzlich zur Lüftung	0,1 1/h
Interne Wärmequellen, entspr. DIN V 18599	Während der Nutzung:
für Beleuchtung	120 W
Personen und Arbeitshilfen	130 W
Feuchteeintrag	kein

7.3 Klimarandbedingungen

Als Klimadatenatz wird das Referenzklima Deutschland, das TRY 05 Würzburg verwendet. Der Mittelwert der Außenlufttemperatur beträgt 8.9 °C. Die Solarstrahlungsdaten sind als diffuse und direkte Strahlungsanteile auf eine horizontale Fläche verfügbar und werden von den Simulationsprogrammen in Abhängigkeit der sich verändernden Sonnenposition in die fassadenorientierten Bestandteile umgerechnet. Wie sich bei einem Vergleich der beiden Programme IDA-ICE und TRNSYS gezeigt hat, werden jedoch unterschiedliche Strahlungswärmeströme auf die Ost- und Westfassade des Referenzgebäudes berechnet. Die Ursache hierfür ließ sich im Rahmen dieses Projektes nicht finden. Die zu beobachtenden Abweichungen an sich bestätigen aber die Erkenntnisse aus anderen Projekten (z.B. IEA Task34), wonach bereits grundlegende Vorgänge (hier z. B. der Strahlungsgang der Sonne) von den Simulationsprogrammen unterschiedlich abgebildet werden. Im Hinblick auf einen möglichst vollständigen Abgleich der beiden Programme wurde entschieden, in TRNSYS das zeitliche Profil der auf die Fassaden auftreffenden Solarstrahlung, so wie von IDA berechnet, vorzugeben, so dass eine mögliche Quelle für Abweichungen zwischen den Programmen eliminiert ist. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze zur Behandlung der Klimadaten auf den jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf verdeutlicht Bild 7-2.

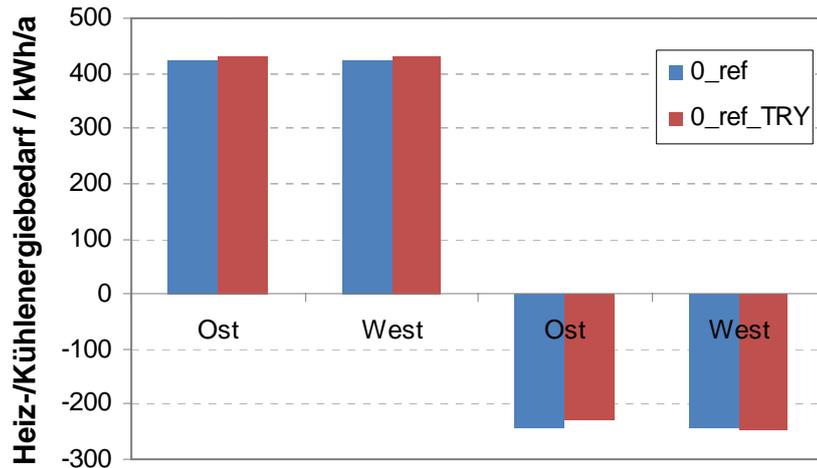


Bild 7-2: Auswirkungen unterschiedlicher Klimadaten auf den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf (0_ref: Solarstrahlung auf Fassade vorgegeben, berechnet mit IDA-ICE; 0_ref_TRY: Solarstrahlung auf Horizontale aus Wetterdatensatz).

7.4 Modellierung des TABS

Aufbau

Die Decke und der Boden des Modells sind miteinander verknüpft, das bedeutet, die Unterseite des Fußbodens hat die gleiche Temperatur wie die Oberfläche der Decke. In Bild 1.2 sind die gewählten Abmessungen dargestellt. In IDA-ICE wird das TABS als eine Heiz- bzw. KÜhlschicht modelliert. Es können also keine Rohrdurchmesser und Abstände variiert werden. TRNSYS berechnet den Wärmeübergang vom Rohrregister an das Bauteil in Abhängigkeit der bauphysikalischen Parameter unter Beachtung von Rohrdurchmesser und Verlegetabstand.

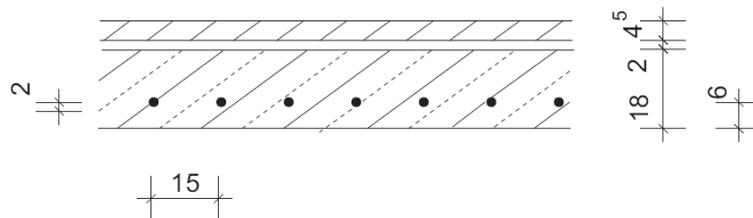


Bild 7-3: Aufbau Heiz- und Kühlsystem in der Decke bzw. dem Fußboden, Maße in cm.

Tabelle 7-5: Auslegungsparameter des TAB.

Fläche der Heiz-/Kühlschicht	19,8 m ²
Auslegungsmassenstrom	180 kg/h
Vorlauftemperatur	außentemperaturabhängig (siehe Bild 7-4)

Regelung

Der Betrieb des TABS ist sowohl im Heizfall als auch im Kühlfall jeweils wochentags zwischen 18:00 und 06:00 Uhr freigegeben. Freitag und Samstag Nacht ist das System außer Betrieb und wird am Sonntag Nachmittag ab 15:00 Uhr wieder freigegeben. Dieser Ansatz wurde Bezug nehmend auf Untersuchungen gewählt, welchen den Betrieb außerhalb der Belegungszeiten nahelegen. [8]

Die Vorlauftemperatur ist sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall durch die außen-temperaturabhängige Regelkurve (siehe Bild 7-4) vorgegeben. Ob dann tatsächlich die Pumpe in Betrieb geht wird mittels Schalttemperaturen entschieden. Sinkt die Raumlufttemperatur unter einen Grenzwert, geht das System in den Heizbetrieb. Übersteigt die Raumlufttemperatur einen Grenzwert geht das System in den Kühlbetrieb.

Diese Schalttemperaturen sind bei der Einregulierung in den angestrebten Temperaturbereich die Stellgrößen. Je kleiner das Tot-Band zwischen dem oberen und unteren Grenzwert umso länger ist das System in Betrieb und umso höher sind die ermittelten Aufwandszahlen.

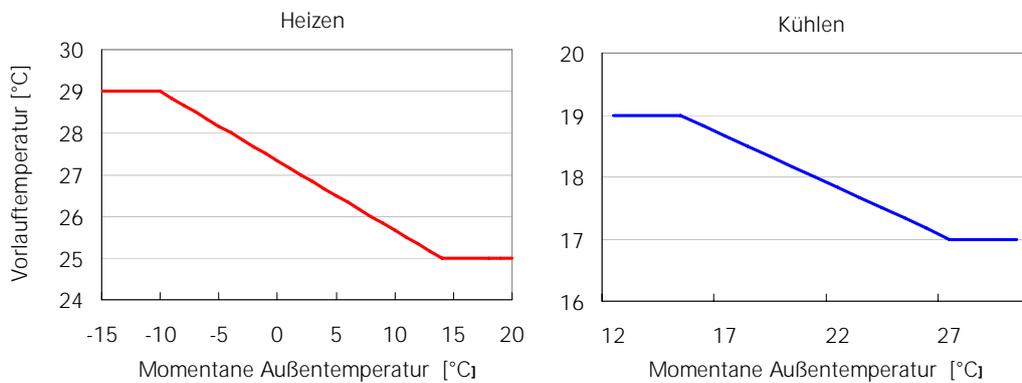


Bild 7-4: Außenlufttemperatur abhängige Vorlauftemperaturregelung.

8 Ergebnisse Referenzfall

8.1 Nutzenergiebedarf für das untersuchte Modell

Der Nutzenergiebedarf wird, wie bereits zuvor beschrieben, mit Hilfe thermisch-energetischer Simulationswerkzeuge bestimmt, indem ein idealisiertes System die geforderte Temperatur, bzw. einen Temperaturbereich mit minimiertem Energieeinsatz exakt einhalten kann.

8.1.1 Berechnung nach DIN V 18599

Parallel zur Simulation wurde der Nutzenergiebedarf mit Hilfe des Rechentools IBP18599 ermittelt. Die Eingabedaten sind im Anhang dokumentiert. Es wird ein Nutzwärmebedarf von 391 kWh/a und ein Nutzkältebedarf von 363 kWh/a ausgewiesen.

8.1.2 Simulationsergebnis

Der mittels IDA-ICE, bzw. TRNSYS ermittelte Nutzenergiebedarf im Vergleich zur DIN V 18599 ist in Tabelle 8-1 dargestellt.

Tabelle 8-1: Nutzenergiebedarf für den Referenzfall, Berechnung nach DIN V 18599 sowie durch Simulationen mit IDA-ICE, bzw. TRNSYS (jeweils Ost- und Westbüro gemittelt), *berechnet unter Zugrundelegen einer max. Raumtemperatur von 24,0°C während der Betriebszeit von 5:00 bis 18:00 Uhr

	Tool 18599	IDA-ICE	TRNSYS
Nutzwärme [kWh/a]	391	292	337
Nutzkälte [kWh/a]	363	183 324*	122 252*
spez. Nutzwärme [kWh/(m ² a)]	19,8	14,6	17
spez. Nutzkälte [kWh/(m ² a)]	18,3	9,2 16,4*	6,2 12,7*

Nach dem Verfahren der DIN V 18599 ergibt sich sowohl für den Heizwärme- als auch den Nutzkältebedarf ein deutlich höherer Wert. Folgende Randbedingungen könnten ursächlich zu den Differenzen zwischen statischer und dynamischer Ermittlung beigetragen haben:

- Klimadaten, siehe Kapitel 7.3
- Wärmerückgewinnung, die Betriebszeiten der in der Norm berücksichtigten Anlage sind unklar

- Sonnenschutz, die Sonnenschutzsteuerung wurde soweit bekannt an die Norm angepasst (siehe Kapitel 9.1.6)
- Die Anforderung an die Temperatur im Kühlfall, 24°C als Raum-Solltemperatur in der Kühlperiode scheinen eine Art mittlere Temperatur zu sein. Die mittlere Temperatur im simulierten Referenzfall (max. 26°C während der Nutzungszeit) liegt von Mai bis September bei: 25,9°C (Büro Ost und West gemittelt, auch außerhalb der Nutzungszeiten). Wird der Bedarf unter Zugrundelegen einer Zieltemperatur von 24,3°C bestimmt ergibt sich eine mittlere Raumtemperatur von Mai bis September von: 24,0°C.

Es liegt nahe, die große Differenz im Kühlfall an den sich in der Simulation einstellenden höheren mittleren Temperaturen (als 24°C die im Mittel der Bestimmung nach DIN V 18599 in der Kühlperiode zu Grunde liegen) fest zu machen.

8.1.3 Unterschiede zwischen IDA-ICE und TRNSYS

Es bestand zu Beginn der Untersuchungen das Anliegen, die zu verwendenden Simulationsprogramme gegeneinander abzugleichen. Wie jedoch ein Vergleich der Ergebnisse beider Simulationsprogramme anhand eines Referenzfalls vor Beginn der Untersuchungen gezeigt hat, traten nicht unerhebliche Unterschiede zwischen den beiden Simulationswerkzeugen auf. Es wurden sehr viele Untersuchungen durchgeführt um die Ursachen dieser Unterschiede zu erörtern. Einige Anpassungen der Randbedingungen wurden vorgenommen. Detaillierte Aussagen zu diesem Thema werden im Folgenden beschrieben.

Stationärer Fall

Anhand eines stationären Falles wurden die qualitativen und quantitativen Unterschiede zwischen den Programmen IDA-ICE und TRNSYS im Hinblick auf Raumtemperaturen und Heizleistung herausgearbeitet. Die stationäre Untersuchung bezieht sich auf einen mittleren Heizlastfall. Die konstante Außentemperatur beträgt 0°C. Solarstrahlung liegt nicht vor. Es wurden keine zusätzlichen inneren oder äußeren Wärmegewinne berücksichtigt. Die Aufgabe bestand darin, die Heizlast zu bestimmen, die zur Aufrechterhaltung einer Soll-Raumtemperatur von 21°C erforderlich ist. Als Regelgröße dient die operative Temperatur (Empfindungstemperatur).

Bild 8-1 zeigt die sich einstellenden Lufttemperaturen in den beiden Büroräumen des Referenzgebäudes. Die Unterschiede betragen etwa 0,1K. In Ergänzung dazu sind im Bild 8-2 die inneren Oberflächentemperaturen der Umfassungskonstruktion dargestellt. Hier werden größere Abweichungen von bis zu 0,4K (Außenwand) offenbar. Es wird deutlich, dass identische Empfindungstemperaturen in den beiden Programmen unterschiedliche Kombinationen von Luft- und Oberflächentemperaturen bedingen. Die zugehörige Heizleistung ist im Bild 8-3 aufgetragen. Der Unterschied zwischen beiden Programmen beträgt etwa 2%.

Eine wesentliche Erkenntnis aus der stationären Analyse ist die Feststellung, dass ungeachtet der identischen Regelgröße (Die Empfindungstemperatur wird von beiden Programmen mit exakt 21°C vorausgesagt.) ein geringfügig unterschiedliches thermischen Verhaltens der Gebäudehülle vorliegt. Ein letztlich

nicht weitergehend quantifizierter Einfluss des Wärmeübergangs ist nicht auszuschließen, da diesbezüglich in IDA-ICA und TRNSYS unterschiedliche Ansätze verfolgt werden.

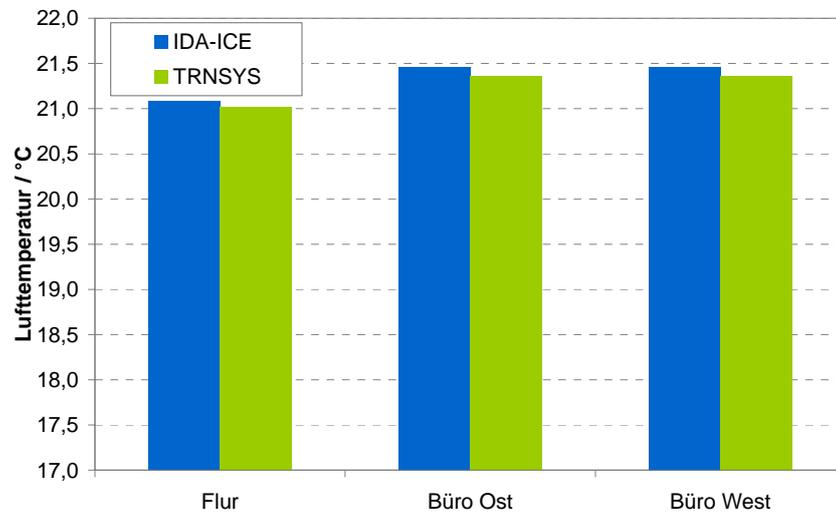


Bild 8-1: Raumlufttemperatur im Referenzgebäude unter stationären Bedingungen.

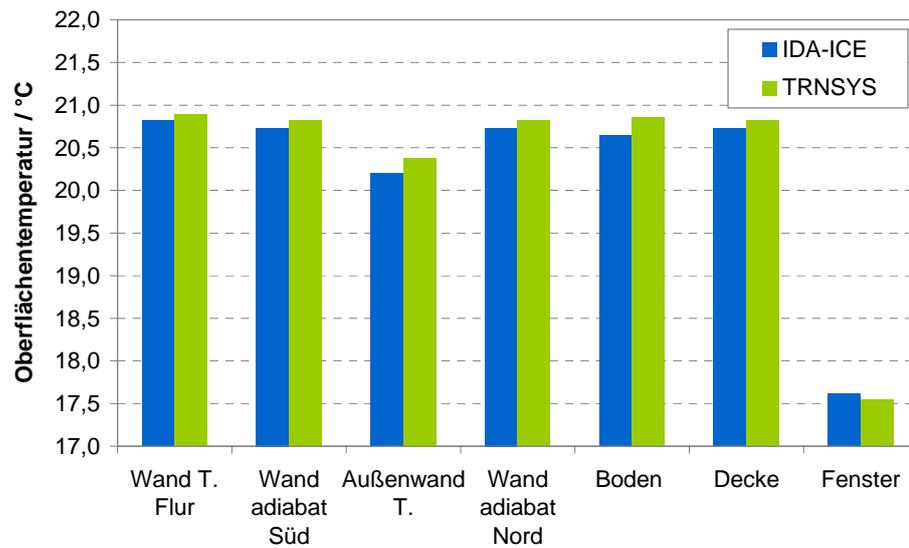


Bild 8-2: Oberflächentemperaturen innen im Referenzgebäude unter stationären Bedingungen.

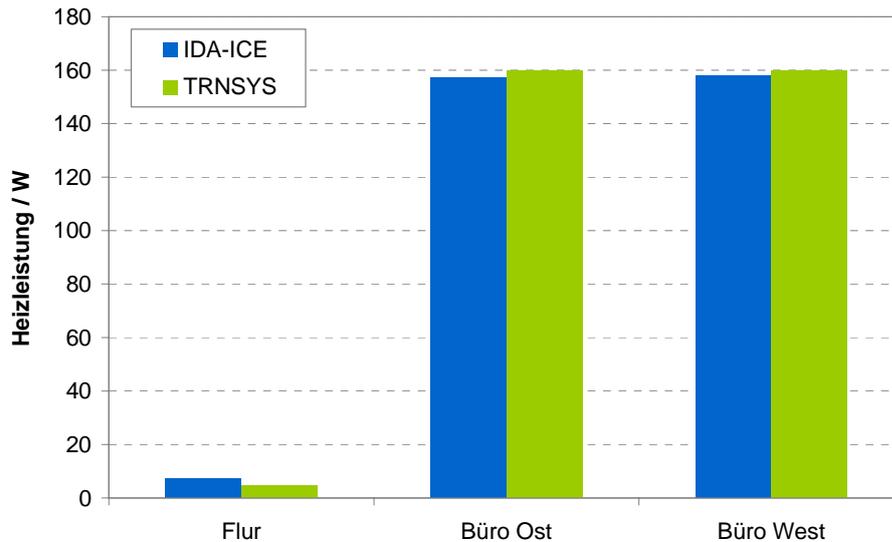


Bild 8-3: Heizleistungen im Referenzgebäude unter stationären Bedingungen.

Dynamischer Referenzfall

Als dynamischer Referenzfall zur Ausweisung der programmbedingten Unterschiede in den Simulationsergebnissen wurde ein ideal beheiztes bzw. gekühltes Referenzgebäude genutzt. Aus den vorliegenden Resultaten für einen vollständigen Jahresgang konnten die in Tabelle 8-2 zusammengefassten Daten ermittelt werden. Allgemeine Hinweise zum Raummodell sind im Abschnitt 7.1 beschrieben.

In Ergänzung dazu sind im Bild 8-4 verschiedene Tagesprofile für Raumluft- und Empfindungstemperatur aufgetragen aus denen die Unterschiede zwischen den Simulationsprogrammen offensichtlich werden. Es zeigen sich ähnliche Tendenzen wie auch beim RADTEST (siehe Bild 6-4 auf Seite 57) nämlich größere Amplituden im Temperaturverlauf bei IDA-ICE.

Tabelle 8-2: Ausgewählte Ergebnisse aus der dynamischen Jahressimulation des Referenz-Bürogebäudes (nur Westbüro).

	IDA-ICE	TRNSYS
Nutzwärme [kWh/a]	290	337
Nutzkälte [kWh/a]	198	132
Transmissionsverlust Fenster [kWh/a]	790	818
Mittlere Zulufttemperatur [°C]	10,82	10,79
Mittlere Empfindungstemperatur [°C]	23,22	23,06
Mittlere Lufttemperatur [°C]	23,07	23,02
Häufigkeit des Sonnenschutzes [h/a]	886	893

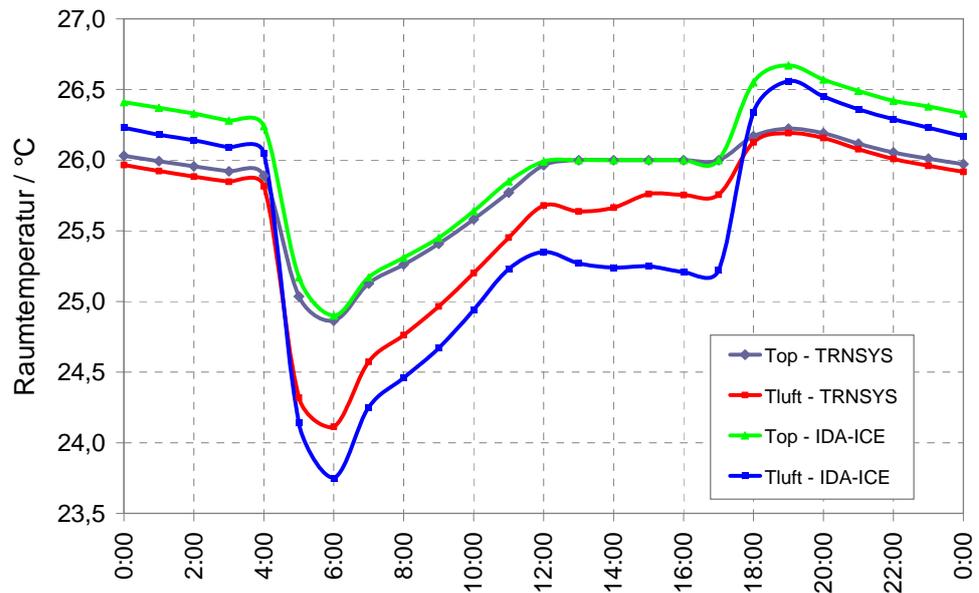


Bild 8-4: Vergleich eines sommerlichen Tagesprofils der Raumtemperaturen im Referenzfall, Büro West, Regelgröße ist die operative Temperatur, Beginn der Betriebszeit wegen Sommerzeit eine Stunde früher.

Ungeachtet der vorab dokumentierten Unterschiede und Differenzen zwischen den Simulationsprogrammen wird davon ausgegangen, dass die Auswirkungen auf die zu berechnenden Aufwandszahlen bzw. Nutzungsgrade vernachlässigbar sein werden, da diese immer durch Relation der Ergebnisse zweier Simulationsvarianten untereinander gebildet werden und keine absoluten Größen darstellen.

8.2 Aufwandszahlen für den Referenzfall

8.2.1 Vorgehensweise

Wie bereits erwähnt wurden die Schalttemperaturen, also die Grenzwerte der Raumlufttemperatur unter, bzw. über denen das System innerhalb der freigegeben Zeiten in Betrieb genommen wurde iterativ ermittelt. Ziel war, die Temperaturen immer über-, bzw. unterhalb denen des idealen Systems zu halten. Zwei Stunden pro Woche sollten als Abweichung zugelassen werden (siehe Kapitel 3.4). Bild 3-2 zeigt die Temperaturverläufe der beiden Wochen die maßgeblich für das Einhalten dieses Kriteriums verantwortlich sind.

Das TABS in der Referenzvariante von IDA-ICE hat die in Tabelle 8-3 aufgeführten Grenztemperaturen und die daraus resultierenden Betriebszeiten. Das heißt, sobald die Raumlufttemperatur während der potenziellen Betriebszeit (18:00 bis 6:00 Uhr) im Büro West unter 21,4 °C sinkt beginnt der Heizbetrieb. Liegt die Temperatur über 24,0°C startet der Kühlbetrieb.

Tabelle 8-3: Schalttemperaturen und Laufzeiten des Referenzfalles, IDA-ICE.

	Ost	West	
Heizen unter	21,4	21,4	[°C]
Kühlen über	24,1	24,0	[°C]
Laufzeit Heizen	545	531	h/a
Laufzeit Kühlen	357	455	h/a

Die entsprechenden Werte für das Programm TRNSYS enthält Tabelle 8-4. Auffallend sind vor allem die wesentlich kürzeren Laufzeiten der TABS im TRNSYS-Modell sowie der gegenläufige Trend für Ost und West Büro zwischen den Simulationsprogrammen.

Tabelle 8-4: Schalttemperaturen und Laufzeiten des Referenzfalles, TRNSYS.

	Ost	West	
Heizen unter	21,35	21,35	[°C]
Kühlen über	24,30	23,55	[°C]
Laufzeit Heizen	490	488	h/a
Laufzeit Kühlen	231	222	h/a

Eine wesentliche Randbedingung für den Betrieb der TABS ist die Einhaltung der Temperaturrandbedingungen. In den Simulationsrechnungen wurden für den Kühlfall die zulässigen Grenztemperaturen entsprechend DIN EN 15251 (siehe Kapitel 3.4) verwendet. Im Heizfall galten immer 21°C als minimal zulässige Temperatur während der Nutzungszeit. Wird die sich einstellende Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur aufgetragen ergibt sich die im Bild 8-5 exemplarisch dargestellte Punktwolke. Es sind gut die Über- bzw. Unterschreitungen der vorgegebenen Temperaturbänder zu erkennen. Insbesondere für den Heizfall zeigt sich aber auch, dass einige wenige Punkte unterhalb der Solltemperatur liegen. Diese „Ausreißer“ werden hervorgerufen durch eine vor der eigentlich Nutzungszeit durchgeführte Lüftung, die durch das TABS nicht ausgeglichen werden kann. Im Sinne einer sachgerechten Bewertung der Systeme müssen hier ggf. auch größere Überschreitungshäufigkeiten akzeptiert werden, da eine weitere Anhebung der Raumtemperatur eine offensichtliche Benachteiligung der grundlegenden Eigenschaft des Systems zur Sicherung der Mindesttemperaturen bedeuten würde. Hier ist im Einzelfall abzuwägen, inwieweit unter Beachtung aller weiteren Randbedingungen und sonstigen Umstände eine größere als die ursprünglich aus der DIN EN 15251 entlehnte Häufigkeit akzeptiert werden kann.

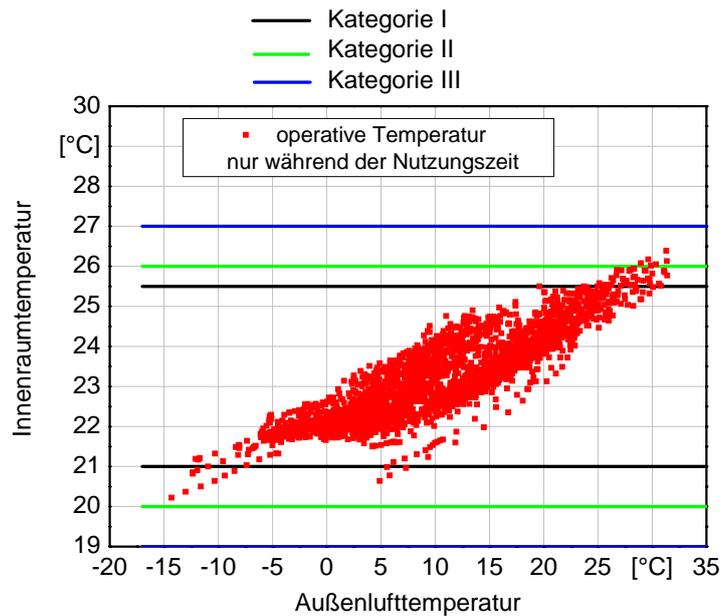


Bild 8-5: Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur, Referenzfall, IDA-ICE, Büro West.

8.2.2 Ergebnis

In der Tabelle 8-5 sind die Ergebnisse für den Referenzfall für IDA-ICE und TRNSYS tabellarisch aufgeführt. Farblich markiert sind jeweils die sich aus den Bedarfen ergebenden Aufwandszahlen. Im Anhang 0 befinden sich die tabellarischen Ergebnisse aller Varianten. Die Aufwandszahl_ziel wird ermittelt, indem der Bedarf unter Einsatz des TABS auf den Bedarf mit der Anforderung von 24,5 °C im Kühlfall bezogen wird. Die Aufwandszahlen sind erwartungsgemäß kleiner. In 10.1 auf Seite 81 ist dieser Zusammenhang näher beschrieben.

Tabelle 8-5: Ergebnisse für den Referenzfall.

	Heizen		Kühlen	
	Ost	West	Ost	West
0_ref, IDA-ICE TAB Betrieb [kWh/a]	390	401	-304	-383
ideal, Nutzenergiebedarf [kWh/a]	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl [-]</i>	1,33	1,38	1,81	1,93
ideal_ziel [kWh/a]	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel [-]</i>	1,32	1,37	1,13	1,27
0_ref, TRNSYS TAB Betrieb [kWh/a]	425	425	-242	-243
ideal, Nutzenergiebedarf [kWh/a]	337	337	-111	-132
<i>Aufwandszahl [-]</i>	1,26	1,26	2,18	1,83
ideal_ziel [kWh/a]	339	339	-200	-227
<i>Aufwandszahl_ziel [-]</i>	1,26	1,25	1,21	1,07

Die Berechnungen nach IDA-ICE weisen gegenüber TRNSYS einen geringeren Nutzwärmebedarf und besonders im Westbüro einen deutlich höheren Nutzkältebedarf aus. Auf mögliche Ursachen dafür wurde eingehend in Kapitel 8.1.3 auf Seite 66 eingegangen.

Der Energiebedarf unter Einsatz des TABS liegt ebenso im Heizfall unter, im Kühlfall über dem von TRNSYS errechneten. In Bild 8-6 sind sowohl die Temperaturverläufe unter Einsatz des TABS und im Idealfall dargestellt. Die Unterschiede zwischen IDA-ICE und TRNSYS werden deutlich. Die größeren Raumtemperaturschwingungen von IDA-ICE führen sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall (Büro West) zu größeren Aufwandszahlen.

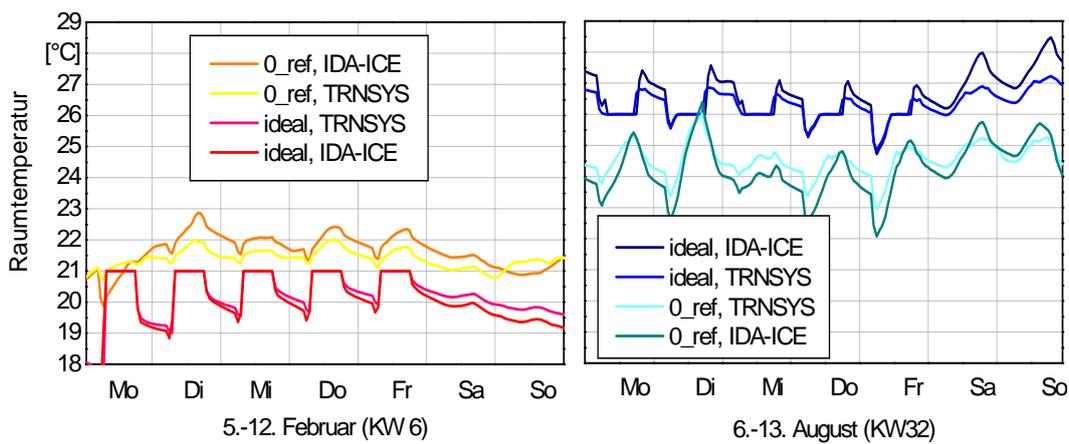


Bild 8-6: Raumtemperatur im Referenzfall, sowie im „Idealfall“ IDA-ICE und TRNSYS, jeweils Büro West.

9 Variantenbildung

9.1 Untersuchte Einflussgrößen

Immer ausgehend von dem Referenzfall werden die folgenden Randbedingungen variiert.

9.1.1 Innere Last

Während der Simulationen werden parallel die Lasten aus Personen und Arbeitsmittel (zusammengefasst) gemäß DIN V 18599-10 Tabelle A.2 Nutzungsprofil für Gruppenbüros und die Wärmezufuhr durch Kunstlicht angesetzt. Die Wärmeabgabe geschieht zu 50% konvektiv und zu 50% radiativ.

Personen und Arbeitshilfen

Tabelle 9-1: Wärmelast aus Personen und Arbeitshilfen gemäß Tabelle A.2 [13].

Maximale Belegungsdichte	tief	mittel	hoch
Wärmezufuhr [Wh/(m ² *d)] aus Personen und Arbeitshilfen	42	72	132
Last aus Personen und Arbeitshilfen [W] während der Nutzungszeit (A=19,8 m ²)	75	130	240

Kunstlicht

Die Wärmeeinträge aus Kunstlicht fließen in der DIN V 18599 in die Monatsbilanz ein. Wird der vorliegende Modellraum mit den Werkzeugen der Norm abgebildet, kann der Energiebedarf für Kunstlicht ermittelt werden (Randbedingungen s. Anhang 0). Wie **Tabelle 9-2** zeigt ist die monatliche Schwankung gering. Für Kunstlicht wird demnach der mit dem Berechnungswerkzeug nach Norm ermittelte Monatsmittelwert von 120 W während der Nutzungszeit als innere Wärmelast angesetzt.

Tabelle 9-2: Wärmelast durch Kunstlicht während der Nutzungszeit nach 18599 ermittelt.

Monat	Flur [W]	Büro [W]
Januar	22	127
Februar	22	121
März	22	119
April	21	112
Mai	22	114
Juni	21	110
Juli	22	114
August	22	116
September	21	115
Oktober	22	124
November	21	125
Dezember	22	135
Mittelwert	22	120

Zusammenfassend für Personen, Arbeitshilfen und Kunstlicht werden für die drei Lastprofile folgende Leistungen in Ansatz gebracht:

- **tief**, 195 W während der Nutzungszeit
- **mittel**, 250 W während der Nutzungszeit
- **hoch**, 360 W während der Nutzungszeit

9.1.2 Regelung

- **Ungeregelt:** Die Vorlauftemperaturen in Kühl- und Heizfall sind konstant (28°C und 18°C), der Massenstrom ist konstant mit 0,05 l/s, freigegeben wird dieser während der Betriebszeit in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur (Schaltpunkte). Diese Einschalttemperaturen sind die Stellschrauben um die TABS im Behaglichkeitsfeld einzuregeln.
- **VL-Temperatur außenlufttemperaturabhängig** geregelt: wie oben, jedoch ist die VL-Temperatur außenlufttemperaturabhängig (Regelkurven siehe Seite 64).

9.1.3 Bauweise

- **Leicht**, Ausführung siehe Tabelle 7-1.
- **Schwer**, Ausführung siehe Tabelle 7-1.

9.1.4 Wärmeschutz

Es werden drei unterschiedliche Wärmeschutzniveaus untersucht:

- **Kempkes [7]**, Ausführung und Kennwerte siehe Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 auf Seite 60.
- **EnEV**, Ausführung und Kennwerte siehe Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 auf Seite 60.
- **Passiv**, Ausführung und Kennwerte siehe Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 auf Seite 60.

9.1.5 Lüftung

- **Außenluft:** Es wird mit dem in den Randbedingungen angegeben Luftwechsell gerechnet, ohne WRG, allerdings wird die Betriebszeit verkürzt auf 7:00 bis 18:00 Uhr.
- **WRG:** Die WRG ist mit einer Rückwärmezahl von 80% während der Betriebszeiten aktiv, zwischen Montag, dem 6. Mai und Montag dem 23. September ist die WRG aus.
- **Konstante Zulufttemperatur:** Umschaltung von Sommer auf Winterbetrieb wie bei WRG, Zulufttemperatur Winter 18°C, Sommer 15°C
- **Ab 7:00 Uhr:** Die Lüftung wird erst mit Beginn der Nutzungszeit um 7:00 Uhr gestartet.

9.1.6 Sonnenschutz

Analog zu Teil 2 der DIN V 18599 wird eine Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m² [17] Gesamtstrahlung auf die entsprechende Fassade angesetzt. Die Hysterese beträgt 100 W/m², so dass der Sonnenschutz bei Unterschreitung von 200 W/m² wieder öffnet.

Es werden, ebenfalls analog zur Norm zwei Regelungen untersucht:

- **automatisch:** die o.a. Kriterien gelten während der gesamten Zeit.
- **manuell:** der Sonnenschutz wird nur während der Nutzungszeit nach o. a. Kriterien aktiviert, in der restlichen Zeit ist er inaktiviert.

9.1.7 Komfort

- **Kategorie I:** Im Kühlfall sollen die Raumtemperaturen unter Einsatz der TABS in dem Temperaturbereich von 24°C bis 25,5°C nach DIN EN 15251 liegen. Außerhalb der Nutzungszeiten dürfen diese um 4 K unter-, bzw. überschritten werden. Es gelten weiterhin die zugelassenen Abweichungen nach Tabelle G.1 der DIN EN 15251, 5% während und außerhalb der Nutzungszeit, relevant sind die Anzahl der Stunden pro Woche, pro Monat und pro Jahr.
- **Kategorie II:** wie oben, die Raumtemperaturen dürfen im Temperaturbereich von 23,0°C bis 26,0°C während der Nutzungszeit liegen.
- **Kategorie III:** wie oben, die Raumtemperaturen dürfen im Temperaturbereich von 22,0°C bis 27,0°C während der Nutzungszeit liegen.
- **Ziel:** Der obere Grenzwert sowohl für den idealen Betrieb sowie für die TABS liegt beim Zielwert nach DIN EN 15251 von 24,5°C.

9.1.8 Betrieb

- **nachts:** Der Betrieb der TABS wird lediglich wochentags zwischen 18:00 und 6:00 Uhr freigegeben, Sonntag schon ab 15:00 Uhr.
- **durchgängig:** Der Betrieb der TABS wird durchgängig freigegeben.

9.1.9 Einbautiefe

- **Fußbodenheizung:** Die Heizschicht wird mit 3 cm Überdeckung im Bodenaufbau modelliert. Der Betrieb der Fußbodenheizung wird wochentags zwischen 05:00 und 17:00 Uhr freigegeben, Montag morgen bereits ab 00:00 Uhr.
- **TABS:** Die Heizschicht wird mit 18,5 cm Überdeckung im Bodenaufbau modelliert (siehe Bild 7-3 auf Seite 63). Der Betrieb wird wochentags zwischen 18:00 und 06:00 Uhr freigegeben, Sonntag Nachmittag bereits ab 15:00 Uhr.
- **Kapillarrohrrmatte:** Die Heizschicht wird mit 0,6 cm Unterdeckung im Bodenaufbau modelliert. Der Betrieb wird wochentags zwischen 05:00 und 18:00 Uhr freigegeben, Montag Morgen bereits ab 02:00 Uhr. Massenstrom und Vorlauftemperatur wie im Referenzfall. Modellparameter für TRNSYS: Rohrdurchmesser 3,4 mm, 0,55mm Rohrwandstärke, Abstand 2cm.

9.1.10 Kühllast

Es wird eine Variante (23_ref_kuehlast_hoch) untersucht, die durch Kombination von hohen inneren Lasten, hohem Wärmeschutzstandard sowie manueller Sonnenschutzsteuerung (am Wochenende inaktiv, zusätzlich wird der Durchlassgrad der Verschattung von 0,15 auf 0,35 erhöht) gebildet wird. Ziel ist, den Einfluss einer möglichst hohen Kühllast auf die Kälteübergabe zu untersuchen.

9.1.11 TABS mit idealem Zusatzsystem

Das TABS übernimmt nur noch anteilig die Deckung des Heiz- bzw. Kältebedarf des Raumes und wird im wesentlichen zur Deckung einer Grundlast eingesetzt. Höherdynamische Lastschwankungen werden durch ein schnell regelndes Zusatzsystem (z.B. RLT) ausgeglichen.

Die Deckungsanteile für das TABS resultieren aus der Festlegung einer größeren Anzahl von Überschreitungsstunden als ursprünglich auf Basis der DIN EN 15251 angenommen. Diese zusätzlichen Verletzungen der Temperaturgrenzwerte müssen durch das ideale Zusatzsystem ausgeglichen werden. Als Zusatzsystem wird in der Simulationsrechnungen ein rein konvektives, verzögerungsfreies System modelliert.

Variante 20_ref_kombi: Das TABS wird betrieben wie im Referenzfall, allerdings mit konstanten Vorlauftemperaturen von 28°C im Heizfall und 18°C im Kühlfall. Das Tot-Band wird vergrößert um geringere Laufzeiten und damit eine geringere Deckung zu erzeugen. Dies wird für verschiedene Tot-Bänder durchgeführt um unterschiedliche Deckungsanteile zu erzeugen.

Variante 21_ref_kombi_21: Eine weitere Möglichkeit die Deckungsraten zu verringern ist eine Leistungsreduktion durch eine geringere Temperatur im Heizfall und eine höhere Temperatur im Kühlfall. In dieser Variante wird das TABS mit 24°C im Heizfall und 21°C im Kühlfall betrieben.

Variante 21a_ref_kombi_22,5: Über das ganze Jahr wird eine Temperatur von 22,5°C gefahren und zwar unabhängig von der Raumtemperatur jede Nacht zwischen 18:00 und 06:00 Uhr.

9.2 Übersicht und Nomenklatur

Tabelle 9-3: Variantenbildung, der Referenzfall ist durch die fettgedruckten Parameter gekennzeichnet

Innere Last (last)	Regelung (reg)	Bauweise (bau)	Wärme- schutz (schutz)	Lüftung (lü)	Sonnenschutz (so)	Komfort (komf)	Betrieb (betr)	Einbautiefe (einbau)	Deckungs- anteil
tief	Ungeregelt (unger)	leicht	Kempkes	Außenluft (al)	automatisch	I	18:00 bis 6:00 Uhr	Fußboden- heizung (fbh)	Nur TABS
mittel	außentem- peraturab- hängig (at)	schwer	EnEV	WRG	Manuell (man)	II	durch- gängig (durch)	TABS	TABS mit Zusatzsys- temsystem (kombi)
hoch			Passiv	konstant (konst)		III		Kapillar- rohrmatte (krm)	
				erst ab 7:00 Uhr		ziel			

Der Referenzfall ist gekennzeichnet durch die **fettgedruckten** Parameter.

Für den Referenzfall wird das Kürzel „ref“ eingeführt. Werden einzelne Parameter variiert wird die Bezeichnung dem Variantennamen hinzugefügt.

Es gibt pro Variante jeweils drei Simulationsdurchläufe:

- idealer Fall mit dem Zielwert des Komfortbereichs als Anforderung für den Kühlfall (24,5°C) (id_ziel_ref)
- idealer Fall mit dem oberen Grenzwert des jeweiligen Komfortbereichs (id_komf_ref)
- Einen TABS Fall: (tabs_ref)

Tabelle 9-4: Übersicht und Kennzeichnung der Varianten

	Variante
0	ref
1	ref_last_tief
2	ref_last_hoch
3	ref_reg_unger
6	ref_bau_leicht
7	ref_schutz_kempkes
8	ref_schutz_passiv
9	ref_lü_al
10	ref_lü_konst
11	ref_so_man
13	ref_komf_I
14	ref_komf_III
15	ref_komf_ziel
16	ref_betr_durch
17	ref_einbau_fbh
18	ref_einbau_krm
19	ref_lü_7
20	ref_kombi
21	ref_kombi_21
21a	ref_kombi_22,5
23	ref_kuehllast_hoch

10 Auswertung

10.1 Zielwertbetrachtung

Neben der Grenzwertbetrachtung wurde für jede Variante auch eine Zielwertbetrachtung durchgeführt. Im Kapitel 3.3.4 auf Seite 32 sind die Zusammenhänge bereits dargestellt. Demzufolge wird der TABS-Betrieb so geregelt, dass in beiden Fällen die Einhaltung des oberen Grenzwertes (rechts im Bild 10-1 obere Kurve) gewährleistet ist. Zur Bestimmung der Aufwandszahl_{ziel} wird nun der daraus resultierende Bedarf statt auf den Bedarf zur Einhaltung des oberen Grenzwertes auf den Bedarf zur Einhaltung des Zielwertes des Temperaturbereichs aller Komfortbereiche bezogen. Die Komfortkategorien sind im Kapitel 3.4 auf Seite 32 dargestellt.

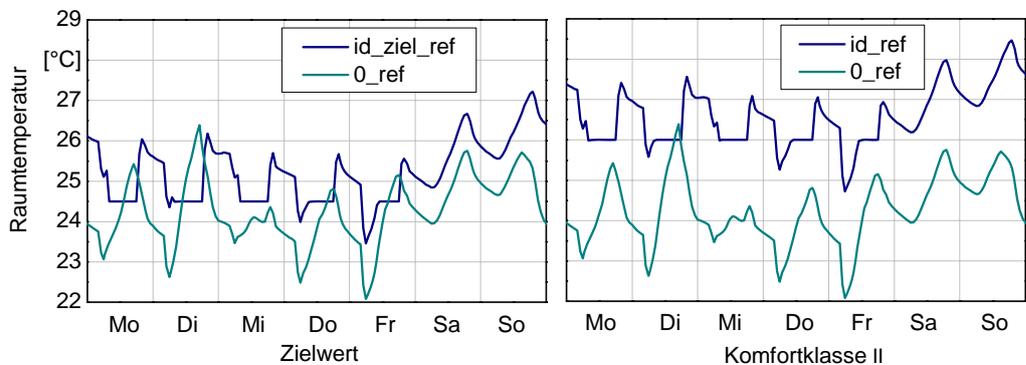


Bild 10-1: Temperaturverlauf einer Sommerwoche (IDA-ICE, Büro West), die untere Kurve repräsentiert jeweils den Betriebsfall des TABS, die obere Kurve entspricht links dem Zielwert von maximal 24,5°C während der Nutzungszeit, rechts dem oberen Grenzwert des Komfortbereichs II von maximal 26°C während der Nutzungszeit, eingehalten durch den idealen Kühler, zugehörige Aufwandszahl links: 1,27, rechts: 1,93.

Für den Kühlfall ergibt sich so für das Büro West in IDA-ICE so eine Aufwandszahl von 1,93 (zugehöriger Temperaturverlauf rechts in Bild 10-1) bezogen auf den oberen Grenzwert von 26°C. Wird derselbe Bedarf unter Einsatz des TABS auf den Zielwert von 24,5°C bezogen sinkt die Aufwandszahl_{ziel} auf 1,27 (Werte siehe Tabelle 8-5 auf Seite 71). Bei einigen Systemkonfigurationen (Varianten 10, 14, 16, 17, 18) ergibt sich eine Aufwandszahl_{ziel} kleiner eins. Dies ist möglich, da die Temperatur über die Soll-Temperatur schwankt anstatt konsequent darunter zu bleiben (im Kühlfall).

Bei den folgenden Variantenuntersuchungen werden im Kühlfall immer zugleich die Grenzwertbetrachtungen und die Zielwertbetrachtungen ausgewertet. Alle Ergebnisse sind tabellarisch im Anhang B dokumentiert.

10.2 Abhängigkeit vom Nutzenergiebedarf

Die Heiz- und Kühllastverläufe im Verhältnis zur Auslegungsleistung des TABS sind Maß für das Teillastverhalten bzw. die relative Belastung des Systems. Bei sonst unveränderten Randbedingungen kann der Nutzenergiebedarf als Maß für die jährliche mittlere Belastung des Systems herangezogen werden. Mit steigender Belastung (d.h. größerem Nutzenergiebedarf) sinken im Heizfall die Aufwandszahlen wogegen sinkende Belastungen (d.h. kleinere Bedarfswerte) tendenziell größere Aufwandszahlen zu Folge haben. Diese Zusammenhänge konnten auch in den Simulationsrechnungen bestätigt werden.

Heizen

Bild 10-2 zeigt diesem Zusammenhang anhand von fünf Varianten, die sich im Wesentlichen hinsichtlich ihres Nutzenergiebedarfes unterscheiden.

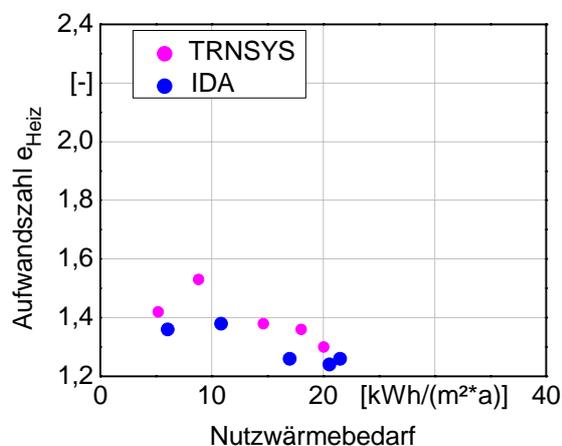


Bild 10-2: Abhängigkeit der Aufwandszahl vom Nutzwärmebedarf, Büro Ost und West, Varianten nach aufsteigendem Nutzwärmebedarf: 8_ref_schutz_passiv, 2_ref_last_hoch, 0_ref, 1_ref_last_tief, 7_ref_schutz_kempkes.

Kühlen

Im Kühlfall ist der Zusammenhang zwischen Bedarf und Aufwand bei der **Grenzwertbetrachtung** deutlicher ausgeprägt als im Heizfall. Bild 10-3 zeigt die Aufwandszahlen getrennt für TRNSYS und IDA-ICE. Der Wertebereich der Aufwandszahlen erstreckt sich zwischen ungefähr 1,2 und 2,2. Mit sinkendem Nutzkältebedarf steigt die Aufwandszahl stark an.

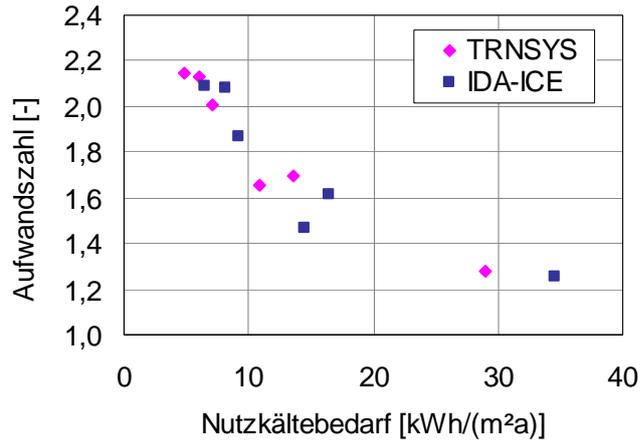


Bild 10-3: Abhängigkeit der Aufwandszahl vom Nutzkältebedarf, Büro Ost und West gemittelt, Varianten nach aufsteigendem Bedarf: 1_ref_last_tief, 7_ref_last_schutz_kempkes, 0_ref, 8_ref_schutz_last_passiv, 2_ref_last_hoch, 23_ref_kühllast_hoch.

Die Aufwandszahlen bei der **Zielwertbetrachtung** ergeben deutlich geringere Werte. Der Zusammenhang zwischen dem Nutzkältebedarf und der Aufwandszahlen_ziel ist in Bild 10-4 dargestellt. Bei IDA-ICE ist der Trend zu erkennen, bei den Ergebnissen von TRNSYS ist kein eindeutiger Zusammenhang erkennbar.

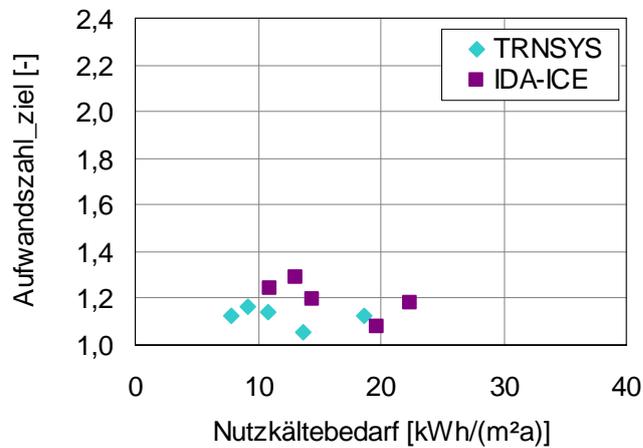


Bild 10-4: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel vom Nutzkältebedarf, Büro Ost und West gemittelt, Varianten nach aufsteigendem Bedarf: 1_ref_last_tief, 7_ref_last_schutz_kempkes, 0_ref, 8_ref_schutz_last_passiv, 2_ref_last_hoch, 23_ref_kühllast_hoch.

10.3 Innere Wärmegewinne

Die inneren Wärmegewinne haben einen direkten Einfluss auf den Nutzwärme- und Nutzkältebedarf der Räume. Die Abhängigkeit der Aufwandszahlen vom Belastungsgrad des Systems hat sich auch in den hier durchgeführten Untersuchungen bestätigt. Sowohl im Heizfall auch im **Kühlfall mit Grenzwertbetrachtung** sinken die Aufwandszahlen der betrachteten Varianten 1_ref_last_tief und 2_ref_last_hoch mit steigendem Nutzenergiebedarf. Die Aufwandszahlen beider Varianten finden sich in Bild 10-2 und Bild 10-3.

Der Einfluss der inneren Wärmegewinne auf die Aufwandszahl_ziel ist bei TRNSYS nicht signifikant, bei IDA-ICE stellt sich dieser analog zu den Ergebnissen in Bild 10-4 dar: Mit hohem Nutzkältebedarf (2_ref_last_hoch) ist auch die Aufwandszahl_ziel geringer, bei geringem Bedarf (1_ref_last_tief) steigt diese. Bild 10-5 zeigt die Zusammenhänge.

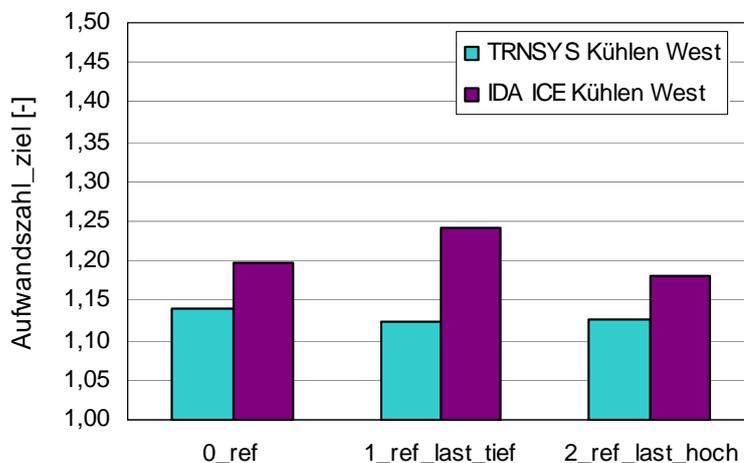


Bild 10-5: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel von den inneren Wärmegewinnen.

10.4 Regelung

10.4.1 Vorlauftemperaturregelung

Ausgehend von einem unregelmäßigem TABS mit jeweils konstanter Vorlauftemperatur im Sommer bzw. Winterfall lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Simulationsergebnisse feststellen, dass die Einführung einer außertemperaturgeführten Vorlauftemperatur Einfluss auf die energetische Effizienz der Wärme- / Kälteübergabe hat. Die Regelung der Vorlauftemperatur verbessert die Energieeffizienz des Übergabeverhaltens unter den gegebenen Randbedingungen.

Heizen

Im Heizfall steigt die Aufwandszahl mit konstanter Vorlauftemperatur sowohl bei TRNSYS als auch bei IDA-ICE um 4% bezogen auf die Variante mit zentraler Vorlauftemperaturregelung. Bild 10-6 zeigt den Zusammenhang.

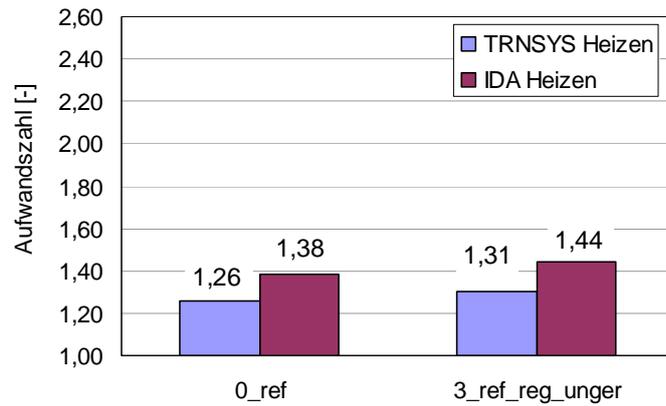


Bild 10-6: Abhängigkeit der Aufwandszahl von der Regelung, 0_ref: außentemperaturabhängige Vorlauftemperatur, 3_ref_reg_unger: konstante VL-Temperatur, Heizfall, Büro Ost und West gemittelt.

Kühlen

Auch im Kühlfall bestätigt sich der Zusammenhang zwischen Regelung und Aufwandszahl. Allerdings gibt es unterschiedliche Verhältnisse bei TRNSYS und IDA-ICE. Die Aufwandszahl bei TRNSYS steigt um 1%, bei IDA um 9%, jeweils im Ost- und Westbüro gemittelt (Bild 10-7). Dieser Zusammenhang gilt sowohl für die **Grenzwert-** als auch die **Zielwertbetrachtung**.

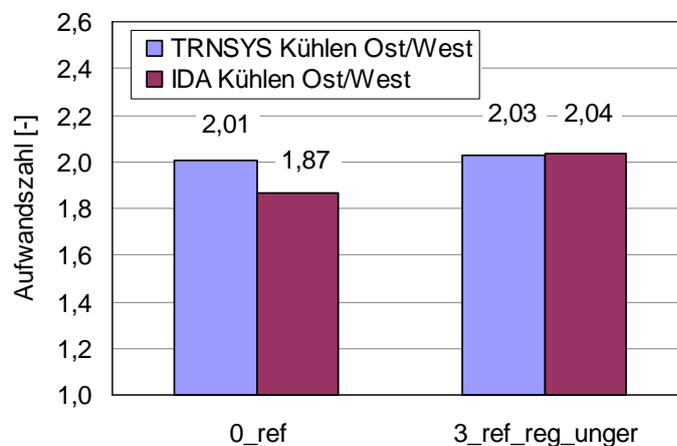


Bild 10-7: Abhängigkeit der Aufwandszahl von der Regelung, Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt bei der Grenzwertbetrachtung.

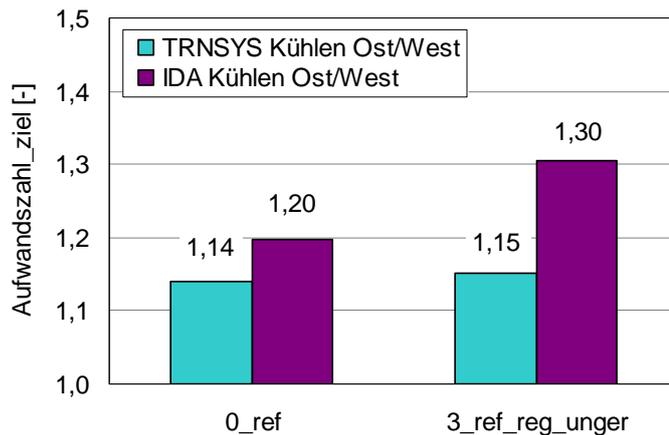


Bild 10-8: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel von der Regelung, Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt bei der Zielwertbetrachtung.

10.4.2 Höhe der Vorlauftemperatur

Im Rahmen der Variante 3_ref_reg_unger mit konstanter Vorlauftemperatur wurden drei unterschiedliche Vorlauftemperaturniveaus untersucht: Im Ausgangsfall beträgt die Vorlauftemperatur 28 °C im Heizfall und 18 °C im Kühlfall. Zusätzlich wurden gleichzeitig die potentielle Heiz-, bzw. Kühlleistung durch Anheben, bzw. Senken der Vorlauftemperatur erhöht bzw. verringert. Die Vorlauftemperatur beträgt dann statt 28/18 °C im Ausgangsfall: 29/17 °C bzw. 27/19 °C.

Heizen

Bild 10-9 zeigt die Auswirkungen auf die Aufwandszahl im Heizfall. Die Verluste der Wärmeübergabe steigen mit sinkender Vorlauftemperatur.

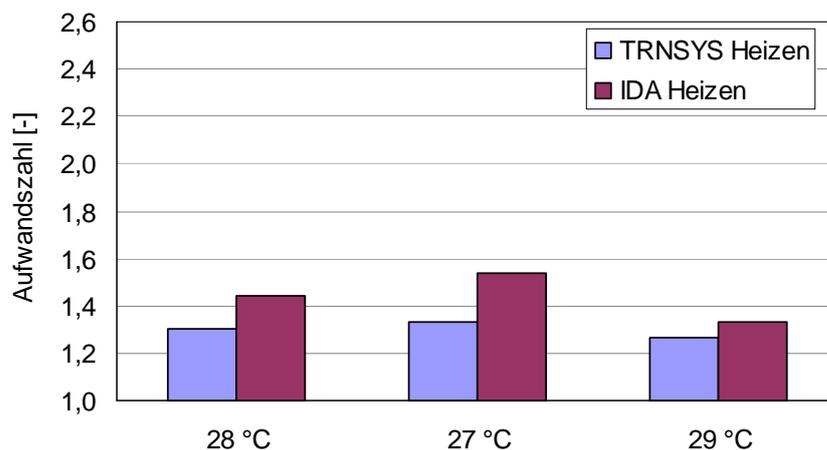


Bild 10-9: Abhängigkeit von der Höhe der Vorlauftemperatur (28 °C, 27 °C, 29 °C), Heizfall, Büro Ost und West gemittelt für 3_ref_reg_unger.

Kühlen

Die Auswirkung einer veränderten Vorlauftemperatur im Kühlfall wurde nur mit IDA-ICE untersucht. Wie aus Bild 10-10 ersichtlich wird, bestätigt sich das Er-

gebnis aus dem Heizfall: Mit geringerer Temperatur sinkt der Aufwand für die Übergabe, mit höherer Temperatur steigt der Aufwand.

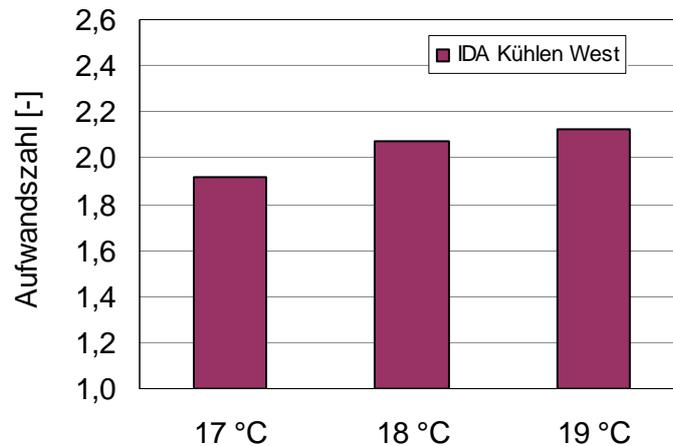


Bild 10-10: Abhängigkeit von der Höhe der Vorlauftemperatur (18°C, 19°C, 17°C), Kühlfall, Büro West gemittelt. Mit TRSNYS wurde diese Variation nicht durchgeführt.

Der qualitative Zusammenhang zeigt sich ebenfalls bei der Aufwandszahl_{ziel}, quantitativ bewegen sich die Werte zwischen 1,40 und 1,25.

10.5 Bauweise

Es wurden schwere und leichte Bauweisen des Referenzgebäudes untersucht, wobei die Geschosdecken mit Bauteilaktivierung in jedem Fall gleiche bauphysikalische Eigenschaften haben und lediglich Außen- und Zwischenwände variiert worden sind. Es wird sowohl im Heiz- wie auch im Kühlfall deutlich, dass mit geringerem Speichervermögen und bei leichter Bauweise größere Aufwandszahlen nachzuweisen sind. Bild 10-11 zeigt beispielhaft die entsprechenden Aufwandszahlen für das Westbüro im Kühlfall nach Grenzwertbetrachtung. Für die Zielwertbetrachtung gilt qualitativ dieser Zusammenhang auch.

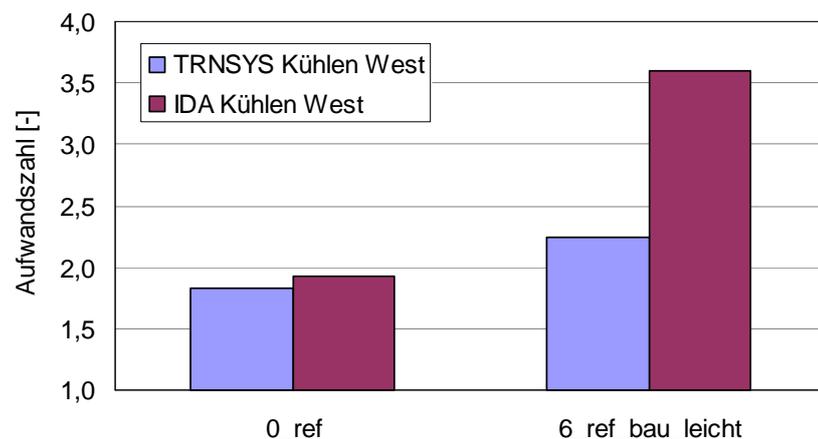


Bild 10-11: Abhängigkeit der Aufwandszahl von der Bauweise im Kühlfall, Büro West.

Der sehr hohe Wert von IDA-ICE lässt sich durch die im Vergleich zu TRNSYS ohnehin schon größere Amplitude im Temperaturverlauf erklären. Im Raummodell mit noch geringerer Speichermasse (6_ref_bau_leicht) verstärkt sich dieses Verhalten (siehe auch Bild 8-6).

10.6 Wärmeschutz

Es wurden drei unterschiedliche Wärmeschutzniveaus untersucht. Die Variante 7 weist den geringsten und die Variante 8 den höchsten Wärmedämmstandard auf. Die Referenzvariante 0 liegt mit einem nach derzeitiger EnEV gültigen Wärmeschutz dazwischen. Die Kennwerte der Konstruktionen finden sich in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 auf Seite 61 ff..

Heizen

Für das Heizen sind geringfügig höhere Aufwandszahlen nachweisbar, wenn der Wärmebedarf sinkt. Dies deckt sich mit den bereits im Abschnitt 10.1 und Abschnitt 10.3 beschriebenen Zusammenhängen.

Kühlen

Die untersuchte Passivhausvariante ist gekennzeichnet durch deutlich kleinere Aufwandszahlen im Kühlfall. Bild 10-12 enthält eine Übersicht der berechneten Aufwandszahlen für das Westbüro. Der Einfluss des Nutzkältebedarf auf die Höhe des berechneten Aufwands für die Wärmeübergabe ist auch hier dominant. Aus dem hohen Wärmeschutz der Passivhauskonstruktion resultiert ein knapp 50% höherer Nutzkältebedarf, dieser wiederum führt, wie bereits beschrieben, zu sinkenden Aufwandszahlen.

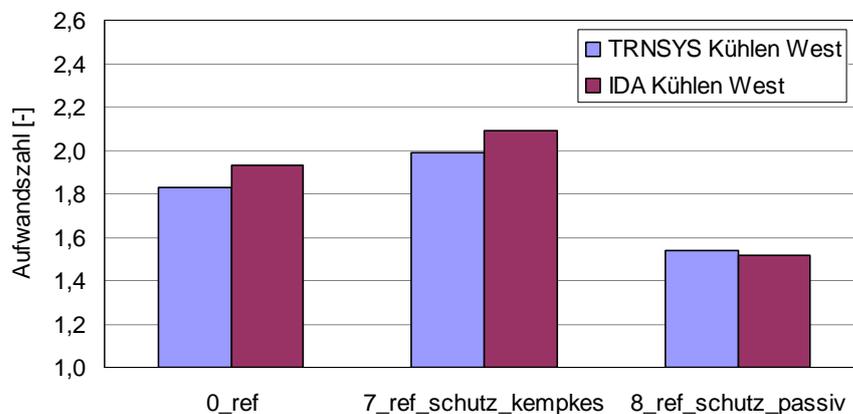


Bild 10-12: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro West, bei unterschiedlichen Wärmeschutzniveaus.

10.7 Lüftung

Bezüglich der Zulufttemperatur wurden drei unterschiedliche Varianten untersucht. Im Referenzfall wird eine Wärmerückgewinnung eingesetzt (siehe Nutzungsrandbedingungen in Tabelle 7-4 auf Seite 62), zusätzlich wird die Lüftung

einmal mit Außenlufttemperatur und einmal mit konstanter Zulufttemperatur (Winter: 18 °C/Sommer: 15 °C) untersucht. In einer weiteren Berechnung setzt die Lüftung statt um 5:00 Uhr erst mit der Nutzungszeit um 7:00 Uhr ein.

Im Heizfall sind die Auswirkungen auf die Aufwandszahlen nicht signifikant. Bei der Lüftung mit Außenlufttemperatur ist das TABS nicht in der Lage, die geforderte Temperatur einzuhalten, so dass kein vergleichbares Ergebnis erzielt werden kann.

Im Kühlfall liegen bei der Grenzwertbetrachtung alle Aufwandszahlen unter denen des Referenzfalls und im Mittel untereinander auf ähnlichem Niveau. Das Bild 10-15 zeigt die Zusammenhänge. Im Vergleich zum Referenzfall steigt der Nutzkältebedarf sowohl in der Berechnung mit Außenlufttemperatur (Variante 9) als auch bei späterem Einsatz der Lüftung (Variante 7). Darauf können die geringeren Aufwandszahlen zurückgeführt werden.

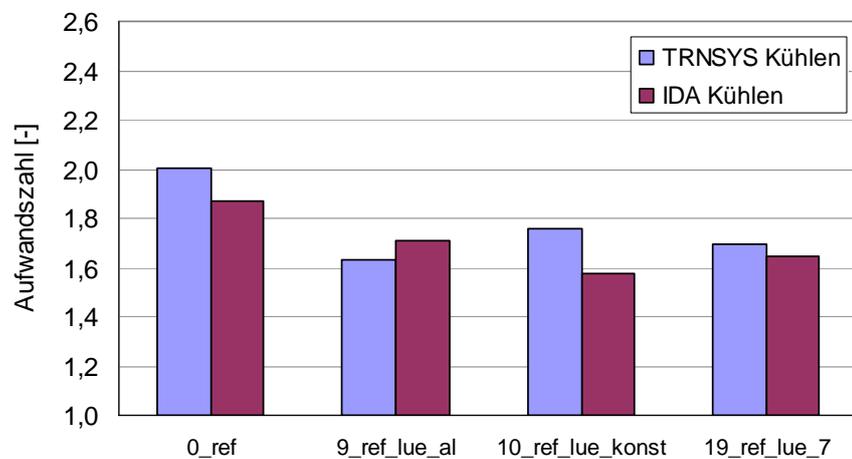


Bild 10-13: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien (Grenzwertbetrachtung).

Wird die Zuluft auf 15 °C vorkonditioniert, verringert sich der Aufwand für die Kälteübergabe ebenfalls obwohl der Nutzkältebedarf sinkt. Die Lüftung übernimmt anteilig eine Kühlfunktion, so dass das TABS als Grundlastsystem angesehen werden kann. Mit sinkendem Deckungsanteil sinkt die Aufwandszahl wie in Kapitel 10.12 dokumentiert ist. In diesem Fall dominiert der Einfluss des geringeren Deckungsanteils den Einfluss des Bedarfs.

Bei der Zielwertbetrachtung ist die Aufwandszahl für die Variante 10_ref_lue_konst deutlich kleiner. Bild 10-14 zeigt die Aufwandszahl_ziel für die Varianten mit unterschiedlicher Zulufttemperatur.

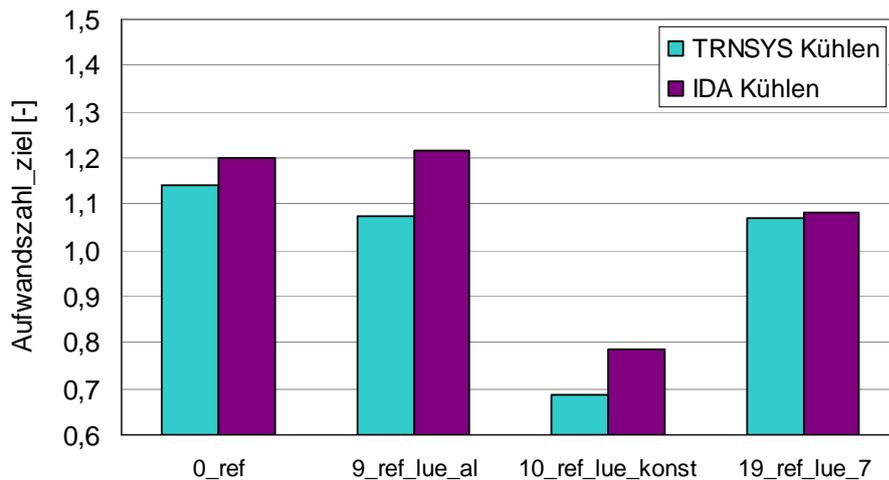


Bild 10-14: Aufwandszahl_ziel im Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien.

10.8 Sonnenschutz

Im Referenzfall wird eine automatische Sonnenschutzsteuerung modelliert. Zudem wurde eine manuelle Regelung unterstellt. Im Kapitel 9.1.6 auf Seite 75 sind die Kriterien dokumentiert. In Folge der höheren solaren Einträge bei manueller Regelung sinkt der Nutzwärmebedarf und steigt der Nutzkältebedarf. Die resultierenden Aufwandszahlen folgen dem bereits beschriebenen Zusammenhang und sind im Heizfall höher und im Kühlfall geringer als die der Referenzvariante.

10.9 Komfort

Es wird untersucht, wie sich unterschiedliche Komfortanforderungen im Kühlfall auf die Aufwandszahl auswirken. Ausgehend von dem Referenzfall mit dem oberen Grenzwert der Kategorie II (26,0 °C) als Anforderung wird dieser entsprechend DIN EN 15251 variiert. Die Komfortkategorie I gibt 25,5 °C und die Kategorie III 27 °C als Grenzwert vor. Die Variante 15_ref_komf_ziel verfolgt den Anspruch, die Raumtemperaturen unter 24,5 °C, dem Zielwert aller Bereiche zu halten.

Grenzwertbetrachtung: Wie aus Bild 10-15 ersichtlich sind die Aufwandszahlen bei der Variante mit der geringsten Anforderung (Kategorie III, 27 °C) am höchsten und bei der Variante mit dem Zielwert von 24,5 °C am geringsten. Dieser Zusammenhang bestätigt die bereits zuvor beschriebene Abhängigkeit des zusätzlichen energetischen Übergabeaufwands vom Nutzenergiebedarf. Der Nutzkältebedarf steigt mit erhöhter Anforderung an den Komfort erheblich, dies wiederum hat sinkende Aufwandszahlen zur Folge.

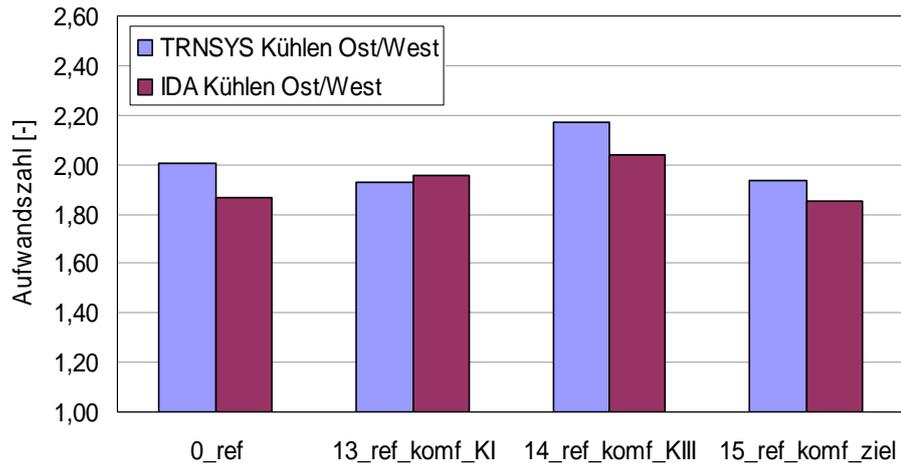


Bild 10-15: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Komfortanforderungen.

Zielwertbetrachtung: Bei der Zielwertbetrachtung kehrt sich das Verhältnis um. Wie in Bild 10-16 dargestellt erzeugt der höchste Komfortanspruch (13_ref_komf_KI) die größte und der geringste Anspruch (14_ref_komf_KIII) die kleinste Aufwandszahl_ziel. Der Nutzkältebedarf wird in allen Fällen unter Zugrundelegung von 24,5 °C ermittelt. Die Aufwandszahlen sind daher unabhängig vom Bedarf. Die Raumtemperaturen des TAB-Betriebs dürfen nun entsprechend der jeweils vorgegeben Temperaturbereiche schwanken. Bild 10-1 auf Seite 81 zeigt ein Beispiel zur Erläuterung.

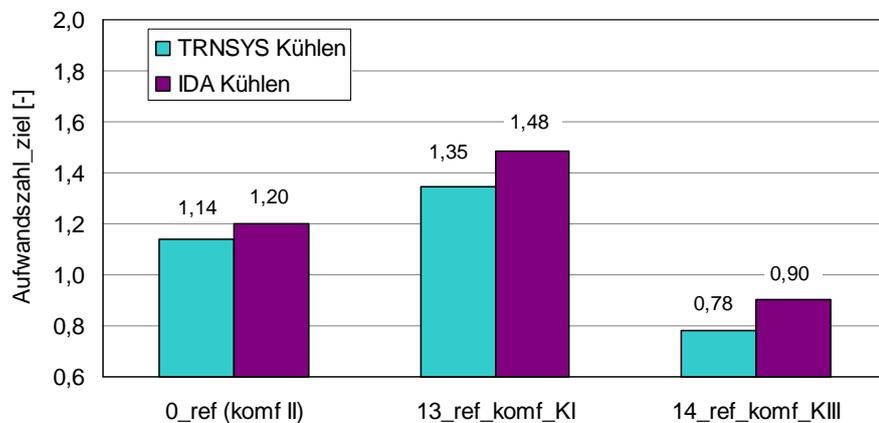


Bild 10-16: Aufwandszahl_ziel im Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Komfortanforderungen.

In der Tabelle 10-1 zeigt den gegenläufigen Trend der Aufwandszahlen je nach Betrachtungsweise. Mit sinkender Komfortanforderung, bzw. sinkendem Nutzkältebedarf steigt die Aufwandszahl im Rahmen der **Grenzwertbetrachtung**. Die **Aufwandszahl_ziel** hingegen sinkt mit sinkendem Komfortanspruch und damit sinkendem Bedarf des TABS (während der Nutzenergiebedarf gleich bleibt).

Tabelle 10-1: Tabellarische Übersicht des Nutzkältebedarfs, des Bedarfs unter Einsatz der TABS sowie die Aufwandszahl als Grenzwertbetrachtung und die Aufwandszahl_ziel, jeweils gemittelt über Ost und West sowie IDA-ICE und TRNSYS.

Anforderung	Nutzkältebedarf [kWh/a]	Aufwands- zahl [-] Grenzwert	Aufwandszahl _ziel [-] Zielwert
Zielwert (24,5 °C)	204	-	-
Komfort I (25,5 °C)	183	1,93	1,41 
Komfort II (26,0 °C)	152	1,93	1,17
Komfort III (27,5 °C)	102	2,11 	0,84

10.10 Betriebszeiten

Es wurden intermittierende und durchgehende Betriebsweise der TABS untersucht. Bei intermittierendem Betrieb wird das TABS nur nachts betrieben. Schaltkriterium ist weiterhin die aktuelle Raumlufttemperatur. Fällt diese unter, bzw. übersteigt sie einen Grenzwert geht das System in Betrieb. Im Referenzfall ist der Betrieb nur nachts (18:00 -06:00 Uhr) freigegeben in der Variante 16 durchgängig.

Heizen

Im Heizfall ändern sich die Laufzeit und damit auch die Aufwandszahlen durch die Veränderung der Betriebszeiten kaum, da die niedrigen Raumtemperaturen, die das Einschaltkriterium darstellen, ohnehin außerhalb der Nutzungszeit auftreten.

Kühlen

Im Kühlfall geht das System zumeist mittags in Betrieb, dies führt zu geringeren Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe (siehe Bild 10-17).

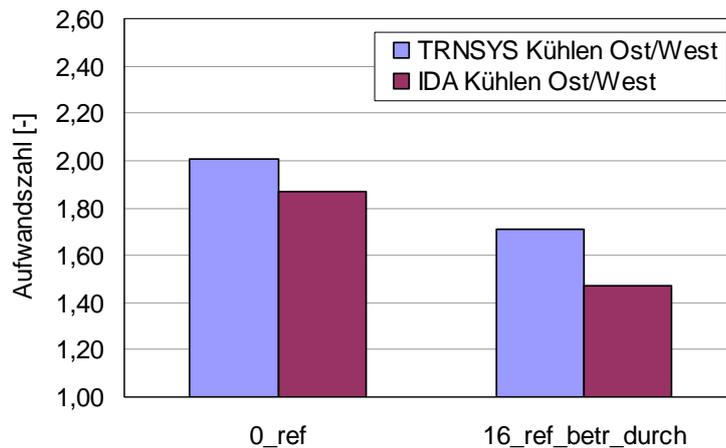


Bild 10-17: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro West, bei unterschiedlichen Betriebszeiten.

Wie aus Bild 10-18 ersichtlich, werden die hohen Temperaturen am Nachmittag mit dem früheren Betrieb abgefangen. Die gesamte Temperaturkurve liegt über der Referenzvariante.

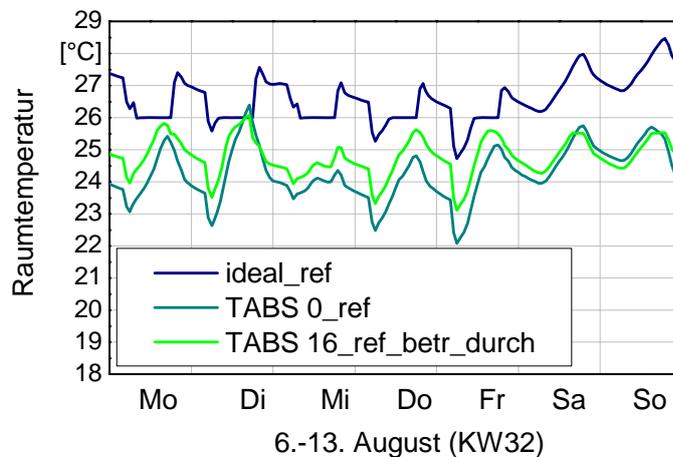


Bild 10-18: Temperaturverlauf einer Sommerwoche, Raumtemperatur im idealen Betrieb, im TABS Referenzfall (Betriebsbereitschaft nur nachts) und Variante 16 mit durchgängiger Betriebsbereitschaft.

Im Rahmen der Zielwertbetrachtung ergeben sich ebenfalls geringere Aufwandszahlen_ziel bei durchgängiger Betriebsbereitschaft. Für die Referenzvariante betragen sie 1,15 und für die Variante 16_ref_betr_durch 0,95 jeweils gemittelt über Ost und West sowie IDA-ICE und TRNSYS.

10.11 Einbautiefe

Zusätzlich zum Referenzfall mit der Heizschicht im Betonkern (siehe Bild 5-2 auf Seite 45) wurde zwei weitere Einbausituationen untersucht. Zum einen die Fußbodenheizung mit Nassverlegung im Estrich (Variante 17), zum anderen eine Kapillarrohrmatte mit einer Unterdeckung von 0,6 cm (Variante 18). Aus Sicht der Vergleichbarkeit ist aber anzumerken, dass neben der Einbautiefe auch die Betriebszeiten verändert worden sind, da diese für FBH bzw. KRM typischerweise anders festgelegt werden als bei TABS.

Heizen

Die Fußbodenheizung erreicht geringere Aufwandszahlen gegenüber den beiden Varianten in denen vorwiegend über die Decke geheizt wird (siehe Bild 10-19). Gründe für die Unterschiede können der im Heizfall günstigere konvektive Wärmeübergang vom Boden zum Raum, der Einfluss der geringeren Speichermasse und damit besseren Raumkopplung sowie die unterschiedlichen Betriebszeiten sein.

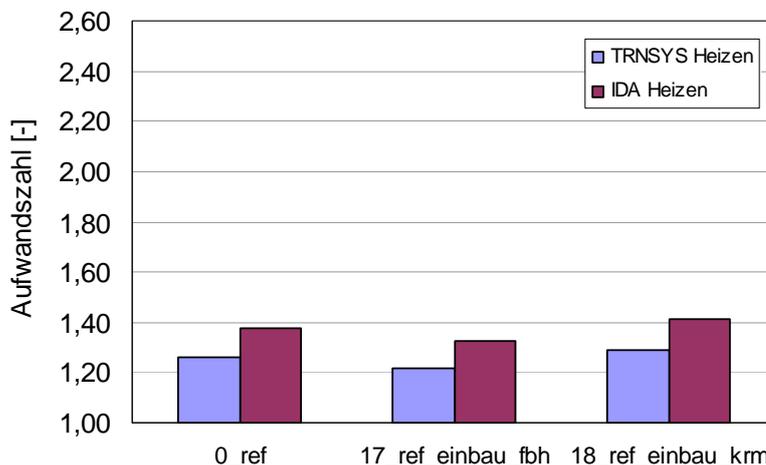


Bild 10-19: Aufwandszahl im Heizfall, Büro West, bei unterschiedlichen Einbautiefen.

Nicht plausibel sind zunächst die gegenüber dem TABS geringfügig höheren Aufwandszahlen der Kapillarrohrmatte. Um die Raumtemperatur im geforderten Bereich zu halten sind für die beiden Systeme jedoch unterschiedliche Betriebszeiten nötig. Das trägere TABS ist nachts aktiv und belädt die Betondecke als Speicher, die Kapillarrohrmatte ist je nach Raumtemperaturanforderung während der Betriebszeit der Lüftung von 5:00 bis 18:00 Uhr aktiv.

Kühlen

Einerseits zeigt sich im Kühlfall der schon beim Heizen erwartete Effekt: Die Kapillarrohrmatte kühlt den Raum im Vergleich zum TABS mit deutlich geringeren Aufwandszahlen. Das Bild 10-20 (**Grenzwertbetrachtung**) und das Bild 10-21 (**Zielwertbetrachtung**) zeigen andererseits, dass auch hier der Einbau im Fußboden die günstigsten Werte liefert. Der schlechtere konvektive Wärmeübergangskoeffizient im Kühlfall vom Boden zum Raum erklärt das Ergebnis in

diesem Fall nicht. Allerdings werden in beiden Simulationstools keine Temperaturschichtungen im Raum berechnet.

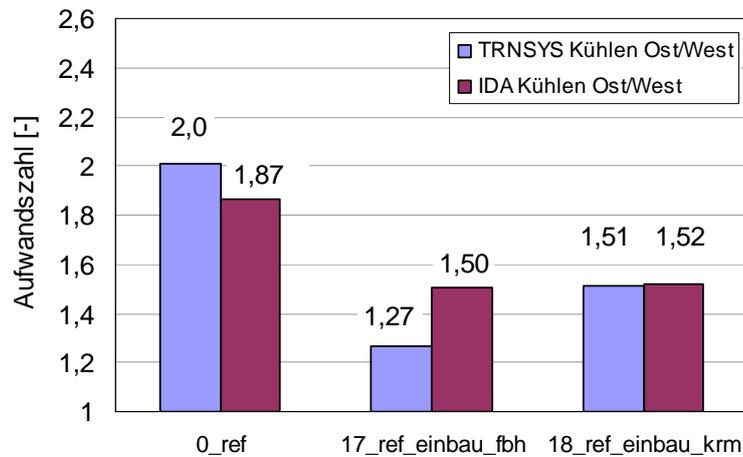


Bild 10-20: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Einbautiefen.

Um belastbare Aussagen bezüglich des deckennahen und bodennahen Systems machen zu können, sind an dieser Stelle weiterführende Untersuchungen nötig. Im Rahmen des Vorhabens stehen Systeme im Betonkern im Vordergrund.

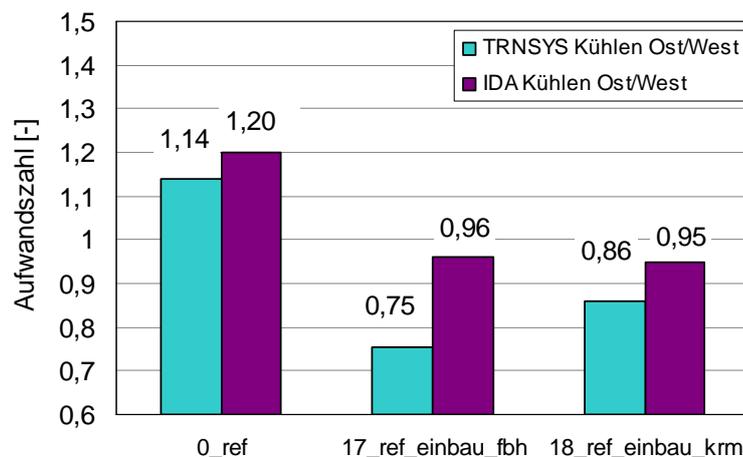


Bild 10-21: Aufwandszahl_ziel Kühlfall, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Einbautiefen.

10.12 TABS mit idealem Zusatzsystem

In der Praxis werden TABS auch als Grundlastsystem in Kombination mit schneller regelbaren Systemen (z. B. Luftheizung, Heizkörper) eingesetzt. In der Berechnung wird daher zusätzlich zum TABS ein ideales, rein konvektives Zusatzsystem modelliert. Mit unbegrenzter Leistung wird der Temperaturgrenzwert nun exakt eingehalten. Diese Untersuchungen wurden lediglich für die Grenzwertbetrachtung durchgeführt. In Abhängigkeit der konkreten Betriebsbedingungen (z. B. Betriebszeit) des TABS ergeben sich für dieses unterschiedliche energetische Deckungsraten. Als Deckungsrate wird dabei der vom TABS er-

brachte jährliche Anteil zur Deckung des raumbezogenen Nutzenergiebedarfs bezeichnet.

Im Anhang C sind die Ergebnisse tabellarisch dokumentiert. In Bild 10-22 sind sie graphisch dargestellt.

Sowohl im Heiz-, wie auch im Kühlfall sinken die Aufwandszahlen signifikant mit kleinerer Deckungsrate des TABS.

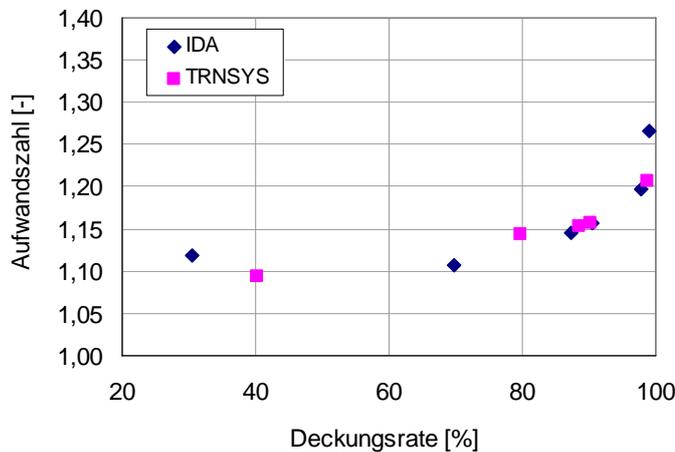


Bild 10-22: Aufwandszahl im **Heizfall**, Büro Ost und West gemittelt, bei unterschiedlichen Deckungsraten.

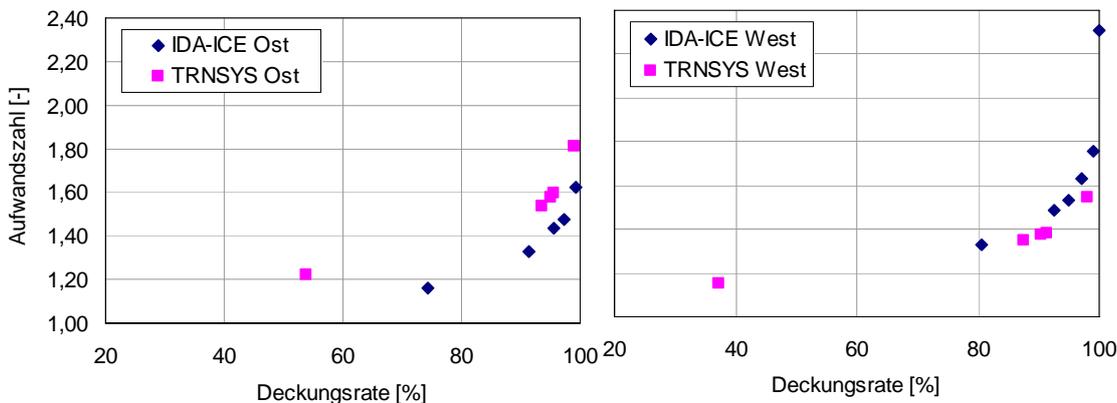


Bild 10-23: Aufwandszahl im **Kühlfall**, Büro Ost (links) und West (rechts), bei unterschiedlichen Deckungsraten.

Bei der **Zielwertbetrachtung** ist dieser Zusammenhang ebenfalls signifikant. Die Aufwandszahlen_{ziel} bewegen sich auf dem Niveau zwischen 0,4 und 1,2. Die entsprechende Graphik befindet sich im Anhang 0.

10.13 Gesamtübersicht

Im Folgenden sind die Aufwandszahlen aller Varianten in einem Diagramm dargestellt. Die Ergebnisse für das Büro Ost und West sind im Heizfall zusammengefasst, im Kühlfall separat gezeigt, da sich diese deutlich unterscheiden.

Hinsichtlich der beiden Simulationstools lässt sich folgende Aussage treffen: Im **Heizfall** liegen die mit IDA-ICE bestimmten Aufwandszahlen zum Teil deutlich über denen nach TRNSYS (siehe Bild 10-24). Ursache hierfür ist vermutlich die größere Amplitude im Raumtemperaturverlauf.

Im **Kühlfall** ist das Verhältnis abhängig von der Ausrichtung des untersuchten Raumes: Im Osten liegen die Aufwandszahlen nach IDA-ICE sehr deutlich unter denen nach TRNSYS (Bild 10-25), im Westen knapp darüber (Bild 10-26). Mittelt man auch im Kühlfall zwischen den Ergebnissen für die beiden Ausrichtungen nähern sich die Ergebnisse beider Tools einander an, die Werte von IDA-ICE liegen größtenteils unter denen von TRNSYS (Bild 10-27). Die Ursachen der Differenzen zwischen den Simulationstools insbesondere im Hinblick auf die Ausrichtung konnten trotz eines enormen zeitlich Aufwands im Rahmen von umfangreichen Voruntersuchungen und vergleichenden Validierungen nicht abschließend geklärt werden.

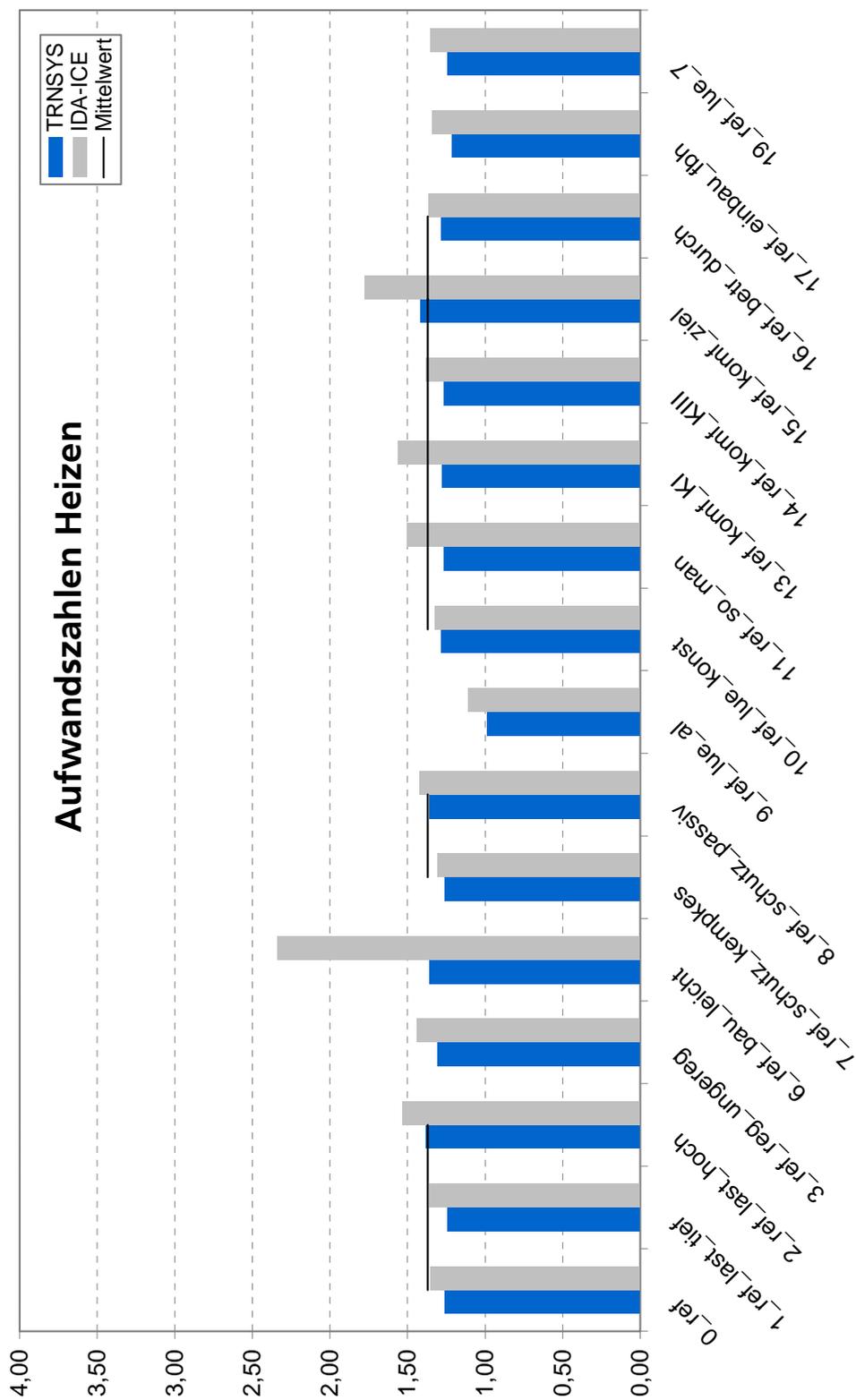


Bild 10-24: Aufwandszahlen aller Varianten für den Heizfall, Kennzeichnung des Mittelwertes von 1,37 zwischen den Varianten und zwischen den Simulationswerkzeugen (die Varianten 3, 6, 9, 17, und 19 wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Der Mittelwert stellt die Basis für den Normungsvorschlag dar, siehe Seite 107).

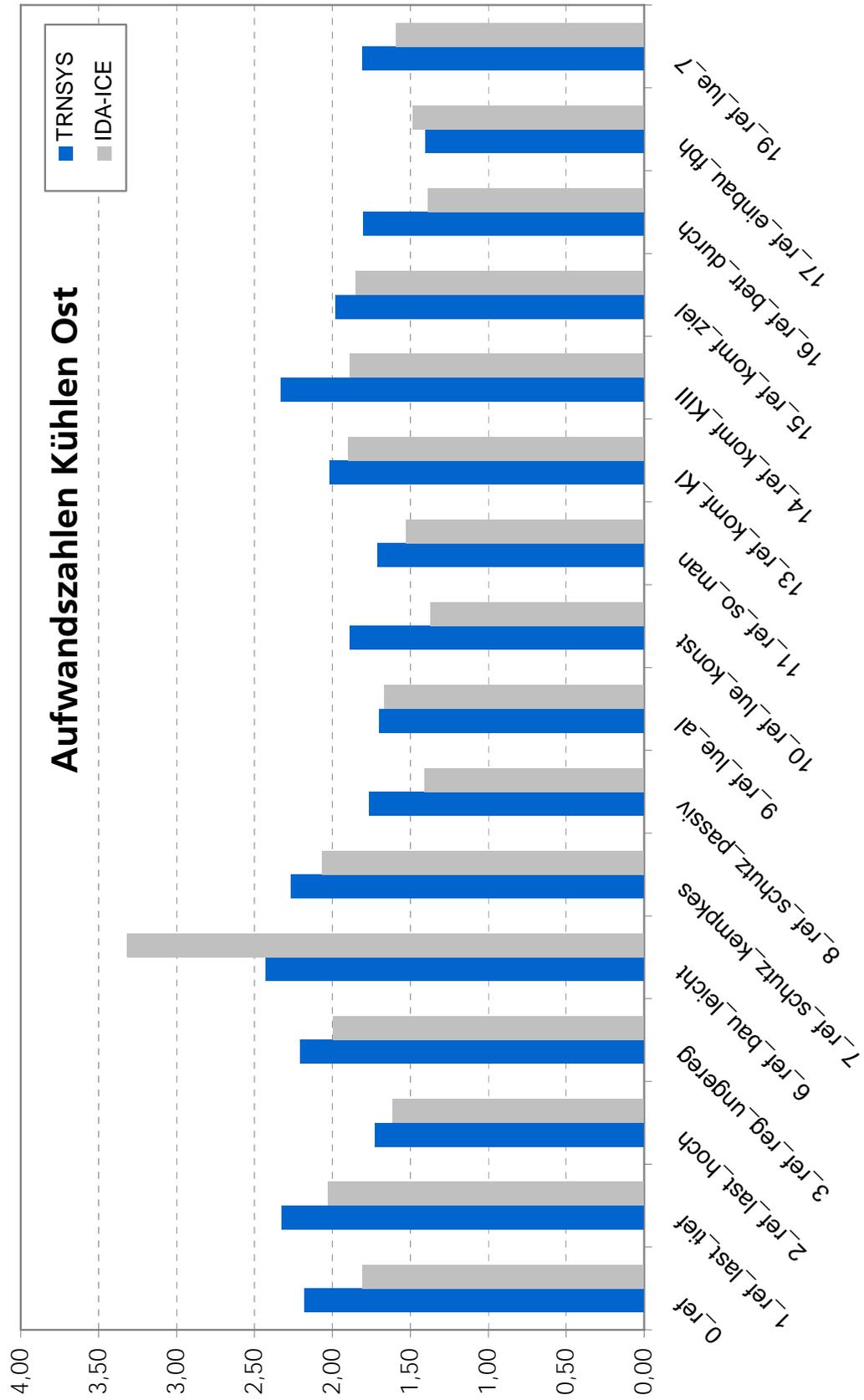


Bild 10-25: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall Büro Ost.

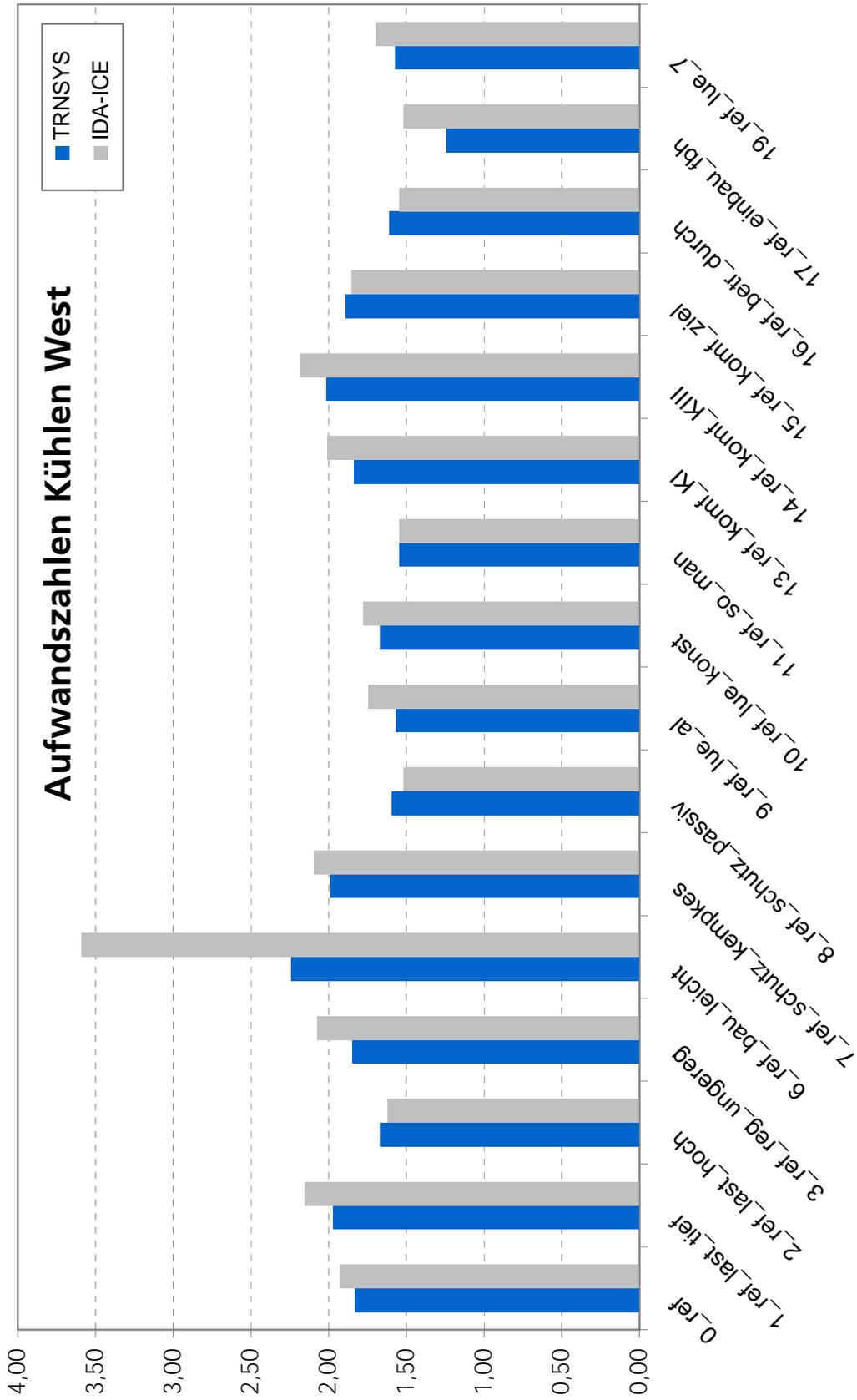


Bild 10-26: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall Büro West.

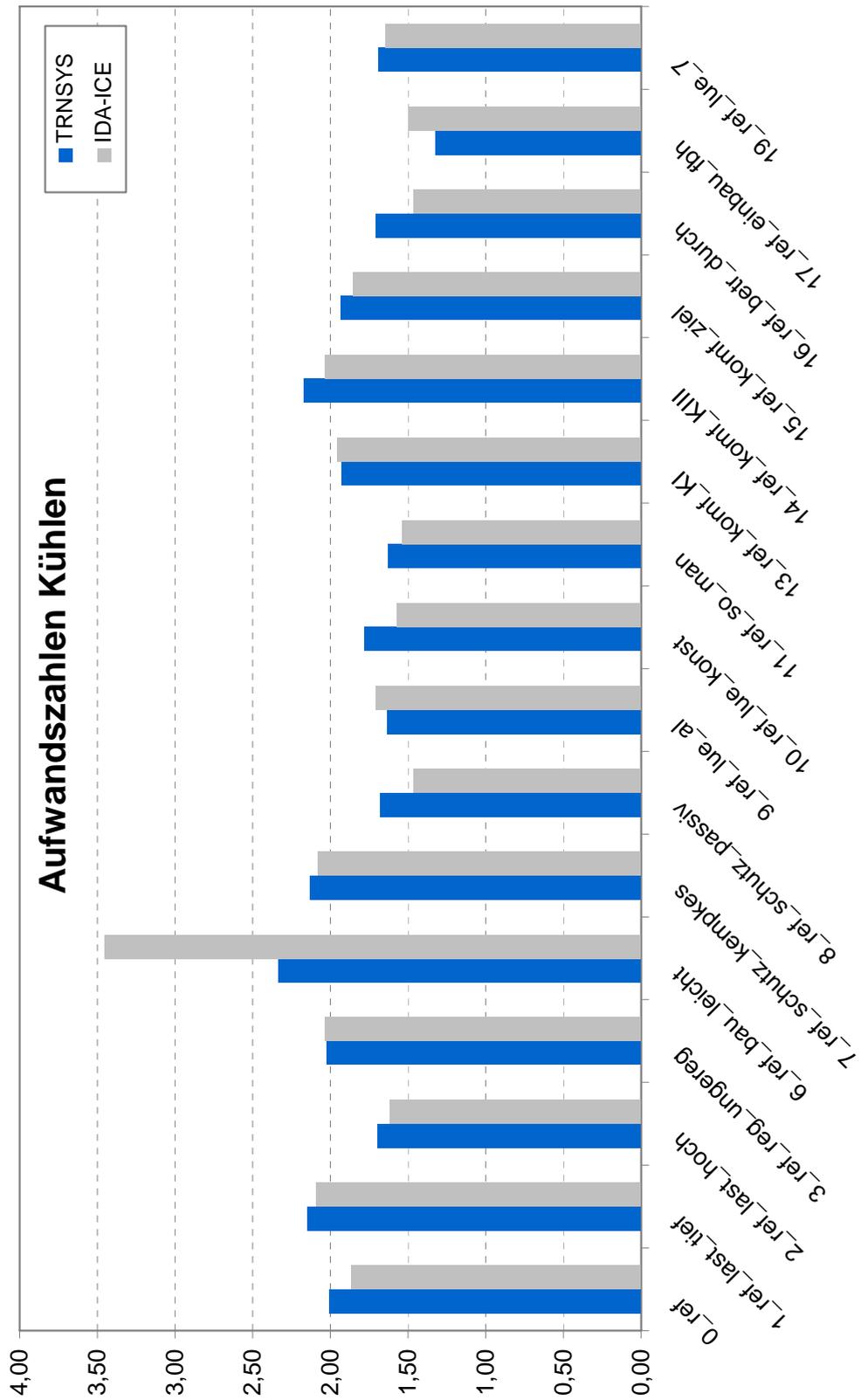


Bild 10-27: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall Büro Ost und West gemittelt.

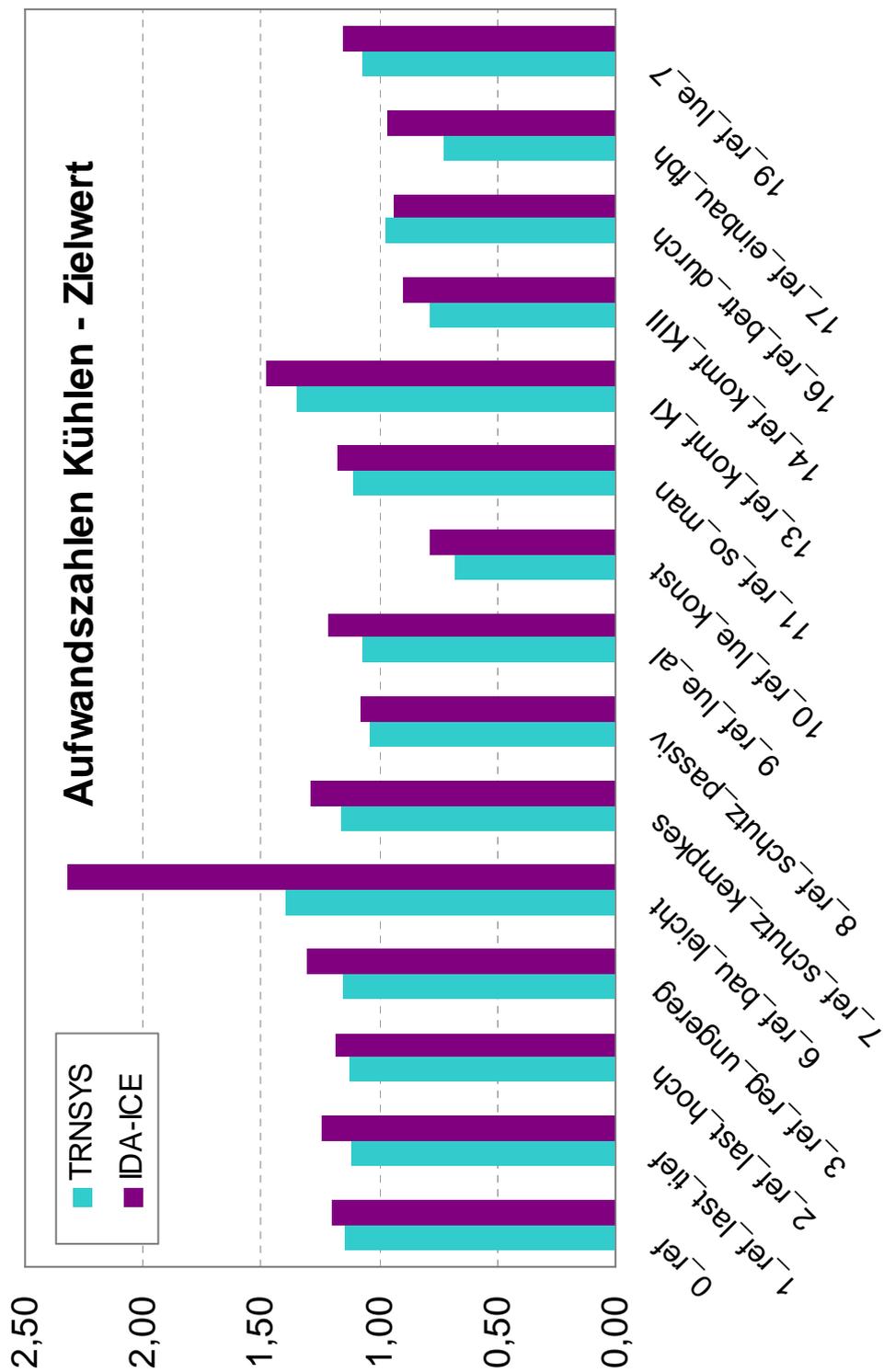


Bild 10-28: Aufwandszahlen_ziel aller Varianten für den Kühlfall Büro Ost und West gemittelt.

10.14 Zusammenfassung

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ergeben sich für die TABS vergleichsweise hohe Aufwandszahlen. Dies lässt sich mit dem im Verhältnis zu konventionellen Heiz-/Kühlkörpern bzw. oberflächennah eingebauten Flächensystem trägeren Regelverhalten begründen und erscheint daher plausibel. Das Schema der DIN V 18599 sieht eine Bewertung des eingesetzten Übergabesystems erstmals auch im Kühlfall vor. Die dazu benötigten Kenngrößen sollten idealerweise systemübergreifend konsistent und unter vergleichbaren Randbedingungen ermittelt worden sein. Dennoch führt die Übertragung der für den Heizfall etablierten und hier auf den Kühlfall übertragenen Vorgehensweise (ein festgelegter Grenzwert wird niemals überschritten) für das thermisch aktivierte Bauteilsystem zu einer eher ungünstigen energetischen Bewertung der Wärmeübergabe. Die energetischen Vorteil durch Nutzung alternativer Energiequellen werden dabei nicht berücksichtigt.

Der Zusammenhang zwischen Aufwandszahl und Nutzenergiebedarf (siehe Absatz 10.1 auf Seite 81) ist sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall dominierend. Demzufolge führen die Ergebnisauswertungen der Varianten welche sich insbesondere hinsichtlich des Nutzenergiebedarfes unterscheiden im Wesentlichen zu diesem Zusammenhang. In der aktuellen Bewertungssystematik spielt die Bedarfsabhängigkeit jedoch derzeit keine Rolle. Im Kühlfall ist dieser Einfluss nach den vorliegenden Untersuchungen deutlich größer als im Heizfall, so dass zumindest dort ein solcher Einfluss berücksichtigt werden sollte.

Heizen

Wie bereits erwähnt führen die Variationen der inneren Wärmegewinne, des Wärmeschutzes und des Sonnenschutzes insbesondere zu dem erwarteten Ergebnis, dass die Aufwandszahl mit sinkendem Nutzwärmebedarf und damit dem Belastungsgrad des Systems steigt. Um den Einfluss dieser Parameter im Einzelnen bewerten zu können müssten die Ergebnisse „bedarfsbereinigt“ werden. Prinzipiell gilt für die TABS, wie für alle anderen Systeme auch, den Bedarf durch optimierte Systemkonfigurationen (inkl. Wärmeschutz-, Lüftungs-Sonnenschutz- und Regelkonzept) zu minimieren.

Das Bestreben mittels der vorliegenden Untersuchungsergebnisse zu einfachen Bewertungsansätzen zu kommen, führt im Heizfall dazu, die im Hinblick auf das bestehende Bewertungsverfahren der DIN V 18599-5 zu ermittelnden Gesamtnutzungsgrade $\eta_{h, ce}$ zunächst lediglich hinsichtlich der Vorlauftemperaturregelung zu unterscheiden. Es wird eine Mittelwertbildung zwischen den Ergebnissen von IDA-ICE und TRNSYS, zwischen den Büroräumen Ost und West über ausgewählte Varianten vorgenommen. In der Übersicht in Bild 10-24 ist der Mittelwert von 1,37 bei den zu der Berechnung herangezogenen Varianten eingefügt. So wurden beispielsweise lediglich Varianten mit außentemperaturabhängiger Vorlauftemperaturregelung berücksichtigt.

Der Mittelwert der Aufwandszahl von 1,37 entspricht einem Nutzungsgrad von 0,73. Dieser passt von der Größenordnung gut zu dem Nutzungsgrad von 0,74, der sich bei der Einordnung in die bereits bestehende Tabelle für Flächenheizungen in der DIN V 18599 (vgl. Beispielrechnung im Absatz 3.5.3 auf Seite 36)

ergibt. Die Konsistenz der Kenngrößen ist damit gegeben. Für TABS, die mit konstanter Vorlauftemperatur betrieben werden, wurden Aufwandszahlen berechnet, die ca. 4 % größer sind. Für den Gesamtnutzungsgrad ergibt sich somit ein Wert von 0,70.

Die Tabelle auf Seite 107 zeigt die für den Normenvorschlag aufbereiteten Werte für den Gesamtnutzungsgrad $\eta_{h, ce}$.

Kühlen

Prinzipiell ist bei der Raumkühlung eine stärkere Schwankung der Aufwandszahlen in Abhängigkeit von verschiedensten Einflussgrößen festgestellt worden.

Auch im Kühlfall liegt es nahe, die Vorlauftemperaturregelung in die Bewertung einzubeziehen, da die Regelung sich bereits in vorherigen Untersuchungen (Olesen 2004 [8] und Burkhard 2003 [2]) als effizienter im Vergleich zur unregelmäßigen Betriebsweise erwiesen hat. Allerdings ist hier der Zusammenhang zwischen den Simulationstools nicht so eindeutig wie im Heizfall. Bei IDA-ICE ist der Aufwand bei konstanter Temperatur 9 %, bei TRNSYS 1 % größer. Bei grober Mittelung ergibt sich auch hier eine Verschlechterung um 4 %.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden parallel zwei Bewertungsansätze verfolgt: die **Grenz-** und die **Zielwertbetrachtung**.

Der deutlichste Zusammenhang besteht im Kühlfall bei der **Grenzwertbetrachtung** zwischen Nutzkältebedarf bzw. Belastungsgrad des Systems und dem Aufwand für die Kälteübergabe, Bild 10-29.

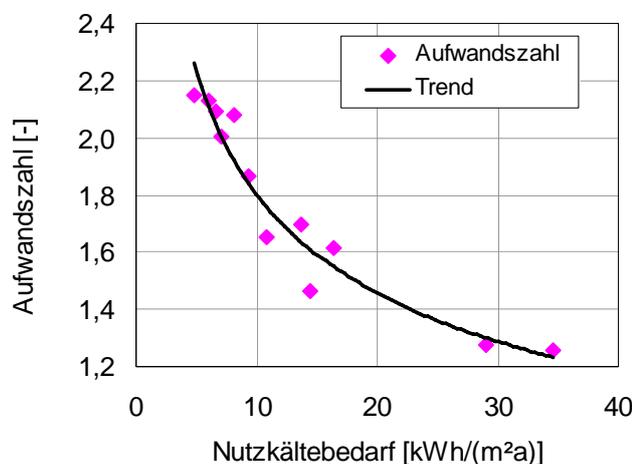


Bild 10-29: Aufwandszahlen ausgewählter Varianten für den Kühlfall Büro Ost und West gemittelt sowie IDA-ICE und TRNSYS gemittelt.

Näherungsweise könnte dieser Zusammenhang entweder durch die Unterteilung in drei Bereiche berücksichtigt werden. Die Tabelle 10-2 definiert diese. Oder die Abhängigkeit wird direkt über den funktionalen Zusammenhang, wie ebenfalls in Bild 11-1 auf Seite 108 dargestellt, in die Bewertung miteinbezogen. Die Gleichung für die Trendlinie lautet: $\eta_{c, ce}(Q_{c,b}) = 0,27 \cdot x^{0,31}$ und gilt für den hier untersuchten Definitionsbereich von 0 bis 40 kWh/(m²a).

Tabelle 10-2: Definition der Unterteilung des Nutzkältebedarfs in drei Bereiche.

Bereich	$Q_{c,b}$
tief	$\leq 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
mittel	$10 \text{ kWh/m}^2\text{a} < Q_{c,b} < 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
hoch	$Q_{c,b} \geq 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Für den Normungsvorschlag ergeben sich die in Tabelle 11-2 auf Seite 109 ausgewiesenen Nutzungsgrade, die Nutzungsgrade der Systeme mit konstanter Vorlauftemperatur sind mit 4 % schlechter ausgewiesen.

Die Ergebnisse der **Zielwertbetrachtung** führen definitionsgemäß zu geringeren Aufwandzahlen, bzw. höheren Nutzungsgraden. Der bei der Grenzwertbetrachtung maßgebliche Zusammenhang zwischen Bedarf und Aufwand ist hier nicht signifikant.

Hinsichtlich der untersuchten Varianten ergeben sich ähnliche qualitative Zusammenhänge zwischen Ziel- und Grenzwertbetrachtung bei der Regelung, inneren Last, Höhe der Vorlauftemperatur, Bausweise, Lüftung, Betriebszeiten und der Einbautiefe (siehe Darstellungen im Kapitel 10). Es könnten demnach auch hier, über die unterschiedliche Vorlauftemperaturregelung hinaus, differenzierte Einflüsse auf die Aufwandzahlen ausgearbeitet werden. Anliegen sollte allerdings sein, zunächst generell über die Vorgehensweise zu entscheiden. Hierzu ist eine Abstimmung im größeren Kreis nötig.

Es ist denkbar ein Vorgehen auszuarbeiten, welches die Aufwandzahlen, bzw. Nutzungsgrade abhängig vom Komfortanspruch ausweist. Werden die Aufwandzahlen_ziel über die Varianten 0, 1, 2, 7, 8, 11, 16, 19 über Ost und West sowie IDA-ICE und TRNSYS gemittelt ergibt sich ein Wert von 1,12. Dieser bezieht sich auf die Komfortanforderung nach Kategorie II. Bild 10-16 auf Seite 91 stellt ausgehend von der Referenzvariante die Auswirkungen aufgrund der Komfortanforderungen dar. Der Aufwand steigt von Kategorie II zu I um 21 % und sinkt zu Kategorie III um 28 %. Werden diese Verhältnisse auf den Mittelwert von 1,12 übertragen ergeben sich die in Tabelle 11-3 dargestellten Größen.

Der sich ergebende rechnerische Gesamtnutzungsgrad $\eta_{c, ce}$ von 1,23 bei der Komfortanforderung nach Kategorie III führt in der Anwendung dazu, dass der berechnete Nutzkältebedarf $Q_{c,b}$ durch negative Übergabeverluste sinkt (siehe normatives Vorgehen auf Seite 37). Per Definition ist ein Nutzungsgrad kleiner/gleich eins. Bei einem $\eta=1$ ist kein zusätzlicher Aufwand für Wärmeübergabe erforderlich.

Ab einem Nutzungsgrad von 2 wäre rechnerisch kein Nutzkältebedarf mehr vorhanden. Wird dieses Vorgehen auf andere Kälteübergabesysteme übertragen und dies sollte selbstverständlich im Rahmen der Normensystematik geschehen, kann dieser Fall eintreten. Theoretisch liegt der maximal erreichbare Gesamtnutzungsgrad $\eta_{c, ce}$ auf Grundlage der hier durchgeführten Rechnun-

gen für ein ideales Kühlsystem bewertet nach dem Komfortanspruch der Kategorie III genau bei 2 (siehe Tabelle 10-1, Nutzkältebedarf aus der letzten Zeile 102 kWh/a bezogen auf den Bedarf unter Einhaltung des Grenzwertes von 24,5 °C von 204 kWh/a).

11 Empfehlungen für die Normung

11.1 Wärme- und Kälteübergabe im Raum

Im Hinblick auf eine Übernahme der vorab ausführlich beschriebenen Ergebnisse in das normative Verfahren zur energetischen Bewertung von Gebäuden (DIN V 18599) ist zu beachten, dass einerseits eine sachgerechte Bewertung der Systeme gewahrt bleibt, die alle wesentlichen Einflussgrößen in die Bewertung einbezieht, andererseits aber eine einfache und übersichtliche, mit ingenieurmäßigem Sachverstand zu absolvierende Handhabung des Verfahrens möglich ist. Nach Abwägung der beiden Argumentationslinien wird ein relativ einfaches Bewertungsverfahren empfohlen.

Heizen

Für den Heizfall werden zunächst nur zwei Unterscheidungskriterien hinsichtlich der Vorlauftemperaturregelung für die Bewertung von Systemen der thermischen Bauteilaktivierung vorgeschlagen. Diese Aufwandszahlen wurden durch Mittelwertbildung aus den Simulationsergebnissen beider Simulationsprogramme (TRNSYS und IDA-ICE) ermittelt. Sie berücksichtigen beide Büroräume (Ost und West) beschränken sich jedoch auf ausgewählte Simulationsvarianten.

Folgende Ergänzung des Abschnitts 6.1.2 für DIN V 18599 wird, nach bereits erfolgter Vorstellung im Normenausschuss, in den Teil 100 der DIN V 18599 aufgenommen:

In Tabelle 11-1 werden die Gesamtnutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (TABS) (Raumhöhen ≤ 4 m) angegeben.

Tabelle 11-1: Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (TABS); Raumhöhen ≤ 4 m.

Einflussgrößen		$\eta_{h,ce}$
Regelung	konstante Vorlauftemperatur	0,70
	zentral geregelte Vorlauftemperatur	0,73

Wird das TABS lediglich als Grundlastsystem eingesetzt, so sind TABS und Zusatzsystem (z. B. Heizkörper, Luftheizung, o.ä.) jeweils entsprechend ihrer energetischen Deckungsanteile zu bewerten.

Bei zukünftigen Fortschreibungen der Norm ist eine weitere Differenzierung der energetischen Bewertung der Wärmeübergabe anzustreben. Dabei sollte auch geprüft werden, ob die gegenwärtige Darstellung der Verluste in Form belastungsunabhängiger Nutzungsgrade beibehalten werden sollte. Der in anfänglichen Untersuchungen zur Wärmeübergabe (siehe auch Bauer [3]) ermit-

telte Zusammenhang zwischen Belastung und Aufwandszahl konnten auch im Rahmen der hier durchgeführten Studien bestätigt werden. Da aber weder in den bereits vorhandenen Bewertungsverfahren der DIN V 18599 noch innerhalb der europäischen Normen derartige Ansätze zu finden sind, wurde auf eine Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten im Heizfall zunächst verzichtet.

Kühlen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zwei prinzipiell unterschiedliche Vorgehensweisen (**Grenz- und Zielwertbetrachtung**, Definition siehe Seite 81 ff.) untersucht. Bevor konkrete Zahlenwerte in die normative Bewertung einfließen können, sollte eine Abstimmung zwischen allen Normungsteilen stattfinden.

Die nachfolgend dargestellten Gesamtnutzungsgrade resultieren aus der Sichtweise und den vorliegenden Untersuchungen der TABS und unterscheiden sich hinsichtlich der beiden parallel untersuchten Vorgehensweisen.

Grenzwertbetrachtung

Den größten Einfluss auf die Aufwandszahlen, bzw. die Nutzungsgrade im Kühlfall hat der vorhandene Nutzkältebedarf. Mit steigendem Bedarf wächst der Nutzungsgrad (Bild 11-1). Dieser Zusammenhang kann stetig über die ausgewiesene Funktion $\eta_{c, ce}(Q_{c,b})$ berücksichtigt werden oder über, für drei Bereiche (tief, mittel, hoch) repräsentative Werte.

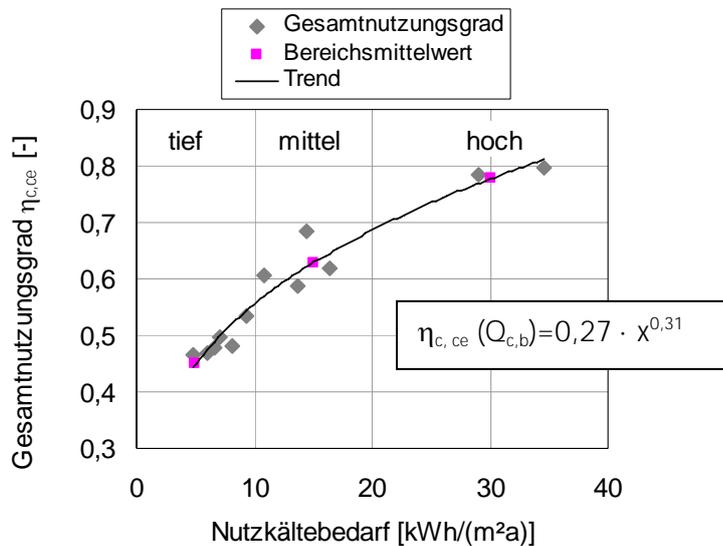


Bild 11-1: Gesamtnutzungsgrad ausgewählter Varianten für den Kühlfall Büro Ost und West gemittelt sowie IDA-ICE und TRNSYS gemittelt, die daraus resultierende Trendlinie und die Mittelwerte der Bereiche tief, mittel, hoch des Nutzkältebedarfs.

Weiterhin wird der sich aus den Untersuchungen ergebende Mehraufwand bei konstanter Vorlauftemperatur gegenüber zentral geregelter Vorlauftemperatur wie im Heizfall mit 4 % berücksichtigt. Bei unstetiger Abhängigkeit ergeben sich somit sechs unterschiedliche Gesamtnutzungsgrade $\eta_{c, ce}$ wie in Tabelle 11-2 dargestellt.

Tabelle 11-2: Gesamtnutzungsgrad $\eta_{c, ce}$ für die Kälteübergabe bei thermisch aktivierten Bauteilen (TABS) nach Einteilung in drei Bereich für den Nutzkältebedarf.

Einflussgrößen		Belastung		
		tief	mittel	hoch
Regelung	konstante Vorlauftemperatur	0,46	0,65	0,81
	zentral geregelte Vorlauftemperatur	0,44	0,63	0,77

Zielwertbetrachtung

Die Abhängigkeit des Nutzungsgrades vom Bedarf ist bei diesem Vorgehen nicht ausgeprägt.

Es ist denkbar eine neue Bewertungsstrategie in Abhängigkeit vom Komfortanspruch einzuführen. In den vorliegenden Untersuchungen hat sich diesbezüglich ein deutlicher Einfluss herausgestellt. Die folgende Tabelle 11-3 fasst die zu den jeweiligen Komfortkategorien gehörenden $\eta_{c, ce}$ zusammen. Bei dem geringsten Komfortanspruch wird ein Nutzungsgrad größer 1 ausgewiesen. Dies ist der Wahl des Referenzsystems geschuldet und würde innerhalb der Normensystematik zu einem negativen Übergabeverlust $Q_{c, ce}$ und damit zu einer Reduktion des Nutzkältebedarfs führen.

Tabelle 11-3: Aufwandszahlen, bzw. Nutzungsgrade des jeweiligen Komfortanspruchs. Der Wert der Kategorie II ist ein Mittelwert ausgewählter Berechnungsergebnisse.

Komfortkategorie	I	II	III
Aufwandszahl	1,36	1,12	0,81
Gesamtnutzungsgrad $\eta_{c, ce}$	0,74	0,89	1,23

Die in der Praxis oft anzutreffende Kombination eines TABS mit einem schneller regelbaren Zusatzsystem wird zu einer Verringerung der Aufwandszahlen führen, da Störgrößen besser ausgeglichen werden können. Dies sollte in der Norm in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Der Einfluss ist in Bild 10-23 auf Seite 96 dargestellt.

11.2 Verteilung

Für die energetische Bewertung der thermischen Verluste des hydraulischen Verteilnetzes sowie des Hilfsenergiebedarfs können die in der DIN V 18599 vorhandenen Bewertungsansätze grundsätzlich verwendet werden. Dazu ist der Druckverlust der bauteilintegrierten Rohrleitungen ähnlich wie bei der Fußbodenheizung gesondert zu berücksichtigen. Ein entsprechender Hinweis ist an den betreffenden Stellen des Normenwerkes zu ergänzen.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Vorhabens ist die energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile (TABS). Es sollen vereinfachte Ansätze für die Bewertung von bauteilintegrierten Heiz- und Kühlsystemen im Rahmen der Normenreihe DIN V 18599 erarbeitet werden. Der Untersuchungsschwerpunkt liegt dabei auf der Ermittlung und Bewertung der energetischen Aufwendungen bei der Wärme- bzw. Kälteübergabe im Raum.

Die vorliegenden Untersuchungen werden gleichzeitig mit zwei verschiedenen thermisch/energetischen Simulationstools (IDA-ICE und TRNSYS) durchgeführt. Im Vorfeld der eigentlichen Untersuchungen wurden mittels vorhandener Messdaten für ein Beispielgebäude mit TABS umfangreiche Untersuchungen zur Validierung der verwendeten Raum- bzw. TABS-Modelle durchgeführt. Die Messwerte können mit Hilfe beider Tools in gewissen Grenzen nachempfunden werden. Auftretende Abweichungen und deren mögliche Erklärung sind in Kapitel 5 dokumentiert. Für eine exakte Validierung der Modelle sind die Messwerte jedoch nicht ausreichend, wogegen sich qualitative Effekte aber hinreichend genau abbilden lassen. Zudem haben die verwendeten Modelle zusätzlich ein externes, auch in diesem Bericht dokumentiertes, Validationsverfahren durchlaufen und werden daher als geeignet angesehen, die vorliegenden Untersuchungen durchzuführen. Auf die dennoch vorhandenen Unterschiede zwischen den beiden Simulationstools und deren mögliche Ursachen wurde in Kapitel 8.1.3 detailliert eingegangen.

Werden die Übergabeverluste nach dem üblichen Verfahren ermittelt (der Bedarf unter Einsatz der TABS bezogen auf den Bedarf eines idealen Systems bei gleichem Nutzen, siehe Kapitel 3.3.), spielt die Anforderung an die aus Komfortgründen einzuhaltende Raumtemperatur eine entscheidende Rolle. Die untere Temperaturgrenze wird, resultierend aus der vorgegebenen Raum-Solltemperatur für Nichtwohngebäude nach DIN V 18599, auf 21°C festgelegt. Die im Kühlfall einzuhaltende Temperatur wird auf 26°C limitiert. Diese entspricht der oberen Grenze des Temperaturbereichs II nach DIN EN 15251 (siehe Kapitel 3.4). Das ideale System hält diese Vorgaben ohne energetische Verluste ein. Die Trägheit des TABS und die daraus resultierenden schwankenden Raumtemperaturen (siehe Bild 3-2 auf Seite 30) führen zu einem energetischen Mehrbedarf, wenn die vorgegebenen Temperaturgrenzen nicht überschritten werden sollen. In den Simulationen wird dieser Betriebszustand erreicht, indem die Temperaturen, ab denen im Modell geheizt bzw. gekühlt wird (Schalttemperaturen) solange iterativ angepasst werden, bis die Raumtemperaturen im gewünschten Bereich liegen. Während dieses aufwändigen Prozesses hat sich gezeigt, dass auch schon geringfügige Änderungen der Einschaltbedingung einen deutlichen Einfluss auf die errechneten Aufwandszahlen haben können.

Ausgehend von einem Referenzfall werden zahlreiche Varianten untersucht, um den Einfluss von Regelung, Wärmeschutzniveau, Lüftung, Bauweise, interner Gewinne und Komfortanforderungen auf das Betriebsverhalten der TABS bewerten zu können. Um die Ergebnisse der verschiedenen Varianten vergleichbar zu gestalten, dürfen auch hier nur Anpassungen an den Schalttemperaturen vorgenommen werden.

Prinzipiell bedarf jede Variante einer Anpassung mehrerer Parameter, um einen auf das Gesamtsystem abgestimmten Betrieb zu gewährleisten. Es können einige Aussagen über den Einfluss der Variantenbildung gemacht werden (siehe Kapitel 10). Allerdings sollten diese zunächst nicht als allgemeingültig, sondern immer im Zusammenhang mit dem hier untersuchten Modell und den dazugehörigen Randbedingungen betrachtet werden.

Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen wurde bereits ein Ergänzungsvorschlag für den Teil 5 der DIN V 18599 in den neuen Teil 100 eingebracht. Dieser befindet sich im Anhang D auf Seite 125 und beinhaltet die Unterscheidung nach konstanter Vorlauftemperatur ($\eta_{h,ce} = 0,70$) und zentral geregelter Vorlauftemperatur ($\eta_{h,ce} = 0,73$).

Für den Kühlfall werden parallel zwei unterschiedliche Vorgehensweisen untersucht. Im Kapitel 10.1 auf Seite 81 sind die **Grenz- und Zielwertbetrachtungen** erläutert.

Die Grenzwertbetrachtung fordert analog zur Vorgehensweise im Heizfall, dass die Raumtemperatur im TAB-Betrieb niemals den Grenzwert der Komfortkategorie II (26 °C) überschreiten darf. Das ideale System als Bezugsgröße hält diese Temperaturvorgabe mit dem geringst möglichen Aufwand ein. Auf diese Weise erreicht das TABS sehr geringe Nutzungsgrade von zum Teil $< 0,50$. Aufgrund der Anforderung ist dies plausibel und vermutlich auch bezüglich der Vergleichbarkeit der Übergabesysteme untereinander ein klares Vorgehen. Es ist eine ausgeprägte Abhängigkeit des Nutzungsgrades vom Nutzkältebedarfs vorhanden. Über den ermittelten Zusammenhang (Bild 11-1 auf Seite 108) können so Nutzungsgrade bestimmt werden, die mit steigendem Nutzkältebedarf größer werden. Auch dieser Zusammenhang ist durch den höheren Belastungsgrad des System bei höherem Bedarf plausibel.

Bei der Zielwertbetrachtung ist die Komfortanforderung deutlich entscheidender. Nun hält das ideale System stets den Zielwert von 24,5 °C ein. Vom TABS (und sollte dieses Vorgehen auf andere Übergabesystem übertragen werden auch von diesen) wird gefordert, die Raumtemperaturen jeweils innerhalb des gewünschten Komfortbereiches nach DIN EN 15251 zu halten. Diese schwingen also über 24,5 °C hinaus. Die Tabelle 11-3 auf Seite 109 zeigt die sich ergebenden Gesamtnutzungsgrade für den jeweiligen Bereich. Je höher der gewünschte und geplante Komfort, umso geringer ist der Nutzungsgrad. Diese können, bei geringen Komfortanforderungen, größer sein werden.

Beide hier untersuchten, grundsätzlich verschiedenen und unvereinbaren Vorgehensweisen für die Bestimmung der Kälteübergabe sind mit allen Verantwortlichen der Normungsteile abzustimmen.

Das TABS System erreicht aufgrund seiner Trägheit relativ hohe rechnerische Übergabeverluste. Bei der Bewertung des Gesamtsystems im Rahmen der DIN V 18599 gleicht sich dieser Umstand häufig durch einen günstigen Primärenergiefaktor aufgrund möglichen Einsatzes regenerativer Energien aus. Es können in der Praxis mit einem einfachen TABS sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall behagliche Temperaturverhältnisse erreicht werden. Wichtig ist, dass innerhalb ei-

nes Gesamtkonzepts die einzelnen Komponenten aufeinander abgestimmt sind.

Um für den Teil 7 der DIN V 18599 detailliertere Kenngrößen hinsichtlich der Übergabeverluste auszuarbeiten ist zunächst eine Verständigung hinsichtlich der Vorgehensweise nötig. Sämtliche Auswirkungen auf die Verknüpfungen zwischen den Normenteilen und auf die im folgenden zu untersuchenden Übergabesysteme neben den TABS sind zu überprüfen.

13 Literatur

- [1]** BINE Informationsdienst: Thermoaktive Bauteilsysteme, Nichtwohnungsbauten energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau, Themeninfo I/2007.
- [2]** Burkard, T.: Das Nutzenübergabeverhalten von Systemen zur Bauteilaktivierung, Studienarbeit an der Universität Stuttgart, Band 1 der Abert-Tichelmann-Reihe der VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Dezember 2003.
- [3]** Bauer, M.: Methode zur Berechnung und Bewertung des Energieaufwandes für die Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen, Dissertation an der Universität Stuttgart, IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik, Stuttgart 1999.
- [4]** Deecke, H.: Betonkernaktivierung A bis Z, velta Kongress 2003.
- [5]** Schalk, K.: Ermittlung von Wärmeübergabeverlusten thermisch aktivierter Bauteile mittels Simulationsrechnungen, Diplom II an der Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik im Oktober 2007.
- [6]** Schnieders, J.: Simulationen zur Effizienz der Wärmeübergabe, Protokollband Nr. 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, 1. Auflage, Darmstadt im September 2004.
- [7]** Hauser, G. und Kempkes, C.: Wasserdurchströmte Bauteile zur Raumkonditionierung. Aus Bauphysik, Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift zum 60. Geburtstag von Karl Gertis. Hrg. G. Hauser, IRB-Verlag Stuttgart 1998, S. 87-110; Ges.-Ing. 120 (1999), H. 3, S. 126-135; TAB 32 (2001), H. 6, S. 49-56.
- [8]** Olesen, B., Dossi, F.: Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung, velta Kongress 2004.
- [9]** DIN EN 1264-4: Fußboden-Heizung Systeme und Komponenten, Teil 4: Installation, Dezember 2001.
- [10]** Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- [11]** DIN V 18599-5: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, Februar 2007.
- [12]** DIN V 18599-7: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau, Februar 2007.

[13] 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, Februar 2007.

[14] DIN V 4108-6: Vornorm Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Anhang B, Bild B.1, Abminderungsfaktoren für außenliegenden Sonnenschutz.

[15] Feist, W.: Wärmeübergabeverluste im Licht der Baupraxis, Protokollband Nr. 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, 1. Auflage, Darmstadt im September 2004.

[16] Schnieders, J.: Dynamisches Verhalten und Wärmeübergabeverluste von Flächenheizungen, Forschungsprojekt im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Endbericht, Passivhausinstitut, Februar 2005.

[17] David, R; de Boer, J.; Erhorn, H.; Reiß, J.; Rouvel, L.; Schiller, H.; Weiß, N.; Wenning, M.: Heizen, Kühlen, Belüften & Beleuchten, Bilanzierungsgrundlagen nach DIN V 18599, Fraunhofer IRB Verlag 2006, Seite 101.

[18] Schlegel, K.: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Kassel, Dokumentation und Analyse eines innovativen Forschungs- und Demonstrationsgebäudes, Diplomarbeit an der Universität GH Kassel, Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, Sommer 2001.

[19] Hauser, G., Kaiser, J., Rösler, M., Schmidt, D.: Energetische Optimierung, Vermessung und Dokumentation, Abschlussbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Solaroptimiertes Bauen, Teilkonzept 3“, Kassel im Dezember 2004.

[20] Achermann, M., Zweifel, G.: RADTEST – Radiant Heating and Cooling Test Cases. A Report of Task22, Subtask C: Building Energy Analysis Tools: Comparative Evaluation Tests, HTA Luzern 2003.

[21] Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. 2001.

[22] Riegel, W.: Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden. TU Darmstadt. 2004.

[23] Pfarr, K.: Handbuch der kostenbewussten Bauplanung. Ansätze zu einem den Planungs- und Bauprozess begleitenden Kosteninformationssystem. Deutscher Consulting Verlag Wuppertal 1976.

[24] Trogisch, A./Günther, M.: Planungshilfen bauteilintegrierte Heizung und Kühlung. C. F. Müller Verlag. 2008.

[25] Maas, A., Hauser, G. und Höttges, K.: Die Energieeinsparverordnung. Bauphysik 24 (2002), H. 1, S. 26-38; wksb 47 (2002), H. 48, S. 15-25.

[26] Hauser, G.: Vereinfachte Behandlung des Wärmeverhaltens großer Gebäude durch thermische Systeme. Betonwerk und Fertigteil-Technik 44 (1978), H. 5, S. 266-271.

Anhang

Anhang - A Eingabedaten und Randbedingungen für die Software IBP18599

Gebäude	Typ:		Neubau
	Geometrie:	Anzahl der Geschosse:	1
		Geschosshöhe:	3,30 m
		charakteristische Länge:	3,60 m
		charakteristische Breite:	5,50 m
Zone:	Bauart:		schwer
	Art der Berechnung von Wärmebrücken.		schon berücksichtigt
	Konditionierung:		Beheizung und Kühlung, einfaches Lüftungssystem Temperaturabsenkung an Nutzungstagen und Nichtnutzungstagen
	Geometrie:	Nettogrundfläche:	19,80m ²
		Bruttovolumen:	69,30m ³
		Nettovolumen:	55,44m ³
		Geschosshöhe:	2,80m
		Nutzungsprofil:	2 Gruppenbüro Flächenbezug, mittlere Belegung
Bauteile:	Außenwand:	Ausrichtung:	West
		U-Wert:	0,24 W/(m ² *K)
		Fläche:	11,37m ²
		Wand gedeckter Anstrich	Absorptionskoeffizient 0,60
	Fenster:	Fläche:	5,04m ²
		Breite:	3,06m
		Höhe:	1,65m
		Brüstung	0,80m
		U-Wert:	1,39W/(m ² *K)
		g-Wert:	0,58
		Verschmutzungsfaktor	1
		Abminderung Rahmen	0,7
	Sonnenschutzvorrichtung:	Variabel, Außenjalousie (10°) grau, automatisch gesteuert	
		g-total:	0,06
Beleuchtung:	ein Beleuchtungsbereich	nach Nutzungsprofil	direktes Kunstlicht, Leuchtstofflampe mit EVG
:	:		manuelle Kontrolle

Belüftung	Fensterlüftung	Verbindung der Zone zur Außenluft:	Fenster und Durchlässe
		Kat. I - Dichtheitsprüfung nach Fertigstellung (1 1/h)	
		Windabschirmklasse des Gebäudes	mittlere Abschirmung
	mech. Lüftung:	Lüftungsanlage zur vollständigen Belüftung	konstanter Volumenstrom,
		Sollwert der Zulufttemperatur:	16°C (ohne Einfluss)
		Mindestvolumenstrom anlagentechn.:	83,16 m³/h
	WRG:	ohne Stoff- bzw. Feuchteübertragung	Rückwärmezahl: 80%
Anlagentechnik:	Details unerheblich, da Nutzenergie interessiert	Wärme- und Kälteerzeuger, Verteilung und Übergabe, Leitungsführung außen	

Anhang – B Ergebnisse Aufwandszahlen aller Varianten TRNSYS und IDA-ICE

	TRNSYS				IDA-ICE			
	Heizen		Kühlen		Heizen		Kühlen	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West
0_ref , Bedarf im TAB Betrieb [kWh/a]	425	425	-242	-243	390	401	-304	-383
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,26	1,26	2,18	1,83	1,33	1,38	1,81	1,93
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,26	1,25	1,21	1,07	1,32	1,37	1,13	1,27
1_ref_last_tief [kWh/a]	504	504	-168	-178	491	485	-236	-308
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	406	407	-72	-90	360	357	-116	-143
<i>Aufwandszahl</i>	1,24	1,24	2,32	1,97	1,36	1,36	2,03	2,15
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	407	408	-143	-167	361	357	-204	-232
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,24	1,24	1,18	1,07	1,36	1,36	1,16	1,33
2_ref_last_hoch [kWh/a]	297	297	-400	-432	271	266	-497	-554
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	214	215	-231	-259	176	175	-308	-342
<i>Aufwandszahl</i>	1,39	1,38	1,73	1,67	1,54	1,53	1,61	1,62
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	217	218	-355	-384	177	176	-427	-462
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,37	1,36	1,13	1,13	1,53	1,51	1,16	1,20
3_ref_reg_ungereg [kWh/a]	441	441	-244	-245	425	418	-336	-411
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,31	1,31	2,21	1,85	1,45	1,44	2,00	2,07
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,30	1,30	1,22	1,08	1,44	1,43	1,25	1,36

3_ref_reg_ungereg 27 [kWh/a]	450	450	-245	-251	452	446	-348	-420
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,34	1,33	2,21	1,90	1,54	1,54	2,06	2,12
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,33	1,33	1,22	1,11	1,53	1,53	1,29	1,39

3_ref_reg_ungereg 29 [kWh/a]	433	427	-242	-242	394	386	-368	-380
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,29	1,27	2,18	1,83	1,34	1,33	2,18	1,92
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,28	1,26	1,21	1,07	1,34	1,32	1,37	1,26

6_ref_bau_leicht [kWh/a]	475	476	-305	-344	634	779	-615	-791
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	349	350	-126	-154	303	301	-185	-220
<i>Aufwandszahl</i>	1,36	1,36	2,43	2,24	2,09	2,59	3,32	3,59
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	351	352	-217	-248	306	303	-282	-321
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,35	1,35	1,41	1,39	2,07	2,57	2,18	2,46

7_ref_schutz_kempkes [kWh/a]	536	535	-204	-220	524	517	-304	-367
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	425	426	-90	-111	399	397	-147	-176
<i>Aufwandszahl</i>	1,26	1,26	2,27	1,99	1,31	1,30	2,07	2,09
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	426	427	-169	-196	400	398	-244	-276
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,26	1,25	1,21	1,12	1,31	1,30	1,25	1,33

8_ref_schutz_passiv [kWh/a]	162	163	-282	-292	149	147	-384	-459
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	119	120	-160	-183	105	103	-272	-303
<i>Aufwandszahl</i>	1,36	1,36	1,77	1,60	1,42	1,42	1,41	1,52
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	123	124	-260	-285	108	106	-374	-407
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,32	1,32	1,08	1,03	1,38	1,38	1,03	1,13

9_ref_lue_al [kWh/a]	871	870	-257	-271	926	923	-339	-401
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	880	880	-151	-173	836	833	-203	-230
<i>Aufwandszahl</i>	0,99	0,99	1,70	1,57	1,11	1,11	1,67	1,74
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	883	883	-234	-260	838	835	-290	-319
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	0,99	0,99	1,10	1,05	1,10	1,11	1,17	1,26

10_ref_lue_konst [kWh/a]	403	410	-71	-98	363	357	-106	-185
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	317	318	-39	-58	273	270	-77	-104
<i>Aufwandszahl</i>	1,27	1,29	1,82	1,69	1,33	1,32	1,37	1,78
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	318	318	-111	-137	273	270	-167	-197
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,27	1,29	0,64	0,72	1,33	1,32	0,63	0,94

11_ref_so_man [kWh/a]	415	414	-371	-406	432	415	-471	-700
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	327	327	-217	-263	283	280	-308	-452
<i>Aufwandszahl</i>	1,27	1,27	1,71	1,54	1,53	1,48	1,53	1,55
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	329	330	-325	-375	285	282	-415	-576
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,26	1,26	1,14	1,08	1,52	1,47	1,13	1,22

13_ref_komf_KI [kWh/a]	432	431	-278	-296	457	458	-384	-464
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (25,5°C)	337	338	-137	-161	294	291	-202	-231
<i>Aufwandszahl</i>	1,28	1,28	2,02	1,84	1,56	1,57	1,90	2,01
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,27	1,27	1,39	1,31	1,55	1,57	1,43	1,54

14_ref_komf_KIII [kWh/a]	426	426	-160	-173	407	402	-214	-305
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (27,0°C)	336	337	-68	-86	293	290	-113	-140
<i>Aufwandszahl</i>	1,27	1,26	2,33	2,01	1,39	1,38	1,89	2,18
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,26	1,26	0,80	0,77	1,38	1,38	0,80	1,01

15_ref_komf_ziel [kWh/a]	481	482	-397	-428	523	522	-498	-560
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl</i>	1,42	1,42	1,98	1,89	1,77	1,79	1,85	1,85
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)								
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	-	-	-	-	-	-	-	-

16_ref_betr_durch [kWh/a]	429	438	-200	-213	401	396	-234	-306
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,27	1,30	1,80	1,61	1,37	1,36	1,39	1,55
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,27	1,29	1,00	0,94	1,36	1,36	0,87	1,01

17_ref_einbau_fbh [kWh/a]	409	410	-142	-167	398	385	-250	-301
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	294	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,21	1,22	1,28	1,26	1,35	1,33	1,49	1,52
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,21	1,21	0,71	0,74	1,35	1,32	0,93	1,00

18_ref_einbau_krm [kWh/a]	427	431	-170	-198	409	409	-241	-319
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Aufwandszahl</i>	1,27	1,28	1,54	1,49	1,39	1,41	1,43	1,61
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	339	339	-200	-227	295	292	-269	-302
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,26	1,27	0,85	0,87	1,39	1,40	0,90	-1,06

19_ref_lue_7 [kWh/a]	386	392	-291	-293	370	364	-363	-436
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	313	314	-161	-186	273	268	-228	-257
<i>Aufwandszahl</i>	1,23	1,25	1,81	1,57	1,35	1,36	1,59	1,70
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)	316	316	-260	-288	275	270	-330	-363
<i>Aufwandszahl_ziel</i>	1,22	1,24	1,12	1,02	1,35	1,35	1,10	1,20

23_ref_kuehllast_hoch [kWh/a]	68	65	-689	-745	66	61	-754	-967
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	33	30	-537	-587	27	24	-610	-760
<i>Aufwandszahl</i>	2,05	2,14	1,28	1,27	2,44	2,54	1,24	1,27
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal_ziel (24,5°C)					29	26	-725	-879
<i>Aufwandszahl_ziel</i>					2,28	2,35	1,04	1,10

Anhang – C Ergebnisse Aufwandszahlen TABS Grundlast mit idealem Zusatzsystem, IDA-ICE und TRNSYS

	TRNSYS				IDA-ICE			
	Heizen		Kühlen		Heizen		Kühlen	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West
20_ref_kombi, Bedarf im TAB Betrieb [kWh/a]	403	402	-199	-200	372	364	-271	-345
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]	4	5	-2	-4	4	4	-2	-3
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Deckungsrate</i>	99%	99%	99%	98%	99%	99%	99%	99%
<i>Aufwandszahl gesamt</i>	1,21	1,21	1,81	1,54	1,28	1,27	1,62	1,76
	Schaltemperaturen minus 0,6K							

20_ref_kombi [kWh/a]	354	352	-169	-168	348	339	-241	-314
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]	35	38	-8	-16	7	8	-7	-9
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Deckungsrate</i>	91%	90%	96%	91%	98%	98%	97%	97%
<i>Aufwandszahl</i>	1,16	1,16	1,59	1,38	1,21	1,20	1,48	1,63
	Schaltemperaturen minus 1K							

20_ref_kombi [kWh/a]	346	344	-166	-165	299	290	-204	-272
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]	41	45	-9	-17	38	42	-19	-22
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
<i>Deckungsrate</i>	89%	88%	95%	90%	89%	87%	91%	93%

<i>Aufwandszahl</i>	1,15	1,15	1,58	1,38	1,15	1,14	1,33	1,48
	Schaltemperaturen minus 1K, Vorlauf 19/27°C				Schaltemperaturen minus 1,5K			

20_ref_kombi [kWh/a]	148	149	-73	-57	230	224	-145	-212
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]	220	220	-63	-95	94	97	-50	-51
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
Deckungsrate	40%	40%	54%	37%	71%	70%	74%	81%
<i>Aufwandszahl</i>	1,09	1,09	1,22	1,15	1,11	1,11	1,16	1,33
					Schaltemperaturen minus 2K			

21_ref_kombi_21 [kWh/a]	310	308	-159	-156	313	304	-231	-288
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]	74	78	-11	-22	31	32	-11	-15
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)	337	337	-111	-132	293	290	-168	-198
Deckungsrate	81%	80%	94%	87%	91%	90%	95%	95%
<i>Aufwandszahl</i>	1,14	1,14	1,54	1,35	1,17	1,16	1,44	1,53
	Schaltemperaturen minus 1K, Vorlauf 21/24°C							

21a_ref_kombi_22_5 [kWh/a]
Energiebedarf Zusatzsystem [kWh/a]
Nutzenergiebedarf [kWh/a], ideal (26,0°C)
Deckungsrate
<i>Aufwandszahl</i>

103	99	-413	-457
223	226	0	0
293	290	-168	-198
32%	30%	100%	100%
1,11	1,12	2,45	2,31

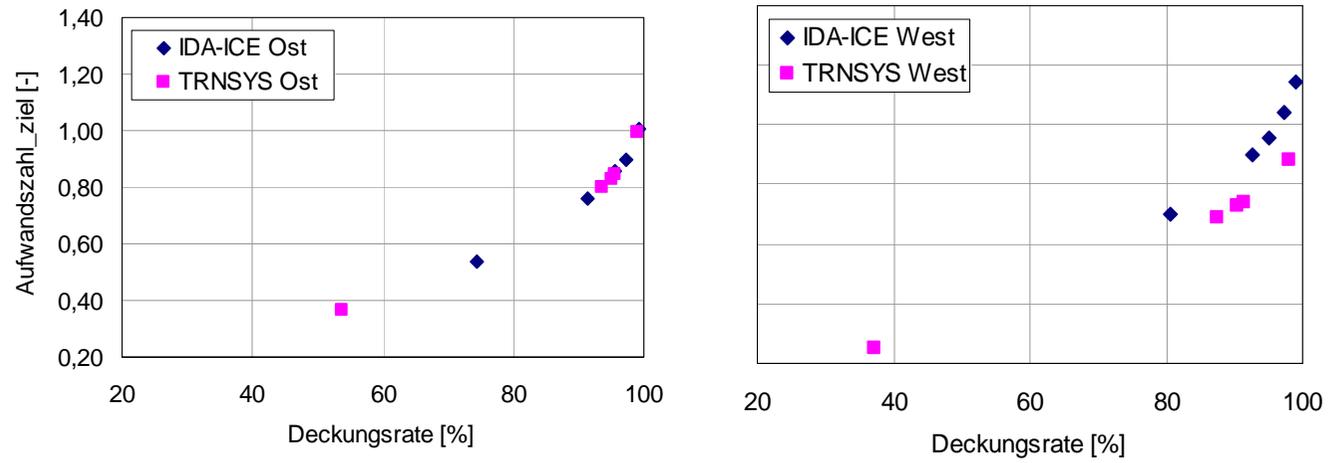


Bild 0-1: Aufwandszahl_ziel im **Kühlfall**, Büro Ost (links) und West (rechts), bei unterschiedlichen Deckungsraten, TABS mit Zusatzsystem

Anhang – D Normvorschlag zur Energetischen Bewertung thermisch aktivierter Bauteilsysteme (TABS) in DIN V 18599-5

Hintergrund

Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ wurde ein Forschungsprojekt zur Ermittlung vereinfachter Ansätze für die energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile bearbeitet. Die Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen Z6-10.08.18.7 - 06.17 / II 2 - F20-06-009). Der vorläufige Abschlussbericht liegt vor. Auf der Grundlage der Ergebnisse umfangreicher Simulationsberechnungen können für die Bewertung der thermischen Bauteilaktivierung (TABS bzw. Betonkernaktivierung) Werte für den Gesamtnutzungsgrad für den Heizfall abgeleitet werden. Für den Kühlfall ist vor der Festlegung der TABS-Bewertung eine grundsätzliche Einigung über die energetische Bewertung der Kälteübergabe erforderlich, so dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Faktoren vorgeschlagen werden.

Für DIN V 18599-5 wird folgende Ergänzung des Abschnitts 6.1.2 vorgeschlagen (Ergänzungen gelb hinterlegt):

6.1.2 Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (Flächenheizungen und TABS) (Raumhöhen ≤ 4 m)

In Tabelle 7 werden die Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (Flächenheizungen) (Raumhöhen ≤ 4 m) angegeben.

Tabelle 7 — Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (Flächenheizungen); Raumhöhen ≤ 4 m.

Einflussgrößen		Teilnutzungsgrade			
		η_L	η_C	η_B	
Raumtemperaturregelung	Wärmeträgermedium Wasser				
	– unregelt		0,75		
	– unregelt mit zentraler Vorlauftemperaturregelung		0,78		
	– unregelt mit Mittelwertbildung (9V –9R)		0,83		
	– Führungsraum		0,88		
	– Zweipunktregler/P-Regler		0,93		
	– PI-Regler		0,95		
	Elektroheizung				
	– Zweipunktregler		0,91		
	– PI-Regler		0,93		
System	Fußbodenheizung			η_{B1}	η_{B2}

	– Nasssystem	1		0,93	
	– Trockensystem	1		0,96	
	– Trockensystem mit geringer Überdeckung	1		0,98	
	Wandheizung	0,96		0,93	
	Deckenheizung	0,93		0,93	
Spezifische Wärmeverluste Verlegeflächen	Flächenheizung ohne Mindestdämmung nach DIN EN 1264				0,86
	Flächenheizung mit Mindestdämmung nach DIN EN 1264				0,95
	Flächenheizung mit 100 % besserer Dämmung als nach DIN EN 1264 erforderlich				0,99

Die Bestimmung des Gesamtnutzungsgrades $\eta_{h,ce}$ erfolgt nach Gleichung (28).

Bei η_B ist eine Mittelwertbildung der Angaben für die Haupteinflussgrößen „System“ und „Spezifische Wärmeverluste über Verlegeflächen“ vorzunehmen.

$$\eta_B = (\eta_{B1} + \eta_{B2})/2 \quad (31)$$

BEISPIEL FBH-Nasssystem (Wasser); Zweipunktregler; FBH mit hohem Wärmeschutzniveau

$$\eta_L = 1,0$$

$$\eta_C = 0,93$$

$$\eta_B = (\eta_{B1} + \eta_{B2})/2 = (0,93 + 0,95)/2 = 0,94$$

$$\eta_{h,ce} = 1/(4 - (1,0 + 0,93 + 0,94)) = 0,88$$

In Tabelle 8 werden die Gesamtnutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (TABS) (Raumhöhen ≤ 4 m) angegeben.

Tabelle 8 — Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen (TABS); Raumhöhen ≤ 4 m

Einflussgrößen		$\eta_{h,ce}$
Regelung	konstante Vorlauftemperatur	0,70
	zentral geregelte Vorlauftemperatur	0,73

Wird das TABS lediglich als Grundlastsystem eingesetzt, so sind TABS und Zusatzsystem (z. B. Heizkörper, Luftheizung, o.ä.) jeweils entsprechend ihrer energetischen Deckungsanteile zu bewerten.

Faktor für intermittierenden Betrieb: $f_{int} = 0,98$

ANMERKUNG Bei durchgängigem Betrieb wird $f_{int} = 1$ gesetzt.

Faktor für Strahlungseinfluss: $f_{Radiant} = 1,0$

Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1 Rohrleitungen zwischen der Bewehrung	14
Bild 2-2: Montagehinweise für PEX – Rohrsysteme	19
Bild 2-3: Frostschaden und Thermogramm TABS	19
Bild 2-4: Beschädigtes (links) und repariertes Rohr	20
Bild 2-5: Wirtschaftliche Nutzungsdauer von Gewerbebauten	22
Bild 2-6: Gliederung der Lebenszykluskosten von Gebäuden	24
Bild 2-7: Ablauf einer lebenszyklusorientierten Planung nach MÖLLER	24
Bild 2-8: Ökobilanz verschiedener Rohrwerkstoffe	25
Bild 3-1: Prozesskette der Anlagentechnik	27
Bild 3-2: Wochengang der Raumtemperatur	30
Bild 3-3: Wochengang der Raumtemperaturen	31
Bild 5-1: Vorhandene Messdaten des Büroraumes 1.06	44
Bild 5-2: Aufbau Heiz- und Kühlsystem in der Decke	45
Bild 5-3: Systemtemperaturen und Last, (sim00)	45
Bild 5-4: Systemtemperaturen und Last, (sim12)	47
Bild 5-5: Messwerte im Vergleich zu Simulationsergebnissen (sim12)	47
Bild 5-6: Anordnung der horizontalen Messfühler	49
Bild 5-7: Messwerte für horizontale Messpunkte	50
Bild 5-8: Ventilkennlinien für die Regelventile	51
Bild 5-9: Messfühler zur Erfassung der Vorlauftemperatur	52
Bild 5-10: Berechneter Verlauf der Rücklauftemperatur	53
Bild 5-11: Heiz-/Kühlleistung Fußbodensystem im Vergleich	54
Bild 6-1: Gebäude aus RADTEST [20]	55
Bild 6-2: Unterschiedliche Modellierungsansätze in RADTEST	56
Bild 6-3: Verlegemuster für detailliertes Modell in RADTEST	56
Bild 6-4: Raumtemperaturen im Sommer (Case 2810 aus RADTEST)	57
Bild 6-5: Oberflächentemperatur Fußboden im Sommer	57
Bild 6-6: Rücklauftemperatur Fußboden im Sommer	58
Bild 7-1: Raumgeometrie des untersuchten 3-Zoners	59
Bild 7-2: Auswirkungen unterschiedlicher Klimadaten	63
Bild 7-3: Aufbau Heiz- und Kühlsystem in der Decke	63
Bild 7-4: Außenlufttemperatur abhängige Vorlauftemperaturregelung	64
Bild 8-1: Raumlufthtemperatur im Referenzgebäude	67
Bild 8-2: Oberflächentemperaturen innen im Referenzgebäude	67
Bild 8-3: Heizleistungen im Referenzgebäude	68
Bild 8-4: Vergleich eines sommerlichen Tagesprofils	69
Bild 8-5: Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur	71
Bild 8-6: Raumtemperatur im Referenzfall	72
Bild 10-1: Temperaturverlauf einer Sommerwoche	81
Bild 10-2: Abhängigkeit der Aufwandszahl vom Nutzwärmebedarf	82
Bild 10-3: Abhängigkeit der Aufwandszahl vom Nutzkältebedarf	83
Bild 10-4: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel vom Nutzkältebedarf	83
Bild 10-5: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel vom Nutzkältebedarf	84
Bild 10-6: Abhängigkeit der Aufwandszahl von der Regelung	85
Bild 10-7: Abhängigkeit der Aufwandszahl von der Regelung	85
Bild 10-8: Abhängigkeit der Aufwandszahl_ziel von der Regelung	86
Bild 10-9: Abhängigkeit von der Höhe der Vorlauftemperatur, Heizfall	86
Bild 10-10: Abhängigkeit von der Höhe der Vorlauftemperatur, Kühlfall	87

Bild 10-11: Abhängigkeit von der Bauweise im Kühlfall, Büro West	87
Bild 10-12: Aufwandszahl bei unterschiedlichen Wärmeschutzniveaus	88
Bild 10-13: Aufwandszahl bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien	89
Bild 10-14: Aufwandszahl_ziel, bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien	90
Bild 10-15: Aufwandszahl bei unterschiedlichen Komfortanforderungen	91
Bild 10-16: Aufwandszahl_ziel bei unterschiedlichen Komfortanforderungen	91
Bild 10-17: Aufwandszahl im Kühlfall, bei unterschiedlichen Betriebszeiten	93
Bild 10-18: Temperaturverlauf mit durchgängiger Betriebsbereitschaft	93
Bild 10-19: Aufwandszahl im Heizfall bei unterschiedlichen Einbautiefen	94
Bild 10-20: Aufwandszahl im Kühlfall, unterschiedliche Einbautiefen	95
Bild 10-21: Aufwandszahl_ziel Kühlfall, unterschiedliche Einbautiefen	95
Bild 10-22: Aufwandszahl im Heizfall, Büro Ost und West gemittelt	96
Bild 10-23: Aufwandszahl im Kühlfall, Büro Ost (links) und West	96
Bild 10-24: Aufwandszahlen aller Varianten für den Heizfall	98
Bild 10-25: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall Büro Ost	99
Bild 10-26: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall Büro West	100
Bild 10-27: Aufwandszahlen aller Varianten für den Kühlfall	101
Bild 10-28: Aufwandszahlen_ziel aller Varianten für den Kühlfall	102
Bild 10-29: Aufwandszahlen ausgewählter Varianten für den Kühlfall	104
Bild 11-1: Gesamtnutzungsgrad ausgewählter Varianten für den Kühlfall	108
Bild 14-1: Aufwandszahl_ziel im Kühlfall	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Lebenserwartung von TGA – Komponenten (Richtwerte)	23
Tabelle 3-1: Nach DIN EN 15251 empfohlene Innentemperaturbereiche	33
Tabelle 3-2: Beispiele für die Dauer der Abweichungen	33
Tabelle 3-3: Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen der 18599	36
Tabelle 3-4: Faktoren Raumkühlung, Tabelle 8 nach DIN V 18599-7	38
Tabelle 5-1: Vergleich charakteristischer Werte der Messung/Simulation	46
Tabelle 7-1: Materialkennndaten der modellierten Bauteile	60
Tabelle 7-2: Kennndaten der Fenster und des Sonnenschutzes	61
Tabelle 7-3: Nutzungsrandbedingungen Flur	61
Tabelle 7-4: Nutzungsrandbedingungen Büro	62
Tabelle 7-5: Auslegungsparameter des TAB	63
Tabelle 8-1: Nutzenergiebedarf für den Referenzfall	65
Tabelle 8-2: Ausgewählte Ergebnisse der dynamischen Jahressimulation	68
Tabelle 8-3: Schalttemperaturen und Laufzeiten, IDA-ICE	70
Tabelle 8-4: Schalttemperaturen und Laufzeiten, TRNSYS	70
Tabelle 8-5: Ergebnisse für den Referenzfall	71
Tabelle 9-1: Wärmelast aus Personen und Arbeitshilfen	73
Tabelle 9-2: Wärmelast durch Kunstlicht	74
Tabelle 9-3: Variantenbildung	79
Tabelle 9-4: Übersicht und Kennzeichnung der Varianten	80
Tabelle 10-1: Nutzkältebedarf, Bedarf der TABS, Aufwandszahl	92
Tabelle 10-2: Definition der Unterteilung des Nutzkältebedarfs	105
Tabelle 11-1: Nutzungsgrade für bauteilintegrierte Heizflächen	107
Tabelle 11-2: Gesamtnutzungsgrad $\eta_{c, ce}$ für die Kälteübergabe	109
Tabelle 11-3: Nutzungsgrade des jeweiligen Komfortanspruchs	109