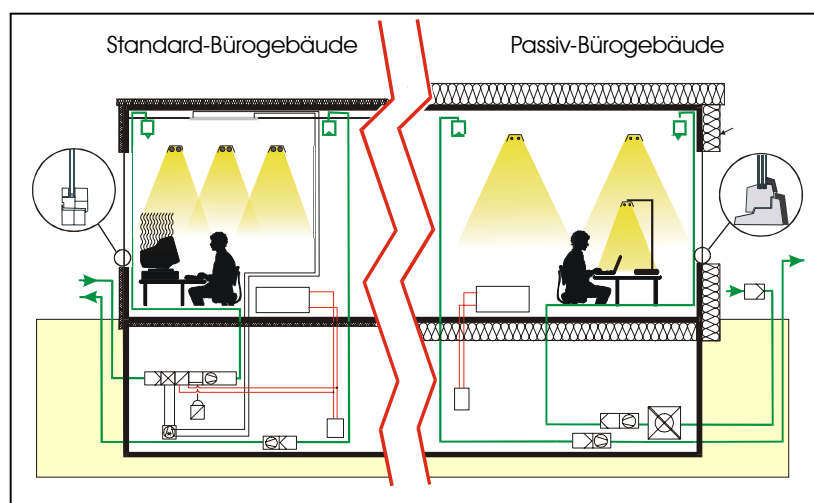


Energieeffiziente Bürogebäude
mit reduzierten internen Wärmequellen
und Wärmeschutz auf Passivhausniveau

Dipl.-Ing. Jens Knissel

Berlin, 2002; D83



Energieeffiziente Bürogebäude mit reduzierten internen Wärmequellen und Wärmeschutz auf Passivhausniveau

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Jens Knissel
aus Aachen

An der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

Promotionsausschuss

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Steinbach

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Gerhard Bartsch

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 21. Oktober 2002

Berlin 2002

D 83

DANKSAGUNG

Beim Erstellen der vorliegenden Promotionsarbeit haben mich viele Personen auf die unterschiedlichsten Arten unterstützt. Jeder dieser Beiträge war in seiner Form und seinem Inhalt wichtig für das Zustandekommen dieser Arbeit. Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei allen bedanken.

Namentlich möchte ich das Institut Wohnen und Umwelt nennen, bei dem ich seit nunmehr 8 Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig bin. Hier bekam ich die Möglichkeit, mich dem Thema „energieeffiziente Bürogebäude“ intensiver zu widmen. Ohne diesen Einstieg und die Vorarbeiten wäre diese Arbeit nie zustande gekommen.

Mein Dank gilt auch Prof. Bartsch und Prof. Fitzner für die fachliche Betreuung. Prof. Bartsch möchte ich besonders für die motivierende Begleitung danken. Sie war wesentliche Voraussetzung dafür, dass ich in der langen Bearbeitungszeit nie den Mut und die Motivation verlor.

Zuletzt, dafür aber um so deutlicher, möchte ich mich bei meiner Frau, Maria Knissel, und bei meinen beiden Töchtern, Mareike und Sarah, bedanken. Sie mussten nicht nur auf eine stattliche Anzahl gemeinsamer Stunden verzichten sondern bekamen insbesondere in der Endphase meine Stimmungsschwankungen hautnah mit. Trotz allem war Maria mir ein wichtiger Diskussionspartner, wenn ich mich mal wieder in den vielen Schattierungen des Themas verlaufen hatte. Meinen beiden Töchtern möchte ich danken für Sprüche, wie „Du und deine blöde Doktorarbeit!“ oder „Was hast du den eigentlich davon, wenn du Doktor bist?“. Diese brachten mich immer wieder in die Realität und zu den wirklich wichtigen Dingen des Lebens zurück.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	1
1 EINLEITUNG.....	3
2 STAND DER DISKUSSION	5
3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	6
4 BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER MÖGLICHKEITEN UND KONSEQUENZEN EINER HOHEN ENERGETISCHEN EFFIZIENZ.....	9
4.1 Grundlagen der Berechnungen.....	12
4.1.1 Geometrie des Beispielgebäudes.....	12
4.1.2 Beschreibung der Variante „Standard-Bürogebäude“	13
4.1.3 Beschreibung der Variante „Passiv-Bürogebäude“	14
4.1.4 Schematische Darstellung der Wärmeströme	18
4.1.5 Definition der verwendeten Primärenergiekennwerte	21
4.1.6 Gebäudesimulationsprogramm TAS	23
4.1.7 Modellieren des Erdreichwärmetauschers in den Simulationsrechnungen	26
4.1.8 Klimarandbedingung	27
4.2 Primärenergieeinsparung	28
4.2.1 Diskussion der berechneten Primärenergieeinsparung	31
4.3 Raumkomfort.....	33
4.4 Ökonomische Bewertung	35
4.4.1 Selbstgenutzte Immobilie	38
4.4.2 Vermietete Immobilie	40
4.4.3 Diskussion der berechneten Kapitalwerte	41
4.5 Variation wichtiger Gebäudeparameter	43
4.5.1 Personenbelegungsdichte	43
4.5.2 Höhe der internen Wärmequellen	45
4.5.3 Orientierung der Hauptfassaden	50
4.5.4 Fensterflächenanteil der Hauptfassaden	51
4.5.5 Kompaktheit des Baukörpers	56
4.5.6 Höhe des Außenluftwechsels	59

4.6 Modellprojekte	64
4.6.1 Verwaltungsgebäude Wagner & Co.....	64
4.6.2 Verwaltungsgebäude Lamparter	66
4.6.3 Vergleich der gemessenen Verbräuche mit den Simulationsrechnungen	68
5 VORSCHLAG FÜR EIN SINNVOLLES WÄRMESCHUTZNIVEAU BEI ENERGIEEFFIZIENTEN BÜROGEBÄUDEN.....	71
5.1 Winter-Bedingung zur Definition des Wärmeschutzniveaus	74
5.1.1 Beschreibung des zugrunde liegenden Gebäudemodells	75
5.1.2 Einfluss des Wärmeschutzes auf das sommerliche Temperaturverhalten	77
5.1.3 Einfluss des Wärmeschutzes auf die Wirtschaftlichkeit	84
5.2 Winter-Kenngröße zur Beschreibung des Wärmeschutzniveaus.....	89
5.2.1 Allgemeiner Berechnungsansatz	90
5.2.2 Über die Zuluft transportierbare Heizleistung	92
5.2.3 Gebäudeheizlast.....	96
5.2.4 Bestimmungsgleichung.....	98
5.2.5 Berücksichtigung von Atrien	101
5.3 Klimarandbedingungen	102
5.3.1 Solare Einträge	102
5.3.2 Außenlufttemperatur	102
5.4 Anwendung auf das Beispielgebäude.....	104
5.4.1 Randbedingungen	104
5.4.2 Berechnung	109
5.5 Sensitivitätsanalyse.....	110
5.5.1 Hauptnutzflächenfaktor ζ	111
5.5.2 Brutto-Geschosshöhe $H_{G,brutto}$	113
5.5.3 Verhältnis Netto- zu Bruttovolumen des Gebäudes ψ	114
5.5.4 Betriebszeitfaktor κ	115
5.5.5 Solare Einträge	116
5.5.6 Interne Wärmequellen	118
5.6 Vorschlag für Effizienzrandbedingungen	120
5.6.1 Beispielrechnungen	121
5.7 Hinweise zur Luftheizung bei Bürogebäuden.....	125
5.7.1 Beheizbarkeit von kritischen Einzelräumen.....	125
5.7.2 Realisierung des intermittierenden Betriebs der Lüftungsanlage	126
5.7.3 Luftheizung bei Räumen mit unterschiedlich hohen internen Wärmequellen	127

6 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG	131
7 AUSBLICK	137
LITERATURVERZEICHNIS	139
LISTE DER VERWENDETEN SYMBOLE	145

ANHANG

A-8 DEFINITION DER UNTERSUCHTEN AUSFÜHRUNGSVARIANTEN	153
A-8.1 Passiv-Bürogebäude / Baukörper	153
A-8.1.1 Geometrie	153
A-8.1.2 Materialaufbau der Bauteile	154
A-8.1.3 Sonnenschutz	157
A-8.1.4 Luftdichtheit der Gebäudehülle	157
A-8.2 Passiv-Bürogebäude / Nutzung	157
A-8.2.1 Nutzungszonen	157
A-8.2.2 Nutzungszeit und Betriebszeit	158
A-8.2.3 Anforderungen an das Raumklima	158
A-8.2.4 Interne Wärmequellen	159
A-8.2.5 Zuordnung der Tagesprofile zu den Tagen des Jahres	167
A-8.2.6 Klima	168
A-8.3 Passiv-Bürogebäude / HLK-Anlage	169
A-8.3.1 Gesamtkonzept der HLK-Anlage	169
A-8.3.2 Heizungsanlage	170
A-8.3.3 Lüftungsanlage	171
A-8.3.4 Modell des Erdreichwärmetauschers	173
A-8.4 Standard-Bürogebäude / Baukörper	174
A-8.4.1 Geometrie	174
A-8.4.2 Materialaufbau der Bauteile	174
A-8.4.3 Sonnenschutz	174
A-8.4.4 Luftdichtheit der Gebäudehülle	175

A-8.5 Standard-Bürogebäude / Nutzung	175
A-8.5.1 Nutzungszonen	175
A-8.5.2 Nutzungszeit und Betriebszeit	175
A-8.5.3 Anforderungen an das Raumklima	175
A-8.5.4 Interne Wärmequellen	176
A-8.5.5 Zuordnung der Tagesprofile zu den Tagen des Jahres	178
A-8.5.6 Klima	178
A-8.6 Standard-Bürogebäude / HLK-Anlage	179
A-8.6.1 Gesamtkonzept der HLK-Anlage	179
A-8.6.2 Heizungsanlage	180
A-8.6.3 Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung	180
A-8.6.4 Kälteanlage	181
A-8.6.5 Be- und Entfeuchtung	184
A-9 ABSCHÄTZEN DER MEHR- BZW. MINDERAUSGABEN FÜR DIE VARIANTE „PASSIV-BÜROGEBÄUDE“	185
A-9.1 Investive Mehr- bzw. Minderausgaben	185
A-9.1.1 Baukörper	185
A-9.1.2 Beleuchtung	186
A-9.1.3 Arbeitshilfen	188
A-9.1.4 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Anlage)	189
A-9.2 Einsparung an Energie- und Wartungskosten	192
A-10 AUßENLUFTBEDARF IN DER MORGENDLICHEN SPÜLPHASE	194
A-11 BEHEIZBARKEIT VON KRITISCHEN EINZELRÄUMEN	202
A-11.1 Randbedingungen	202
A-11.2 Berechnung	204
A-11.3 Fazit	205

A-12 DYNAMISCHE AUFHEIZLAST BEI INTERMITTIERENDEM HEIZBETRIEB...	206
A-12.1 Berechnung des Auskühlverhaltens.....	207
A-12.2 Berechnung der dynamischen Aufheizlast.....	213
A-12.3 Kopplung der Berechnung von Auskühlverhalten und Aufheizlast.....	219
A-12.4 Berechnen der dynamischen Aufheizlast für das Beispielgebäude	220
A-12.4.1 Randbedingungen	220
A-12.4.2 Temperatur am Ende der Abschaltzeit.....	225
A-12.4.3 Erforderlicher Luftwechsel	226
A-12.5 Einfluss der Aufheizzeit	229
A-12.6 Aufheizlast von Einzelräumen	231
A-12.7 Vergleich mit Simulationsrechnungen.....	234
A-12.8 Schichtenweise Definition der verwendeten Bauteile	238

ZUSAMMENFASSUNG

Bei Wohngebäuden sind mit dem Niedrig- und dem Passivhausstandard die Möglichkeiten einer weit reichenden Energieeinsparung beim Neubau aufgezeigt worden. In dieser Arbeit werden die Erfahrungen auf Büro- und Verwaltungsgebäude übertragen und vor dem Hintergrund der speziellen Randbedingungen konkretisiert.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Möglichkeiten und Konsequenzen eines hohen energetischen Effizienzstandards bei Bürogebäuden aufgezeigt. Hierzu wird das energetische Verhalten zweier Ausführungsvarianten eines Beispielgebäudes mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen bestimmt und verglichen. Betrachtet wird der Brennstoff- und Strombedarf des Gebäudes während der Nutzungsphase. Die Variante „Standard-Bürogebäude“ repräsentiert eine Ausführung, bei der keine Energiesparmaßnahmen über das gesetzliche Mindestmaß (Wärmeschutzverordnung 1995) hinaus ergriffen wurden. Bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ werden im Gegensatz dazu möglichst weitgehend die derzeit verfügbaren und wirtschaftlich vertretbaren Energiesparmaßnahmen umgesetzt. Aus dem Vergleich der Varianten können mehrere Aussagen abgeleitet werden. So wird deutlich, dass mit dem „Passiv-Bürogebäude“ eine erhebliche Primärenergieeinsparung erzielt werden kann. Eine wichtige Rolle im Gebäudekonzept der Variante „Passiv-Bürogebäude“ kommt dabei der Reduktion der internen Wärmequellen (Stromverbrauch der Beleuchtung und Arbeitshilfen) zu. Erstens trägt deren geringer Stromverbrauch wesentlich zur Primärenergieeinsparung bei. Zweitens führt die hohe energetische Effizienz von Beleuchtung und Arbeitshilfen zu niedrigeren sommerlichen Temperaturen. In Verbindung mit einem guten Sonnenschutz, nutzbaren thermischen Speichermassen und der Möglichkeit zur freien Kühlung, kann so ohne nennenswerten Komfortverlust auf eine aktive Kühlung verzichtet werden. Drittens kann bei geringen internen Wärmequellen ein hoher Wärmeschutz der Gebäudehülle ohne die Gefahr von sommerlichen Überhitzungen realisiert werden. Der hohe Wärmeschutz führt seinerseits in Verbindung mit einer Lüftungsanlage (Zu- und Abluft) mit Wärmerückgewinnung zu einer deutlichen Primärenergieeinsparung bei der Heizung.

Die energieeffiziente Variante „Passiv-Bürogebäude“ ist bei den durchgeführten Berechnungen dem „Standard-Bürogebäude“ auch wirtschaftlich überlegen. Der Grund liegt in Einsparungen bei den Investitionskosten für die Haustechnik, insbesondere dem Verzicht auf eine aktive Kühlung. Hierdurch können Mehrkosten im Bereich des Wärmeschutzes und der Arbeitshilfen kompensiert werden. Bei Berücksichtigung der geringeren Energie- und Wartungskosten wird die Wirtschaftlichkeit unter den hier getroffenen Annahmen erreicht.

Die Variation wichtiger Gebäudeparameter zeigt, dass die weit reichende Primärenergieeinsparung und der hohe Raumkomfort der Variante „Passiv-Bürogebäude“ nicht an spezielle geometrische Randbedingungen gebunden sind. Es besteht ein großer Spielraum bei der Ausgestaltung der Kubatur derart energieeffizienter Gebäude. Voraussetzung ist jedoch, dass die hohe Effizienz bei Beleuchtung, Arbeitshilfen, Luftförderung und beim Wärmeschutz eingehalten wird.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird damit ein Gebäudekonzept aufgezeigt, dass sowohl einen erheblichen Reduktion im Primärenergiebedarf aufweist als auch wirtschaftlich sein kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wird untersucht, nach welchen Kriterien der Wärmeschutz von energieeffizienten Gebäuden dimensioniert werden sollte. Ausgangspunkt ist die in Abschnitt 4 festgestellte Tatsache, dass die Wirtschaftlichkeit trotz eines extrem hohen energetischen Niveaus erreicht werden kann, wenn Einsparungen bei den Investitionskosten für die aktive Kühlung und Heizung auftreten. Voraussetzung für diese Einsparungen sind bestimmte Effizienzniveaus bei den Arbeitshilfen, der Beleuchtung und dem Wärmeschutz. Ziel ist es, Planungskenngrößen - so genannte Effizienzkenngößen - zu definieren, die die erforderlichen Effizienzniveaus abhängig von den jeweiligen Gebäudeparametern beschreiben. Die Kenngrößen sollten dabei einfach gehalten werden, um sie bereits in einem frühen Planungsstadium anwenden zu können. Nach ersten Überlegungen kommen zwei Effizienzkenngößen in Betracht:

1. Sommer-Kenngröße: Beschreibt die Effizienz der Arbeitshilfen und der Beleuchtung, die zum Verzicht auf eine aktive Kühlung erforderlich ist
2. Winter-Kenngröße: Beschreibt den Wärmeschutz der Gebäudehülle, der für die Luftheizung und damit den Verzicht auf Heizkörper erforderlich ist.

In der vorliegenden Arbeit wird eine der beiden Kenngrößen, nämlich die Winter-Kenngröße, definiert und untersucht. Ausgangspunkt für die Definition der Winter-Kenngröße ist folgende Winter-Bedingung:

⇒ Der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist so zu dimensionieren, dass das Gebäude mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom über die Zuluft beheizt werden kann.

Aus der stationären Wärmestrombilanz wird eine einfache Berechnungsgleichung abgeleitet, über die der maximal zulässige mittlere U-Wert der Gebäudehülle U_{max} beschrieben wird, bis zu dem die Beheizung über die Zuluft möglich ist. Als Gebäudeparameter werden u. a. die Betriebszeit der Lüftungsanlage, der geförderte Außenluftvolumenstrom, das Oberflächen-Volumen-Verhältnis und die minimale Außentemperatur berücksichtigt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss wichtiger Berechnungsparameter auf die Anforderung an U_{max} .

Zur mathematischen Beschreibung der Winter-Kenngröße waren Vereinfachungen erforderlich. Bei der konkreten Umsetzung einer Luftheizung in einem Bürogebäude sind deswegen weitere objektbezogene Untersuchungen erforderlich. Die vorliegende Arbeit behandelt in dem Zusammenhang die Höhe der dynamischen Aufheizlast am Morgen und die Beheizbarkeit von kritischen Einzelräumen in Form von systematische Betrachtungen.

Fazit

In der Arbeit wird anhand von Beispielrechnungen gezeigt, dass bei Bürogebäuden eine hohe energetische Effizienz wirtschaftlich sein kann. Wichtig sind dafür eine hohe Effizienz von Beleuchtung und Arbeitshilfen sowie ein sehr guter Wärmeschutz der Gebäudehülle. Eingebettet werden müssen diese Maßnahmen in ein schlüssiges Gebäudekonzept. Zur Ermittlung eines energetisch und ökonomisch sinnvollen Wärmeschutzniveaus wird ein einfacher Berechnungsansatz aufgestellt. Dieser ermöglicht es, abhängig von den jeweiligen Gebäudeparametern den mittleren U-Wert der Gebäudehülle zu bestimmen, der für die Beheizung über die Zuluft und damit den Verzicht auf Heizkörper eingehalten oder unterschritten werden muss.

1 EINLEITUNG

Zur Stabilisierung unseres Klimas muss der CO₂-Ausstoß in den Industrieländern bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um mindestens 80 % gesenkt werden [Enquete-Kommission 1995]. Eine wichtige Rolle kommt dabei dem Energieverbrauch im Gebäudebereich zu. So werden etwa 30 % der gesamten Endenergie in Deutschland allein für die Beheizung von Gebäuden aufgewendet. Das wirtschaftliche Einsparpotenzial liegt je nach Energiepreisentwicklung bei bis zu 50 % [Ebel 1996].

Im Bereich der Wohngebäude sind mit dem Niedrigenergie- und Passivhaus die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung insbesondere beim Heizwärmebedarf von Neubauten aufgezeigt worden. Während beim Niedrigenergiehaus der Heizenergieverbrauch bei etwa 5 bis 7 Liter Heizöl pro m² Wohnfläche liegt, ist für die Beheizung von Passivhäusern nur noch ein Aufwand von 1,5 Litern erforderlich [Feist 1996-1]. Bezogen auf den gesetzlichen Mindeststandard der Energieeinsparverordnung entspricht dies einer Reduktion um 70 % bis 80 %.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Energieeffizienz bei Büro- und Verwaltungsgebäuden. Eine einfache Übertragung der für Wohngebäude gewonnenen Erkenntnisse ist wegen der unterschiedlichen Nutzungsrandbedingungen nicht möglich. So sind Büro- und Verwaltungsgebäude dichter mit Personen und den jeweiligen EDV-Arbeitshilfen belegt. Hierdurch treten punktuell hohe thermische Lasten auf. Zudem werden für die Büroarbeit besondere Anforderungen an die Beleuchtung, die Raumtemperatur und -feuchte sowie die Luftqualität gestellt. Diese Aspekte müssen bei der Planung von Bürogebäuden berücksichtigt werden.

Die Diskussion um Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung bei Büro- und Verwaltungsgebäuden ist derzeit gekennzeichnet durch einen hohen Diversifizierungs- und Detaillierungsgrad. Es werden unterschiedliche Teilaspekte mit einer großen (technischen) Tiefe innerhalb der jeweiligen Fachdisziplin diskutiert. Einige Schlagworte der letzten Jahre sind:

Gebäudehülle

- solare Architektur, transparentes Gebäude, Glas-Architektur
- intelligente Fassade
- Doppelfassade
- Klimahülle, „Haus im Haus“-Konzept;

Haustechnik, Nutzungstechnik

- Tageslichtnutzung, Tageslichtlenkung
- Beleuchtungssteuerung, Sonnenschutzsteuerung
- Gebäudeleittechnik, Bussysteme
- Flexibler Arbeitsplatz;

Heizungs-, Lüftungs-, Klimatechnik

- Kühldecke, Quelllüftung
- solare Kühlung
- freie Kühlung, Nachtlüftung
- motorisch öffnbare Fenster
- Erdreichwärmetauscher
- Bauteiltemperierung

Bei dieser diversifizierten Diskussion muss beachtet werden, dass Zusammenhänge und Rückkopplungen zwischen den einzelnen Teilbereichen bestehen. Die beste Gesamtlösung ist nicht die Summe der optimierten Einzellösungen. Die einzelnen Teile müssen zu einem in sich schlüssigen Gesamtkonzept - im Folgenden als Gebäudekonzept bezeichnet - verbunden werden [Fuchs 1999].

Ein Versuch zu einem abgestimmten, schlüssigen Gebäudekonzept zu kommen, ist die integrale Planung. Hierbei wird ein Planungsteam gebildet, das neben Bauherrn und Architekt die jeweiligen Fachingenieure umfasst. So können bereits im frühen Planungsstadium die Rückkopplungen mit den anderen Gewerken bedacht und die unter Berücksichtigung der wesentlichen Aspekte günstigsten Lösungen realisiert werden. Die Ergebnisse solcher Planungen sind jedoch nicht automatisch gut. In [Eicke-Henning 1997] werden zwei „energiesparende“ Gebäude mit unterschiedlichem Konzepten auf der Grundlage der gemessenen Verbrauchskennwerte verglichen. Der Primärenergiekennwerte unterscheidet sich dabei um den Faktor drei.

Für die integrale Planung sind somit Informationen zum energetischen Verhalten des Gesamtsystems „Gebäude“ erforderlich. Die Bewertung unterschiedlicher Gebäudekonzepte muss dabei u.a. die Auswirkungen auf den Raumkomfort im Sommer und Winter, den Strom- und Brennstoffbedarf sowie die Wirtschaftlichkeit berücksichtigen (Abb. 1-1). Leider geschieht eine solch umfassende Bewertung heute nur in wenigen Fällen. Häufig steht nur einer dieser Aspekte im Zentrum der Planung. Ein solches Vorgehen birgt jedoch die Gefahr von Fehloptimierungen und suboptimalen Lösungen.

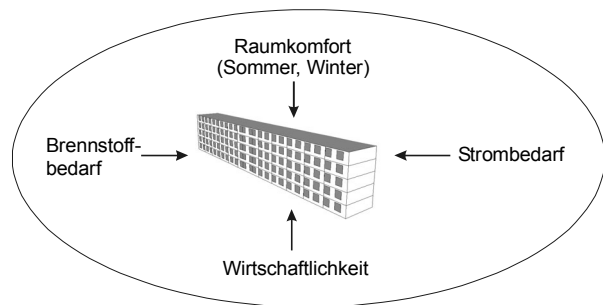


Abb. 1-1: Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher energetischer Gebäudekonzepte bei Büro- und Verwaltungsgebäuden

Wenn in dieser Arbeit von energieeffizienten Gebäuden gesprochen wird, so sind damit Gebäude gemeint, die alle in Abb. 1-1 dargestellten Aspekte in positiver Weise erfüllen. Zur quantitativen Bewertung der energetischen Effizienz wird der Primärenergiebedarf des Gebäudes während der Nutzungsphase herangezogen. Die Bilanzgrenze bei der Ermittlung dieses Kennwertes ist in Abb. 4-1 dargestellt.

2 STAND DER DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden aktuelle Publikationen zur Fragestellung „Energieeffiziente Gebäudekonzepte für Bürogebäude“ vorgestellt, die eine umfassende Bewertung und Diskussion des Themas vornehmen.

Eine Zusammenstellung von mehreren energieeffizienten Beispielgebäuden ist in [SolarBau Monitor 2000] zu finden. Dabei handelt es sich um Gebäude, die im Teilkonzept 3 des Förderprogramms „solaroptimiertes Bauen“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert werden. Die Modellprojekte belegen, dass Gebäude mit einem Primärenergiebedarf für Heizung, Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung unter $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die Netto-Grundfläche möglich sind (siehe auch Abschnitt 4.6).

Neben der reinen Dokumentation der Modellprojekte werden in [SolarBau Monitor 2000] wie auch in der BINE Profiinfo II/01 „Energieeffiziente Bürogebäude“ [Hennings/Knissel 2001] die wesentlichen energetischen Zusammenhänge in Bürogebäuden aufgezeigt und Hinweise für die Planung gegeben. Ähnliche Fragestellungen werden in den Leitfäden [Erlangen 2001] und [Energieagentur NRW 1998] behandelt.

Eine systematische Untersuchung unterschiedlicher Grundrissvarianten im Hinblick auf den Primärenergiebedarf für Heizung und Kühlung wird in [Klinge 1994] vorgenommen. Betrachtet werden dabei Niedrigenergie-Bürogebäude. Nach einer umfassenden Darstellung der Planungsgrundlagen für Büro- und Verwaltungsbauten, wird der spezifische Heizwärme- und Kühlkältebedarf für unterschiedliche Grundrissvarianten bestimmt. Klinge kommt zu der Aussage, dass bei Niedrigenergie-Bürogebäuden der Einfluss der Gebäudegeometrie auf den Gesamtenergiebedarf im Vergleich zu einem Gebäude ohne zusätzliche Energiesparmaßnahmen geringer wird. Zudem muss zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs auch der Bereich der elektrischen Geräte (Beleuchtung, Arbeitshilfen) betrachtet werden.

In [Knissel 1999] wird mit Hilfe von Simulationsrechnungen untersucht, wie sich der Primärenergiebedarf eines Bürogebäudes bei einer schrittweisen Verbesserung der energetischen Effizienz vom „Büro-Altbau“ bis hin zum „Passiv-Bürogebäude“ verändert. Abschnitt 4 der vorliegenden Arbeit baut auf dieser Studie auf und integriert deren Ergebnisse.

Diese Zusammenstellung zeigt, dass das Thema „energieeffiziente Gebäudekonzepte“ immer stärker öffentlich diskutiert wird. Ein wesentlicher Impuls ist durch das oben genannte Förderprogramm „solaroptimiertes Bauen“ entstanden. Da Anforderungen an den Primärenergiekennwert für Heizung, Lüftung und Beleuchtung gestellt werden, rückt das Gesamtsystem Gebäude immer mehr ins Zentrum der Betrachtung. Ergänzend zu den Modellprojekten fehlen derzeit noch systematische Untersuchungen, in denen der Einfluss unterschiedlicher Gebäudeparameter auf den Primärenergiebedarf von energieeffizienten Büro- und Verwaltungsgebäuden quantifiziert wird. Hierzu will diese Arbeit einen Beitrag leisten.

3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Erkenntnisse über Büro- und Verwaltungsgebäude mit sehr hoher energetischer Effizienz zu gewinnen. Ausgangspunkt sind die Erfahrungen aus dem Bau von Passiv-Wohngebäuden. Diese werden mit entsprechenden Ergänzungen auf Bürogebäude übertragen und vor dem Hintergrund der speziellen Nutzungsrandbedingungen sowie den gesetzlichen Anforderungen konkretisiert.

Die Untersuchung betrachtet dabei nicht nur Effizienzsteigerungen bei einzelnen Komponenten. Vielmehr wird das komplexe System „Gebäude“ analysiert, bestehend aus Baukörper, Nutzung sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK-Technik). Auch die Bewertung beschränkt sich nicht auf einen Teilaspekt (z. B. sommerliches Temperaturverhalten), sondern es werden die in Abb. 1-1 aufgeführten Bewertungsaspekte berücksichtigt: Raumkomfort im Sommer und Winter, Brennstoff und Stromverbrauch sowie die Wirtschaftlichkeit. Damit wird sowohl in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand als auch die Bewertung ein komplexer Ansatz gewählt.

Im Folgenden wird der Aufbau der Arbeit kurz erläutert. Er ist in Abb. 3-1 grafisch dargestellt. Inhaltlich gliedert sich die Untersuchung in zwei Hauptteile.

Erster Teil; Abschnitt 4

Im Abschnitt 4 wird zunächst untersucht, wie sich ein hoher energetischer Gebäudestandard auf

- den Primärenergiebedarf (Brennstoff, Strom)
- den Raumkomfort (Sommer, Winter) und
- die Wirtschaftlichkeit

auswirkt. Quantifiziert werden die Auswirkungen durch den Vergleich zweier Ausführungsvarianten eines fiktiven Beispielgebäudes (Kap. 4.1 bis 4.4). Die Variante „Standard-Bürogebäude“ entspricht dabei einer Ausführung ohne jegliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Das „Passiv-Bürogebäude“ beschreibt im Gegensatz dazu eine Ausführung, bei der sehr weitgehend die auf dem Markt verfügbaren und finanziell vertretbaren Maßnahmen ergriffen werden. Die beiden Varianten zeigen die Grenzen auf (min, max), innerhalb derer sich die energetische Optimierung in der Praxis abspielen wird. Das energetische Verhalten der Ausführungsvarianten wird mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen bestimmt.

Nachdem die Auswirkungen einer hohen energetischen Effizienz dargestellt sind, wird die Variante „Passiv-Bürogebäude“ detaillierter untersucht. Im Zentrum steht die Frage, ob die weit reichende Primärenergieeinsparung, die zunächst nur für ein konkretes Beispielgebäude aufgezeigt wurde, an bestimmte Randbedingungen gekoppelt ist bzw. welche Gestaltungsspielräume bei der Realisierung derartiger Gebäude bestehen. Hierzu werden unterschiedliche Gebäudeparameter variiert und die Auswirkungen auf Primärenergiekennwert und Raumkomfort dargestellt. Die Bewertung geschieht ebenfalls über dynamische Simulationsrechnungen.

Abschließend werden die Ergebnisse der Berechnung mit gemessenen Verbrauchswerten energieeffizienter Gebäude verglichen. Dies gibt Hinweise darüber, ob die in den Simulationsrechnungen aufgezeigten Einsparpotenziale in der Praxis erreicht werden können.

Zweiter Teil; Abschnitt 5

Die Dämmstoffdicken der in Abschnitt 4 untersuchten Variante „Passiv-Bürogebäude“ entsprechen weitgehend den bei Passiv-Wohngebäuden üblichen Werten. In Abschnitt 5 wird untersucht, nach welchen Kriterien der Wärmeschutz von energieeffizienten Bürogebäuden genauer dimensioniert werden kann.

Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass die Wirtschaftlichkeit bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ trotz eines extrem hohen energetischen Niveaus erreicht wird, wenn Einsparungen bei den Investitionskosten für die aktive Kühlung und Heizung auftreten. Voraussetzung für diese Einsparungen sind bestimmte Effizienzniveaus bei den Arbeitshilfen, der Beleuchtung und dem Wärmeschutz. Sinnvoll ist es, Planungskenngrößen - so genannte Effizienzkenngrößen - zu definieren, die die erforderlichen Effizienzniveaus abhängig von den jeweiligen gebäudespezifischen Randbedingungen beschreiben. Die Kenngrößen sollten einfach zu ermitteln sein, so dass sie mit geringem Zeitaufwand bereits zu einem frühen Planungszeitpunkt angewendet werden können. Nach ersten Überlegungen kommen zwei Kenngrößen in Betracht:

1. Sommer-Kenngröße: Beschreibt die Effizienz der Arbeitshilfen und der Beleuchtung. Sie quantifiziert, bis zu welchem Wert der internen Wärmequellen auch ohne aktive Kühlung im Sommer komfortable Raumtemperaturen gesichert werden können
2. Winter-Kenngröße: Beschreibt den Wärmeschutz der Gebäudehülle, der erforderlich ist, damit das Gebäude mit dem hygienischen Mindestluftwechsel über die Zuluft beheizt und auf Heizkörper verzichtet werden kann (Luftheizung).

Von den beiden Kenngrößen wird in der vorliegenden Arbeit die Winter-Kenngröße behandelt. Zunächst wird eine Winter-Bedingung definiert und untersucht, ob diese ein energetisch wie ökonomisch sinnvolles Wärmeschutzniveau beschreibt. Hierzu wird der Einfluss des Wärmeschutzes auf die sommerliche Energiebilanz und die Wirtschaftlichkeit dargestellt.

Anschließend wird aus der stationären Wärmebilanz des Gebäudes eine Berechnungsgleichung abgeleitet, die den erforderlichen Wärmeschutz quantitativ beschreibt. Als Kenngröße wird der mittlere U-Wert der Gebäudehülle U_{ges} herangezogen. Die Systematik der Berechnung entspricht weitgehend der DIN 4701 Teil 1.

Der Einfluss unterschiedlicher Gebäudeparameter auf den erforderlichen Wärmeschutz wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse aufgezeigt. Hieraus werden weitere Konsequenzen für die Berechnung abgeleitet.

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen sind vor der Realisierung einer Luftheizung weitere objektbezogene Untersuchungen erforderlich. In der vorliegenden Arbeit werden bereits zwei Fragen in Form von systematischen Betrachtungen behandelt. Untersucht wird die Beheizbarkeit von kritischen Einzelräumen und die Höhe der dynamischen Aufheizlast am Morgen, die sich bei intermittierendem Heizbetrieb ergibt. Zugunsten der Übersicht werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in Abschnitt 5.7 nur zusammengefasst. Sie sind im Anhang ausführlich dokumentiert.

Abschnitt 4

Ziel: Möglichkeiten und Konsequenzen einer hohen energetischen Effizienz verdeutlicht an einem Beispielgebäude

Aufbau:
 Vergleich zweier Ausführungsvarianten eines Beispielgebäudes (min: Standard-Bürogebäude, max: Passiv-Bürogebäude):
 Aussagen zu

- * Primärenergiekennwert und Teilenergiekennwerten
- * Raumkomfort
- * Wirtschaftlichkeit



Weitere Untersuchungen zu Passiv-Bürogebäude

- * Einfluss unterschiedlicher Gebäudeparameter
- * Vergleich mit realisierten Gebäuden

Methodik:

- Dynamische Gebäude- und Anlagensimulation; Ganzjahresbetrachtungen mit Simulationsschrittweite von einer Stunde
- Beispielgebäude aus 4 unterschiedlichen thermischen Zonen
- Abbildung des gesamten Energiebedarfs des Gebäudes
- Ergebnis: Jahresprimärenergiekennwert (Gas und Strom)

4.1.2
 4.1.3
 4.4

Abschnitt 5

Ziel: Erstellen von Planungskenngrößen zur Beschreibung von energetisch und ökonomisch sinnvollen Effizienzstandards

Sommer-Kenngröße
 > max. Wärmestrom aus internen Wärmequellen

Winter-Kenngröße
 > Wärmeschutz der Gebäudehülle

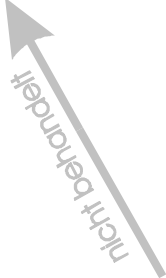
Aufbau:

- * Definieren einer Winter-Kenngröße und Ableiten einer Berechnungsgleichung
- * Sensitivitätsanalyse
- * Hinweise zur Luftheizung bei Bürogebäuden

Methodik:

- Gebäudebezogene Betrachtung
- Stationäre Wärmestrombilanz analog DIN 4701
- 7 Tagemittelwerte für Klima und Nutzung

5.2.2
 5.7.1
 5.7.2



Anhang

A 8
 Detaillierte Beschreibung der Ausführungsvarianten
 * Passiv-Bürogebäude
 * Standard-Bürogebäude

A 9
 Mehrkostenschätzung für Passiv-Bürogebäude

A 10
 Außenluftbedarf in der morgendlichen Spülphase

A 11
 Beheizbarkeit kritischer Einzelräume

A 12
 Dynamische Aufheizlast bei intermittierendem Heizbetrieb
 * gebäudebezogen
 * raumbbezogen

Abb. 3-1: Schematische Darstellung des Aufbaus der vorliegenden Arbeit

4 BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER MÖGLICHKEITEN UND KONSEQUENZEN EINER HOHEN ENERGETISCHEN EFFIZIENZ

In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten und Konsequenzen einer sehr weit reichenden Steigerung der energetischen Effizienz bei Bürogebäuden an einem Beispielgebäude untersucht. Mit Hilfe von theoretischen Berechnungen wird aufgezeigt, welche Energieeinsparung erzielbar ist, wenn alle zu vertretbaren Kosten auf dem Markt verfügbaren Energiesparmaßnahmen umgesetzt werden. Auf diese Weise werden Erkenntnisse darüber gewonnen, bis zu welchem Niveau eine Steigerung der energetischen Effizienz bei Bürogebäuden sinnvoll ist.

Bei Abschnitt 4 handelt es sich in weiten Bereichen um eine Zusammenfassung der Studie [Knissel 1999]. Von den dort untersuchten fünf Ausführungsvarianten werden im Folgenden aus Platzgründen jedoch nur zwei Neubauvarianten vorgestellt und diskutiert.

Aufbau

Nach der Erläuterung der Grundlagen der Berechnungen in Abschnitt 4.1 werden zwei Ausführungsvarianten eines einfachen Beispielgebäudes miteinander verglichen. Die Ausführungsvarianten sind dabei so gewählt, dass sie einen minimalen und einen maximalen Effizienzstandard beschreiben. Sie grenzen damit den Bereich ein, in dem die meisten der heute realisierten Gebäude liegen.

1. Die Variante „Standard-Bürogebäude“ entspricht im Bereich des Baukörpers den Mindestanforderungen der Wärmeschutzverordnung 1995. Maßnahmen zum rationellen Stromverbrauch werden nicht ergriffen. Um den gewünschten Komfort sicherzustellen, ist diese Variante mit einer Klimaanlage ausgerüstet.
2. Die Variante „Passiv-Bürogebäude“ weist in den energierelevanten Punkten die heute auf dem Markt zu vertretbaren Kosten erhältlichen besten Effizienzstandards auf. Die Variante besitzt keine Klimaanlage, sondern ist nur mit einer Lüftungsanlage (Zu- und Abluft) ausgerüstet. Da diese Variante insbesondere im Bereich des Baukörpers eine deutliche Ähnlichkeit zu Passiv-Wohngebäuden aufweist [Feist 1996-1], wird die Bezeichnung „Passiv-Bürogebäude“ gewählt.

Durch den Vergleich der Varianten wird aufgezeigt, wie sich ein hoher Effizienzstandard auf

- den Primärenergiekennwert (Abschnitt 4.2)
- den Raumkomfort (Abschnitt 4.3)
- und die Wirtschaftlichkeit (Abschnitt 4.4)

auswirkt. Anschließend wird die Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ detaillierter untersucht. Im Rahmen einer Parameterstudie wird in Abschnitt 4.5 dargestellt, welche Randbedingungen für die Realisierung energieeffizienter Bürogebäude erforderlich sind bzw. welcher Gestaltungsspielraum bei der Planung verbleibt. Die Plausibilität der Simulationsergebnisse wird überprüft, indem in Abschnitt 4.6 der berechnete Energiebedarf des „Passiv-Bürogebäudes“ mit gemessenen Verbrauchsdaten realer energieeffizienter Gebäude verglichen wird.

Methodik

Die Berechnung des energetischen Gebäudeverhaltens (Temperaturentwicklung und Energiebedarf) geschieht über dynamische Simulationsrechnungen mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TAS. Die Simulationsrechnungen berücksichtigen sowohl den Baukörper, die Nutzung wie auch die HLK-Anlage. Es wird ein Gebäudesimulationsmodell aus vier thermischen Zonen erstellt. In den Simulationsrechnungen wird für jede thermische Zone das energetische Verhalten in Stundenschritten berechnet. Der Simulationszeitraum umfasst dabei ein gesamtes Jahr. Als Klimarandbedingung werden die Stundenwerte des Testreferenzjahres 6 (Frankfurt am Main) verwendet. Auf diese Weise kann der Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen im Bereich von Baukörper, Nutzung und eingesetzter Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Anlage) unter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge erfasst und quantifiziert werden.

Der Energiebedarf des Gebäudes wird in Form von Primärenergiekennwerten angegeben. Auf diese Weise können der Brennstoff- (Gas) und Stromverbrauch mit einer einzigen Größe quantifiziert und unterschiedliche Varianten verglichen werden. Die Bilanzgrenze zur Ermittlung der Primärenergiekennwerte ist in Abb. 4-1 dargestellt.

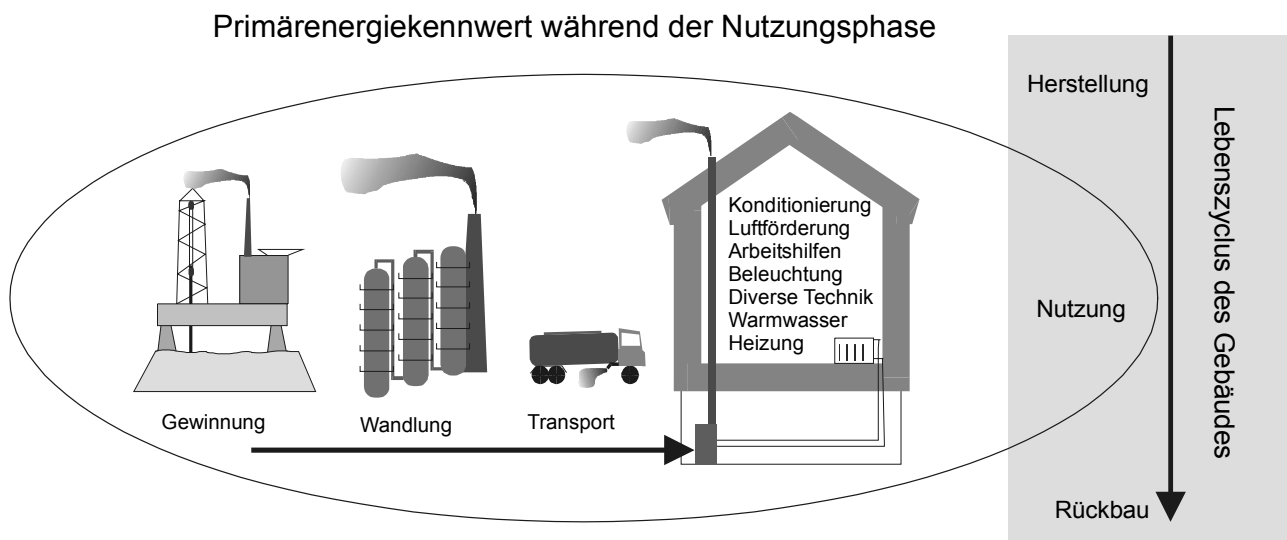


Abb. 4-1: Bilanzgrenze der die in dieser Arbeit angegebenen Primärenergiekennwerte

Der Endenergiebedarf (Brennstoff, Strom) des Gebäudes wird sehr umfassend bestimmt. In der Ergebnisdarstellung wird die Bedarfsstruktur des Gebäudes durch die Ausweisung von Teilenergiekennwerten entsprechend der Systematik der [SIA 380/4] transparent gemacht. Hierdurch wird es möglich, die wesentlichen Verbrauchspositionen zu identifizieren und Maßnahmen zu deren Reduzierung darzustellen. Die bilanzierten Positionen sind in Abb. 4-1 innerhalb der Gebäudeumrisse aufgeführt und in Tab. 4-7 detailliert erläutert.

Aus dem Endenergiebedarf wird der Primärenergiebedarf berechnet. Dieser umfasst zusätzlich den energetischen Aufwand für Gewinnung, Wandlung und Transport, der zur Bereitstellung der Endenergie am Hausanschluss erforderlich ist.

Bezogen auf den Lebenszyklus des Gebäudes konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Analyse der Nutzungsphase des Gebäudes. Dies ist aus zwei Gründen gerechtfertigt.

1. Der Primärenergiebedarf für die Herstellung des Gebäudes wird im Wesentlichen von der Art der Tragkonstruktion bestimmt. Energiesparmaßnahmen beeinflussen diesen Wert nur gering. Zudem liegt das primärenergetische Optimum von Dämmstoffen nach [Feist 1986] bei 30 cm bis 60 cm. Die hier angenommenen hohen Dämmstoffdicken verbessern also die primärenergetische Lebenszyklusbilanz des Gebäudes.
2. Nach [Feist 1996-3] entfallen bei üblichen Neubauten etwa 95 % des über den gesamten Lebenszyklus kumulierten Primärenergiebedarfs auf die Nutzungsphase. Erst wenn hier eine hohe Effizienz erreicht wird (etwa Niveau Passivhaus), ist in einem zweiten Schritt die Optimierung des Primärenergieeinsatzes für Herstellung und Rückbau sinnvoll und erforderlich.

Vereinfachungen

Da Gebäudekonzepte verglichen werden, unterscheiden sich die beiden Ausführungsvarianten in einer großen Anzahl von Parametern (siehe Abschnitt 4.1.2, 4.1.3 und Anhang 8). Trotz dieses bereits sehr differenzierten Gebäudemodells müssen für die Berechnungen eine Reihe von Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. Diese Vereinfachungen schränken die Übertragbarkeit der Ergebnisse ein, so dass für den konkreten Einzelfall gesonderte Untersuchungen erforderlich sind. Für die Berechnungen wird von den folgenden wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen ausgegangen:

- Der nach DIN 1946 erforderliche Mindestaußenluftwechsel reicht aus, um die gewünschte Luftqualität sicherzustellen. Die Luftverunreinigungen durch Bauteile und Einrichtungsgegenstände sind somit per Definition gering, was durch eine entsprechende Produktauswahl realisiert werden kann. In der Realität ist das heute häufig nicht der Fall, so dass höhere Luftwechsel erforderlich werden.
- Die Außenluftversorgung geschieht über die Lüftungsanlage. Fenster werden nicht oder nur in geringem Umfang geöffnet.
- In allen Büros treten die gleichen internen Wärmequellen (Personen, Beleuchtung, Arbeitshilfen) auf. Die in der Praxis vorhandenen Schwankungen werden nicht abgebildet.
- Es wird ein Gebäude mit ausschließlicher Büronutzung betrachtet (Büro, Flur, Nebenräume). In der Realität umfassen Bürogebäude weitere Nutzungen. Insbesondere bei Nutzungen mit hohen internen Wärmequellen (Kantine, Versammlungsraum, Serverraum, ...) sind im Einzelfall gesonderte Lösungen zu finden.
- Es wird eine ideale Regelung der technischen Komponenten entsprechend der definierten Regelstrategie unterstellt. Sollwertabweichungen treten nicht auf.
- Wärmebrücken werden nicht explizit berücksichtigt.

4.1 Grundlagen der Berechnungen

4.1.1 Geometrie des Beispielgebäudes

Die Simulationsrechnungen werden an einem einfachen Bürogebäude durchgeführt. Das betrachtete Gebäude weist einen zweibündigen Rechteckgrundriss mit 5 Geschossen auf (Abb. 4-2). Es hat die Dimension 90 m x 11 m x 16,5 m (L x B x H) mit 4.400 m² Netto-Grundfläche. Die Brutto-Grundfläche beträgt 4.890 m², die Brutto-Geschosshöhe 3,30 m. Das Gebäude ist in Massivbauweise mit Lochfenstern ausgeführt. Nebennutzflächen wie Garderobe, WC, Teeküchen usw. sind in einem zentralen Kernbereich und an den Stirnseiten angeordnet. Der Keller ist unbeheizt.

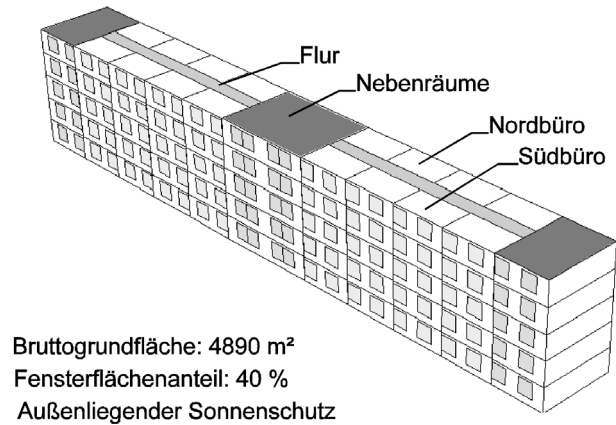


Abb. 4-2: Skizze des Beispielgebäudes

Das Gebäude wird für die dynamischen Simulationsrechnungen in vier thermische Zonen unterteilt: Nord-Büro, Süd-Büro, Flur, Nebenräume. Für jede Zone werden die jeweiligen Komfortanforderungen (Temperatur und Feuchte) und Nutzungsprofile definiert. Die Aufteilung der Büro-, Flur- und Nebenflächen entspricht den in der VDI 3807 angegebenen mittleren Flächenverhältnissen für Verwaltungsgebäude (Tab. 4-1).

Die Büros haben lichte Abmaße von 7,5 m x 4 m x 3 m (L x B x H) und sind mit jeweils zwei Personen besetzt. Der Fensterflächenanteil beträgt 40 % bezogen auf die Innenfläche der Außenwand, bzw. 0,3 m² Fensterfläche pro m² Hauptnutzfläche. Die Verschattung der Fenster erfolgt über einen außen liegenden Sonnenschutz.

Das Gebäude weist eine gute Tageslichtausleuchtung auf. Erreicht wird dies durch sturzfreie Fenster, geringe Raumtiefen von 4 m und einen außen liegenden Sonnenschutz, der auch im geschlossenen Zustand ausreichend Tageslicht in die Büros lässt.

Weitere Einzelheiten zum Baukörper sind im Anhang A-8 dokumentiert.

Brutto-Grundfläche (BGF)	NGF+KF	4890 m ²	100 % _{BGF}
Netto-Grundfläche (NGF)	Büro, Flur, Nebenräume	4400 m ²	90 % _{BGF}
Nebennutzfläche (NNF) + Funktionsfläche (FF)	Nebenräume	1400 m ²	28 % _{BGF}
Verkehrsfläche (VF)	Flur	600 m ²	12 % _{BGF}
Hauptnutzfläche (HNF)	Büro	2400 m ²	50 % _{BGF}
Konstruktionsfläche (KF)		490 m ²	10 % _{BGF}

Tab. 4-1: Flächenanteile im Beispielgebäude

4.1.2 Beschreibung der Variante „Standard-Bürogebäude“

Die Geometrie des „Standard-Bürogebäudes“ entspricht der Beschreibung aus Abschnitt 4.1.1. Für die Definition der Effizienzstandards wurde angenommen, dass in Bezug auf die energie-relevanten Punkte die gesetzlichen Mindestanforderungen eingehalten, darüber hinaus aber keine Maßnahmen zur Energieeinsparung umgesetzt werden. Für Baukörper, Nutzung und HLK-Anlage leiten sich daraus die im Folgenden kurz beschriebenen Ausprägungen ab. Zusammenfassend sind die wesentlichen Gebäudeparameter in Abb. 4-3 sowie in Tab. 4-2 dargestellt (Differenzen zur Variante „Passiv-Bürogebäude“ „fett“ hervorgehoben). Eine ausführliche Dokumentation der Randbedingungen ist im Anhang A-8 zu finden.

Da die Baupraxis sehr vielfältig ist, werden punktuell alternative Ausführungsmöglichkeiten angegeben und deren Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf abgeschätzt.

Baukörper

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle entspricht den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 1995. Die Dämmstoffdicken reichen von 4 cm bei der Kellerdecke bis 12 cm im Dach (jeweils WLG 040). Die Fenster weisen eine einfache Wärmeschutzverglasung auf. Der Fenster U-Wert beträgt $U_F = 1,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Mit der seit dem 1. Februar 2002 in Kraft getretenen Energieeinsparverordnung hat sich der gesetzliche Mindeststandard verbessert. Im Gegensatz zu den angekündigten Einsparungen beim Heizenergiebedarf von 30 % scheint die tatsächliche Reduktion im Mittel eher bei 15 % zu liegen [Loga 2002]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden damit durch den verschärften Mindeststandard nur in geringem Umfang beeinflusst.

Büros, Flure und Nebenräume sind in den Simulationsrechnungen mit einer abgehängten Decke ausgerüstet. Dies ist eine konservative Annahme, da heutzutage immer mehr Gebäude ohne abgehängte Decke realisiert werden.

Nutzung

Die Beleuchtungsanlage ist unter dem Gesichtspunkt geringer Investitionskosten ohne Anforderungen an die Energieeffizienz gewählt. Als mittlere Beleuchtungsstärke in den Büros wird ein Wert von 500 Lux angenommen. Dieser Wert entspricht den voraussichtlichen Grenzwerten des europäischen Normentwurfes für Einzelbüros. Es wird unterstellt, dass die gesamte Bürofläche mit dieser Normbeleuchtungsstärke ausgeleuchtet wird.

Als Arbeitshilfen kommen Kopierer, Fax und Drucker zum Einsatz, deren Stromverbrauch 150 % der Grenzwerte der Gesellschaft Energielabel Deutschland [GED 1998] beträgt. Die GED legt jedes Jahr Grenzwerte für stromsparende Geräte fest. Die Grenzwerte sind so definiert, dass ca. 25 % der auf dem Markt verfügbaren Produkte die jeweiligen Grenzwerte einhalten. Der Stromverbrauch der Computer entspricht den Annahmen der VDI 2078.

HLK-Anlage

Das „Standard-Bürogebäude“ ist mit einer Klimaanlage mit den Luftbehandlungsfunktionen Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten ausgerüstet. Die Kühlung der Büros erfolgt über Kühldecken. Eine schematische Darstellung der HLK-Anlage ist im Anhang A-8.6 zu finden.

Neben der Luftkonditionierung versorgt die Anlage die Büros mit dem aus hygienischen Gründen erforderlichen Mindestluftwechsel (konstanter Volumenstrom). Obwohl heute weitgehend üblich, ist die Lüftungsanlage aus systematischen Gründen (keine Maßnahmen zur Energieeinsparung ergriffen) nicht mit einer Wärmerückgewinnung ausgerüstet.

Die Flure und Nebenräume werden bei der Variante „Standard-Bürogebäude“ wie auch bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ mit Zu- und Abluft versorgt. Alternativ dazu könnte das in Abb. 5-2 aufgezeigte Lüftungskonzept realisiert werden, bei dem die Zuluft in die Büros eingeblasen wird und über die Flure in die Nebenräume strömt, wo Sie von der Lüftungsanlage abgesaugt wird. Würde die gleiche Luftmenge in das Gebäude eingebracht, erhöht sich der Luftwechsel in den Büros von $1,3 \text{ h}^{-1}$ auf $1,7 \text{ h}^{-1}$.

4.1.3 Beschreibung der Variante „Passiv-Bürogebäude“

Bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ wird die energetische Qualität so gewählt, dass in allen Bereichen die heute mit vertretbarem finanziellen Aufwand erreichbare maximale Effizienz umgesetzt wird. Dabei wird weiterhin darauf geachtet, dass nur Produkte eingesetzt werden, die heute bereits auf dem Markt erhältlich sind und dass die gesetzlichen Vorschriften eingehalten werden. Die Geometrie entspricht wie beim „Standard-Bürogebäude“ den Angaben aus Abschnitt 4.1.1.

Baukörper

Der Baukörper weist die bei Passiv-Wohngebäuden üblichen Dämmstoffdicken von 30 cm bis 40 cm auf [Feist 1996-1]. Als Fenster werden 3-fach Wärmeschutzverglasungen in hoch wärmegeprägten Fensterrahmen eingesetzt. Der Fenster-U-Wert beträgt in der Simulation $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Derartige Fenster werden im Folgenden als „Passivhausfenster“ bezeichnet. Auf eine abgehängte Decke wird verzichtet.

Nutzung

Das Beleuchtungskonzept der Büros basiert auf einer Grundausleuchtung der Büros über Deckenleuchten mit einer Beleuchtungsstärke von 220 Lux. Die Normbeleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz von 500 Lux wird durch zusätzliche Arbeitsplatzleuchten realisiert. Die Mitarbeiter können so individuell die Beleuchtungsstärke erhöhen und an die jeweilige Sehaufgabe anpassen. Dieses Konzept entspricht dem europäischen Normentwurf EN-DIN 5035-2; 1996-06 und ist besonders für Bildschirmarbeitsplätze geeignet.

Die Büros sind mit extrem effizienten elektrischen Geräten ausgerüstet. Der Strombedarf von Kopierern, Druckern und Faxgeräten beträgt nur noch 75 % der Grenzwerte der Gemeinschaft Energielabel Deutschland [GED 1998]. Als Computer werden Notebooks eingesetzt. Diese haben bei vergleichbarer Performance einen deutlich geringeren Stromverbrauch, insbesondere für die Bildschirmanzeige.

HLK-Anlage

Die Außenluftversorgung des Gebäudes geschieht über eine Lüftungsanlage (Zu- und Abluft) mit variablem Volumenstrom (Büro: $1,3 \text{ h}^{-1} \leq n \leq 3 \text{ h}^{-1}$). Auf eine aktive Kühlung sowie eine Be- und Entfeuchtung wird verzichtet. Die Lüftungsanlage ist mit einem luftdurchströmten Erdreichwärmetauscher und einem hocheffizienten Rotationswärmetauscher zur Wärme- und Feuchterückgewinnung ausgerüstet. Zu beiden Systemen sollen noch einige Bemerkungen gemacht werden.

Auch wenn bisher noch keine negativen Erfahrungen mit luftdurchströmten Erdreichwärmetauschern bekannt geworden sind, sind hygienische Probleme bei diesem System nicht mit Sicherheit auszuschließen. So fällt insbesondere im Frühjahr Kondensat in den Erdrohren aus, wodurch es bei entsprechenden Wachstumsbedingungen zu einer Verkeimung kommen kann. Aus diesem Grund sollte auf jeden Fall eine Reinigungsmöglichkeit vorgesehen werden (Revisionsöffnungen). Alternativ ist die thermische Nutzung des Erdreiches durch wasserdurchströmte Rohre möglich. Die auf das Wärmeträgermedium übertragene Wärme kann über einen Wärmetauscher im Luftstrom zum Vorheizen oder Vorkühlen der angesaugten Außenluft genutzt werden. Da bei diesem System zwei Wärmeübergänge stattfinden (Erdreich-Fluid + Fluid-Luft), wird eine zusätzliche Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung erforderlich. Diese muss über eine größere Länge des Rohrsystems im Erdreich - und damit eine größere Masse des thermisch nutzbaren Erdreiches - ausgeglichen werden. Zwar tritt auch bei diesem System Kondensat am Wärmetauscher auf und es kann zu einer Verkeimung kommen, Gegenmaßnahmen können hier aber deutlich einfacher ergriffen werden.

Im Simulationsmodell ist ein Rotationswärmetauscher zur Wärme- und Feuchterückgewinnung eingesetzt. Neue Studien u.a. vom Hermann Rietschel Institut [Müller, Fitzner 2001] haben ergeben, dass in Rotationswärmetauschern flüchtige Verbindungen von der Abluft in die Zuluft übertragen werden. Hierdurch kann es zu einer Beeinträchtigung der Luftqualität kommen. Alternativ zum Rotationswärmetauscher können für die Wärmerückgewinnung Plattenwärmetauscher oder Kreislaufverbundsysteme eingesetzt werden. Da in diesem Fall keine Feuchterückgewinnung realisiert werden kann, muss eine aktive Befeuchtung vorgesehen werden, sofern Anforderungen an die Mindest-Feuchte im Winter gestellt werden.

Abb. 4-3 und Tab. 4-3 geben eine zusammenfassende Beschreibung der wichtigsten Gebäudekenndaten. Die Unterschiede zum „Standard-Bürogebäude“ sind in Tab. 4-3 „fett“ hervorgehoben. Ausführlich ist das der Berechnung zugrunde liegende Gebäudemodell im Anhang A-8 dokumentiert. Hier ist auch eine schematische Darstellung der HLK-Anlage zu finden.

Baukörper: Standard-Bürogebäude				
	Außenwand	Dach	Kellerdecke	Fenster
Dämmstoffdicke [cm]	6	12	4	$g_{\perp} = 0,63^*$
U-Wert [W/(m ² K)]	0,54	0,3	0,64	$U_F = 1,8$
Sonnenschutz	Außen liegende Aluminiumlamellen; geschlossen ab 300 Watt pro m ² Fensterfläche und Außentemperaturen über 15 °C			
Luftdichtheit der Gebäudehülle: normal; mittlerer Luftwechsel über Undichtigkeiten $n_{Fugen} = 0,2 \text{ h}^{-1}$				
Zugängliche Speichermassen (abgehängte Decke , leichte Innenwände): Außenwand, Fußboden				
*) zusätzliche Reduktionsfaktoren: Verschmutzung = 0,9; Rahmen = 0,7; Verschattung = 0,88				
Nutzung: Standard-Bürogebäude				
Betriebszeit: Werktags 6.30 bis 20.30 Uhr		Nutzungszeit: Werktags 7.30 bis 18:30 Uhr		
	Raumklima			
	Raumtemperatur in °C min. / max.		Feuchte min. / max.	
	während Betriebszeit	außerhalb Betriebszeit	während Betriebszeit	außerhalb Betriebszeit
Büro	22 26	15	30 % 11,5 g/kg	-
Flur	20 -	15		
Nebenträume	20 -	15		
	Interne Wärmequellen (Maximale Leistung Vollbetriebsstunden)			
	Beleuchtung W/m ² h/a		Arbeitshilfe W/m ² h/a	
	Personen W/m ² h/a		gesamt W/m ² h/a	
Büro	27,1 1650	14,5 1155	5,7 2200	47,3 1560
Flur (innen liegend)	7,3 2750	0 -	0 -	7,3 2750
Nebenträume	7,3 1650	0 -	0 -	7,3 1650
<ul style="list-style-type: none"> • ineffiziente Beleuchtung mit spezifischer Anschlussleistung von 5,4 Watt/(m²·100 Lux); Beleuchtungsstärke 500 Lux; Vollbetriebszeitfaktor nach [LEE 1995] $b_v = 0,6$ • Stromverbrauch der Arbeitshilfen: 150 % der Grenzwerte [GED 1998], Stromverbrauch der Computer entsprechend VDI 2078 • Personenbelegungsdichte: 15 m² pro Person 				
HLK-Anlage: Standard-Bürogebäude				
Heizung:	Gasbrennwertkessel			
Lüftung:	mech. Lüftungsanlage für hygienischen Mindestaußenluftwechsel Ventilatorordruckdifferenz: Abluftseite 300 Pa, Zuluftseite 530 Pa			
Luftwechsel in h ⁻¹		Büro	Flur	Nebenträume
• während Betriebszeit		1,3 + 0,2*	0,4 + 0,2*	0,4 + 0,2*
• außerhalb Betriebszeit (Undichtigkeiten*)		0,2*	0,2*	0,2*
Klima:	Kälte: Kühldecke			
	Entfeuchtung: Entfeuchtungskühler			
	Befeuchtung: Dampfbefeuchter			

Tab. 4-2: Wichtigste Kenndaten des „Standard-Bürogebäudes“ (Unterschiede zum „Passiv-Bürogebäude“ sind „fett“ hervorgehoben)

Baukörper:		Passiv-Bürogebäude				
	Außenwand	Dach	Kellerdecke	Fenster		
Dämmstoffdicke [cm]	30	40	30	$g_{\perp} = 0,49^*$		
U-Wert [W/(m ² K)]	0,13	0,1	0,12	U_F = 0,78		
Sonnenschutz	Außen liegende Aluminiumlamellen; geschlossen ab 300 Watt pro m ² Fensterfläche und Außentemperaturen über 15 °C					
Luftdichtheit der Gebäudehülle: sehr hoch, mittlerer Luftwechsel über Undichtigkeiten $n_{Fugen} = 0,05 \text{ h}^{-1}$ Drucktest: $n_{50} \approx 0,5 \text{ h}^{-1}$						
Zugängliche Speichermassen (leichte Innenwände): Außenwand, Decke , Fußboden						
*) zusätzliche Reduktionsfaktoren: Verschmutzung = 0,9; Rahmen = 0,7; Verschattung = 0,88						
Nutzung:		Passiv-Bürogebäude				
Betriebszeit: Werktags 6.30 bis 20.30 Uhr			Nutzungszeit: Werktags 7.30 bis 18.30 Uhr			
	Raumklima					
	Raumtemperatur in °C min. / max.		Feuchte min. / max.			
	während Betriebszeit	außerhalb Betriebszeit	während Betriebszeit	außerhalb Betriebszeit		
Büro	22 / -	15	-	-		
Flur	20 / -	15	-	-		
Nebenräume	20 / -	15	-	-		
	<u>Interne Wärmequellen</u> (Maximale Leistung Vollbetriebsstunden)					
	Beleuchtung		Arbeitshilfe		Personen gesamt	
	W/m ²	h/a	W/m ²	h/a	W/m ²	h/a
Büro	6,2	740	2,6	1100	5,7	2200
Flur (innen liegend)	1,7	2750	0	-	1,7	2750
Nebenräume	1,7	825	0	-	1,7	825
<ul style="list-style-type: none"> • effiziente Beleuchtung, spezifische Anschlussleistung von 2,5 Watt/(m²·100 Lux), Grundbeleuchtungsstärke von 220 Lux mit Tageslichtsteuerung und Arbeitsplatzleuchten, Vollbetriebszeitfaktor nach [LEE 1995]: $b_v = 0,27$ • Stromverbrauch Arbeitshilfe: 75 % des Grenzwertes [GED 1998], Notebooks als Computer • Personenbelegungsdichte: 15 m² pro Person 						
HLK-Anlage:		Passiv-Bürogebäude				
Heizung:	Gasbrennwertkessel					
Lüftung:	mechanische Lüftungsanlage mit variablem Volumenstrom, Rotationswärme- und feuchtetauscher (therm. 75 % / hygisch. 70 %) Erdreichwärmetauscher: Länge: 2 x 90 m, Durchmesser: 0,8 m, Verlegetiefe: 3 m Ventilatorruckdifferenz: Abluftseite 440 Pa, Zuluftseite 1 170 Pa					
Luftwechsel in h ⁻¹		Büro	Flur	Nebenräume		
• während Betriebszeit		1,3 + 0,05*	0,4 + 0,05*	0,4 + 0,05*		
• außerhalb Betriebszeit (Undichtigkeiten*)		0,05*	0,05*	0,05*		
Klimaanlage: nicht vorhanden						

Tab. 4-3: Wichtigste Kenndaten des „Passiv-Bürogebäudes“ (Unterschiede zum „Standard-Bürogebäude“ sind „fett“ hervorgehoben)

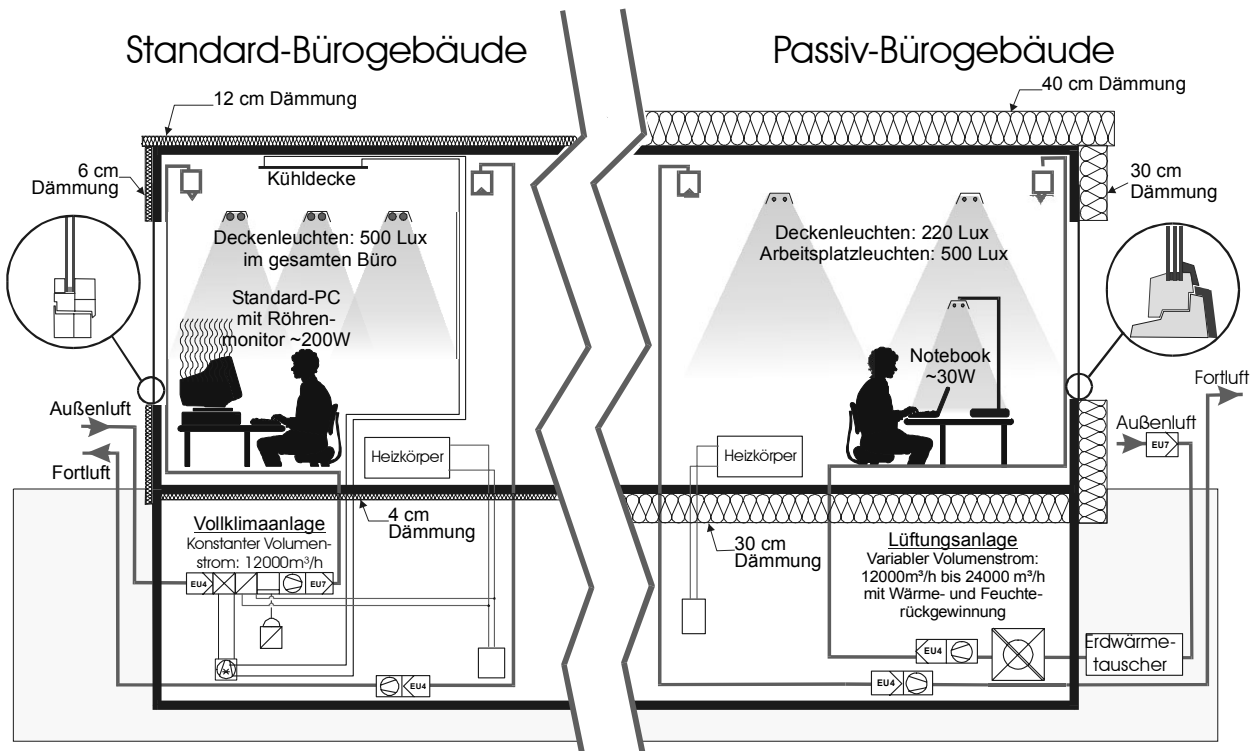


Abb. 4-3: Grafische Darstellung wichtiger energetischer Eigenschaften der beiden untersuchten Ausführungsvarianten

4.1.4 Schematische Darstellung der Wärmeströme

In den dynamischen Simulationsrechnungen wird die Wärmestrombilanz jeder Zone für jede Stunde des Jahres gelöst. Als Grundlage für die Diskussion der energetischen Zusammenhänge werden im Folgenden die Wärmeströme in dem Beispielgebäude dargestellt und benannt. Grundlage ist die Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ mit Zu- und Abluftanlage, Wärmerückgewinnung und Erdreichwärmetauscher. Eine aktive Kühlung bzw. Be- oder Entfeuchtung ist bei dieser Variante nicht vorgesehen. Die Beheizung erfolgt in den Simulationsrechnungen von Abschnitt 4 im Unterschied zu Abschnitt 5 nicht über die Zuluft (Luftheizung), sondern über Heizkörper.

Die dem Gebäude zugeführten Wärmeströme werden als Gewinne, die abgeführten Wärmeströme als Verluste bezeichnet. Es wird folgende Vorzeichenkonvention festgelegt:

Beschreibung	Bewertung	Vorzeichen
dem Gebäude zugeführter Wärmestrom	Gewinne	positiv
aus dem Gebäude abgeführter Wärmestrom	Verluste	negativ

Tab. 4-4: Vorzeichenkonvention bei der Angabe von Wärmeströmen

Abb. 4-4 zeigt die in dem Gebäude auftretenden Wärmeströme.

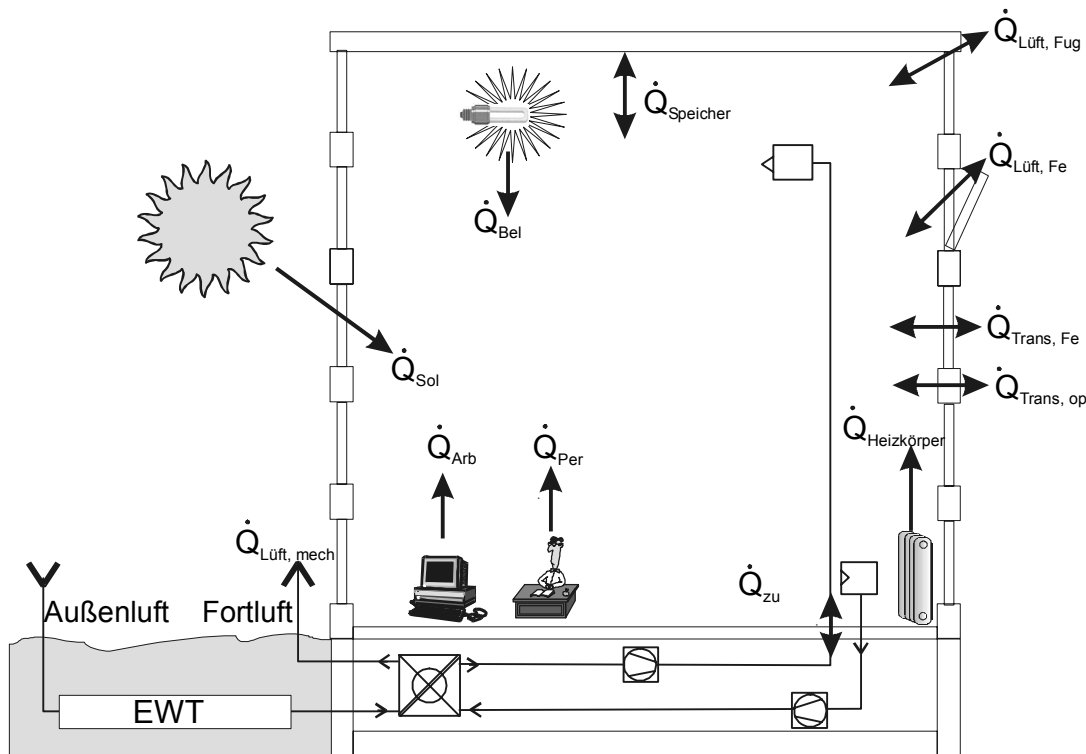


Abb. 4-4: Schematische Darstellung der Wärmeströme in einem Bürogebäude

Die einzelnen Größen werden dabei wie folgt bezeichnet:

\dot{Q}_{Sol}	Wärmestrom durch solare Einträge
\dot{Q}_{Per}	Wärmestrom durch Abwärme der Personen
\dot{Q}_{Bel}	Wärmestrom durch Abwärme der Beleuchtung
\dot{Q}_{Arb}	Wärmestrom durch Abwärme der EDV-Arbeitshilfen
$\dot{Q}_{Speicher}$	Wärmestrom zwischen Raumluft und Speichermassen durch Aus- oder Einschervorgänge
$\dot{Q}_{Trans, Fe}$	Wärmestrom durch Transmission über Fenster
$\dot{Q}_{Trans, op}$	Wärmestrom durch Transmission über opake Bauteile
$\dot{Q}_{Lüft, Fug}$	Wärmestrom durch Luftwechsel über Fugen und Undichtigkeiten
$\dot{Q}_{Lüft, Fe}$	Wärmestrom durch Luftwechsel über geöffnete Fenster
$\dot{Q}_{Lüft, mech}$	Wärmestrom durch Luftwechsel über mechanische Lüftungsanlage (Wärmerückgewinnung berücksichtigt)
$\dot{Q}_{Heizkörper}$	von Heizkörpern abgegebener Wärmestrom
\dot{Q}_{Zu}	über die Zuluft dem beheizten Gebäudevolumen zugeführter (Heizfall) oder abgeführter (freie Kühlung im Sommer) Wärmestrom.

Für die weitere Berechnung werden die Wärmeströme wie folgt zusammengefasst:

$$\text{Gl. 4-1} \quad \dot{Q}_{\text{int}} = \dot{Q}_{\text{Per}} + \dot{Q}_{\text{Bel}} + \dot{Q}_{\text{Arb}},$$

$$\text{Gl. 4-2} \quad \dot{Q}_{\text{Trans}} = \dot{Q}_{\text{Trans,Fe}} + \dot{Q}_{\text{Trans,op}},$$

$$\text{Gl. 4-3} \quad \dot{Q}_{\text{Lüft,Geb}} = \dot{Q}_{\text{Lüft,Fe}} + \dot{Q}_{\text{Lüft,Fug}},$$

$$\text{Gl. 4-4} \quad \dot{Q}_{\text{Lüft}} = \dot{Q}_{\text{Lüft,mech}} + \dot{Q}_{\text{Lüft,Fe}} + \dot{Q}_{\text{Lüft,Fug}}$$

mit

\dot{Q}_{int} Wärmestrom durch interne Wärmequellen

\dot{Q}_{Trans} Wärmestrom durch Transmission über die Gebäudehülle

$\dot{Q}_{\text{Lüft,Geb}}$ Wärmestrom durch Luftwechsel über Fenster, Fugen und Undichtheiten

$\dot{Q}_{\text{Lüft}}$ Wärmestrom durch Luftwechsel über die mechanische Lüftungsanlage, Fenster, Fugen und Undichtheiten.

In VDI 4661 wird darauf hingewiesen, dass es Unterschiede in der Begrifflichkeit zwischen der naturwissenschaftlichen (thermodynamischen), ingenieurmäßigen und ökonomischen Betrachtung gibt. Zum besseren Verständnis sind in Tab. 4-5 häufig verwendete Begriffe präzisiert.

Heizwärme	über das Heizsystem dem beheizten Gebäudevolumen in einem Zeitraum zugeführte Wärme
Heizlast	vom Gebäude zum Einhalten der Solltemperatur benötigter Heizwärmestrom
Heizleistung	über die Heizung dem beheizten Gebäudevolumen zugeführter Heizwärmestrom
Verluste	aus dem beheizten Gebäudevolumen abgeführter Wärmestrom
Gewinne	dem beheizten Gebäudevolumen zugeführter Wärmestrom

Tab. 4-5: Präzisierung von in der Studie häufig verwendeten Begriffen

4.1.5 Definition der verwendeten Primärenergiekennwerte

Der Vergleich der Ausführungsvarianten geschieht über Energiekennwerte.

Energiekennwert = Energiebedarf/beheizte Brutto-Grundfläche.

Die Definition der Brutto-Grundfläche entspricht dabei den Vorgaben der VDI 3807, Blatt 1. Zum Umrechnen der in der Simulation verwendeten Netto-Grundfläche auf die Brutto-Grundfläche wird der in der [SIA 380/4] angegebene Faktor von 0,9 verwendet. Dieser steht in guter Übereinstimmung mit dem in der VDI 3807 Teil 1 angegebenen Wert von 0,87.

$$\text{Gl. 4-5} \quad A_{NGF} = A_{BGF} \cdot 0,9$$

mit

A_{NGF} beheizte Netto-Grundfläche nach DIN 277 Teil 1

A_{BGF} beheizte Brutto-Grundfläche DIN 277 Teil 1.

Der Energiebedarf der Ausführungsvarianten wird auf Primärenergieebene angegeben, da so der Brennstoff- und der Strombedarf gemeinsam bewertet und in einer Zahl dargestellt werden können. Primärenergiekennwerte umfassen neben dem Endenergiebedarf den gesamten energetischen Aufwand zur Bereitstellung des Brennstoffs oder des Stroms in dem Gebäude. Berücksichtigt wird dabei der Energieverbrauch für Gewinnung, Wandlung und Transport. Dies ist insbesondere bei Strom von Bedeutung, da dieser mit relativ hohen Verlusten (etwa 60 %) in Kraftwerken aus Brennstoffen wie z. B. Kohle, Gas, ... gewandelt werden muss. Eine Kilowattstunde Strom entspricht deswegen etwa drei Kilowattstunden an Primärenergie.

Berechnet werden die Primärenergiekennwerte durch Multiplikation der Endenergiekennwerte mit Primärenergiefaktoren. Die hier verwendeten Faktoren sind in Tab. 4-6 dargestellt. Sie wurden mit dem Programm Gemis 3.01 [Gemis] bestimmt.

Die Definition der nachfolgenden Kennwerte richtet sich nach der in der Schweiz üblichen Systematik der SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau. In Deutschland wurde diese Systematik durch den [LEE 1995] und [IPH] eingeführt. Sie wurde u. a. bei den Bundesbauvorhaben in Berlin angewendet [Römmling 1999]. Entsprechend

dieser Systematik werden die einzelnen Endenergieverbraucher zu Energiedienstleistungssystemen zusammengefasst, für die Teilenergiekennwerte definiert werden. Aus der Summe der Teilenergiekennwerte ergibt sich der Gebäude-Energiekennwert.

Energieträger	Primärenergiefaktor kWh _{Prim} /kWh _{End}
Erdgas	$Pf_{Gas} = 1,07$
Strom-Mix	$Pf_{Strom} = 2,97$

**Tab. 4-6: Primärenergiefaktoren
[Gemis 3.01]**

Die Definition der Teilenergiekennwerte sind in Tab. 4-7 zusammenfassend dargestellt. Es wird angegeben, ob der jeweilige Energiebedarf sich aus der Simulationsrechnung ergibt oder wie er bestimmt wird (da die definierten Formelzeichen nur in dieser Tabelle verwendet werden, sind sie nicht im Formelverzeichnis aufgeführt).

Energiedienstleistungs-system	Verbraucher	Berechnungsmethode	Bemerkung / Quelle
Heizung	p_H		Simulationsergebnis
Warmwasser	p_{WW}	$5,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \cdot P_{f_{\text{Gas}}}$	[SIA 380/1, D1-1]
Diverse Technik	p_{DT}	$p_{DT,H} = (p_H + p_{WW}) \cdot 0,01$ $p_{DT,T} = 2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \cdot P_{f_{\text{Strom}}}$	sehr guter Wert nach [SIA 380/4 1992] nach [SIA 380/4 1992]
	$p_{DT,V}$	$p_{DT,V} = (p_{DT} + p_{AL} + p_{KO} + p_{BL} + p_{ZD}) \cdot 0,025$	nach [SIA 380/4 1992]
	$p_{DT,K}$	$p_{DT,K} = 3,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \cdot P_{f_{\text{Strom}}}$	konstant nach [SIA 380/4 1992, Beispiel]
			Simulationsrandbedingung
Beleuchtung	p_{BL}		Simulationsrandbedingung
Arbeitshilfen	p_{AH}		Simulationsergebnis
Außenluftzufuhr	p_{AL}	$p_{AL,H} = P_{\text{max},V,AL} \cdot 0,03 \cdot P_{f_{\text{Strom}}}$ $P_{\text{max},V,AL}$: max. Ventilatorleistung zur hygienischen Mindestluftförderung	nach [SIA 380/4 1992]
Raumkonditionierung	p_{KO}		Simulationsergebnis
		Lufförderung freie Kühlung, Nachtlüftung	nach [SIA 380/4 1992]
		Hilfsbetriebe, Bereitschaftsverbrauch	$p_{KO,H} = P_{\text{max},V,KO} \cdot 0,03 \cdot P_{f_{\text{Strom}}}$ $P_{\text{max},V,KO}$: max. Ventilatorleistung zur Luftförderung für Kühlung
		Wasserförderung	$p_{KO,W} = p_{KO,K} \cdot 0,01 \cdot P_{f_{\text{Strom}}}$
		Kälteerzeugung	abweichend von [SIA 380/4 1992]; analog $p_{DT,H}$
		Befeuchtung Entfeuchtung	Simulationsergebnis Simulationsergebnis
Zentrale Dienste	p_{ZD}	EDV-Zentrale, etc.	Simulationsergebnis nicht implementiert

Tab. 4-7: Definition und Bezeichnung der verwendeten Primärenergiekennwerte

4.1.6 Gebäudesimulationsprogramm TAS

Die dynamischen Simulationsrechnungen in diesem Abschnitt werden mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TAS durchgeführt. Das Programm TAS ermöglicht die gekoppelte Simulation von Gebäude und Anlagentechnik. Die bei der Gebäudesimulation von TAS verwendeten physikalischen Modelle sind in [Kamps 1996] dokumentiert. Eine stichwortartige Zusammenstellung der physikalischen Modelle ist in Tab. 4-8 zu finden.

In [Knissel 1998] wird die Validität des Simulationsprogramms TAS (Version 8.0) überprüft. Hierzu werden theoretische Berechnungsergebnisse mit unter gleichen Randbedingungen ermittelten Messdaten aus dem Passivhaus Darmstadt-Kranichstein verglichen. Abb. 4-5 zeigt die gemessenen und die berechneten Raumlufttemperaturen für drei nach Süden orientierte Räume (durch die speziellen Randbedingungen, d. h. abgeschaltete Lüftungsanlage, geöffneter Sonnenschutz und gelegentliches Heizen während einer Hitzeperiode, ergeben sich für Passivhäuser untypisch hohe Raumlufttemperaturen). Die Linien entsprechen den berechneten Temperaturen, die Symbole stellen die Messwerte dar.

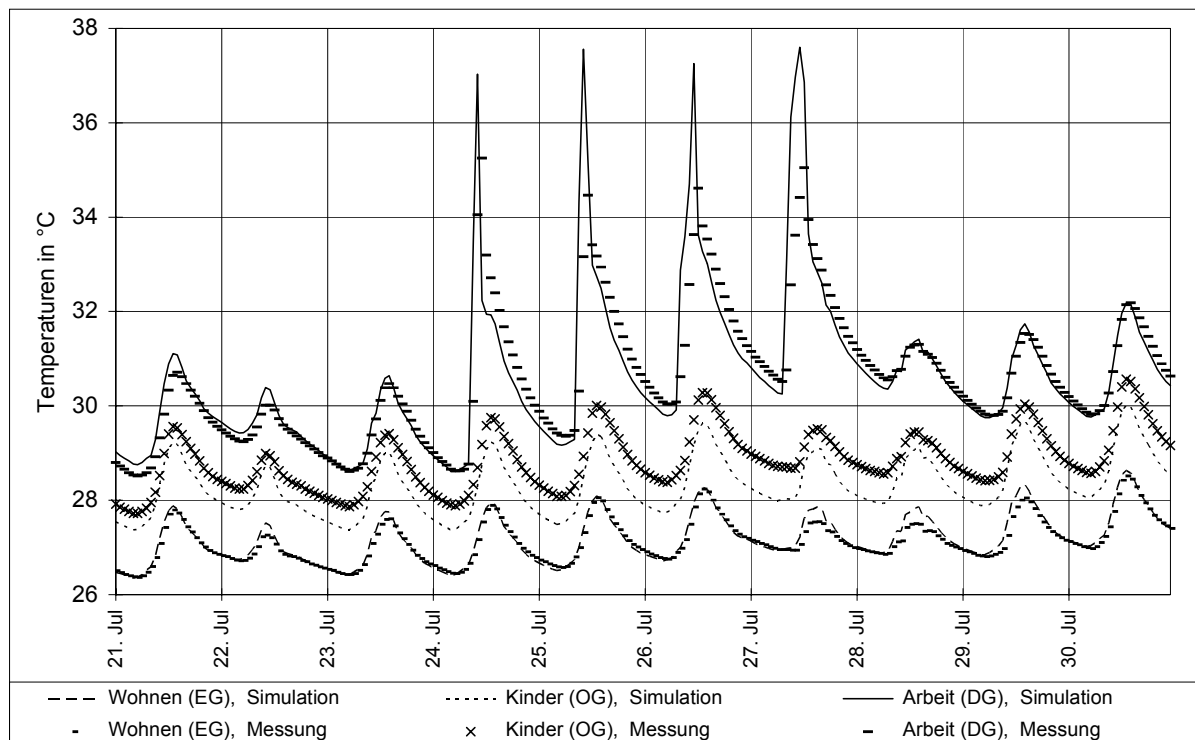


Abb. 4-5: Vergleich von gemessene und simulierten Raumlufttemperaturen

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen. Sowohl der berechnete zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung wie auch das Temperaturniveau stimmen weitgehend mit den gemessenen Werten überein. Vor dem Hintergrund der Mess- und Eingabeungenauigkeiten kann festgestellt werden, dass die im Programm TAS verwendeten physikalischen Modelle in der Lage sind, das thermische Verhalten des Gebäudes realitätsnah abzubilden.

Nr.	TAS - THERMAL ANALYSIS SOFTWARE (VERSION 8.0)	
1	Modelltyp	dynamisches Mehrzonen-Mehrknotten-Netzwerk-Modell integrierte Module: 3D-TAS, A-TAS, B-TAS
2	Gebäudemodell	gekoppelte Zonenmodelle nach Nr. 3; Kopplung durch Luftbewegung zwischen Zonen, Strahlung durch transparente Bauteile und dynamische Wärmeleitung durch Wände
	Maximalzahl Zonen	60
3	Zonenmodell	ein Raumlufknoten pro Zone (Unterteilung des Raumes in mehrere Zonen möglich), je Oberfläche ein Knoten, getrennte Betrachtung von Strahlung (thermisch, solar) und Konvektion
	Maximalzahl Flächen	120
4	Langwelliger Strahlungsaustausch im Raum	Strahlungsaustausch aller Innenoberflächen nach MRT-Methode, Wichtung der Formfaktoren nach Flächeninhalt, Temperaturabhängigkeit nach linearisiertem <i>Stefan-Boltzmann</i> Gesetz
5	Konvektiver Wärmeübergang im Raum	Annahme freier Konvektion, empirische Ansätze für den Konvektionskoeffizienten in Abhängigkeit von Oberflächenausrichtung (vertikal / horizontal / geneigt), Temperaturdifferenz und Richtung des Wärmestromes (siehe Anhang A-12.7)
6	Fenstermodell Thermisch	Temperaturknoten an Innen- und Außenoberflächen der Verglasung (ohne Kapazität), Wärmeübertragung berechnet aus den thermischen Widerständen der einzelnen Schichten, (Leitung im Glas sowie Konvektion (konstant) und langwellige Strahlung im SZR)
	Kurzwellige Strahlung	Transmission und Scheibenabsorption direkter Sonneneinstrahlung nach <i>Fresnel</i> (abhängig vom Einfallswinkel), diffuser Himmels- und Bodenstrahlung sowie diffuser Rückstrahlung mit Betrachtung der Mehrfachreflexionen
7	Kurzwellige Strahlung im Raum	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlverfolgung der direkten Strahlung über transparente Elemente durch bis zu 4 Zonen möglich • Verteilung diffuser Strahlung mittels Formfaktoren, diffuse Reflexion an Innenoberflächen
8	Wandmodell	eindimensionale dynamische Wärmeleitung nach Response-Faktoren Methode
	Maximalzahl Schichten	12
9	Lüftungsmodell <u>Infiltration</u> bzw. <u>Fensterlüftung</u>	<ul style="list-style-type: none"> • pauschal über Luftwechselzahlen, optional mit linearer Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit • detailliert mit Gebäudedurchströmungsmodul, berücksichtigt Art und Lage der Lüftungsöffnungen, thermischen Auftriebskräfte, Strömungswiderstände im Gebäude und der Druckverteilung auf den Fassaden
	<u>mechanische</u> <u>Luftwechsel</u>	<ul style="list-style-type: none"> • pauschal über Luftwechselzahlen • detailliert über Simulation der konkreten Lüftungs- und Klimaanlage in B-TAS

10	Wandaußen- oberflächen Konvektion	empirischer Ansatz mit Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit
	Langwelliger Strahlungsaustausch	Oberflächen im Strahlungsaustausch mit Himmel und Boden, empirische Ansätze für Himmels- und Bodenstrahlung, Emissionen nach linearisiertem <i>Stefan-Boltzmann</i> Gesetz
	Kurzwellige Strah- lungsabsorption	konstanter isotroper Absorptionskoeffizient des opaken Materials (benutzerdefiniert), Verschattung direkter Strahlung durch Umgebung
11	Klimadaten	Einlesen stündlicher Daten aus einem Klimadatensatz (Testreferenzjahr, Messdaten, benutzerdefiniert) <ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur, • relative Luftfeuchte, • Globalstrahlung, • Diffusstrahlung, • Bewölkungsgrad, • Windgeschwindigkeit, • Windrichtung
12	Verschattungs- elemente für Solarstrahlung	<ul style="list-style-type: none"> • Eingensverschattung oder Verschattung durch Nachbargebäude über integrierte Schattenberechnung (Direktstrahlung). • Sonnenschutz als Konstruktionselemente; Steuerung über Zeitprogramm oder beliebiges Eingabefile (0,1), • Laibungen oder Überhänge durch orthogonale Rechtecke
13	Interne Wärmequellen	Personen und elektr. Geräte mit Unterteilung in sensible und latente Wärme, Beleuchtung, Heizung, Kühlung; jeweils Strahlungsanteil und Sichtfaktor zuweisbar
14	Heizsystem	<ul style="list-style-type: none"> • raumseitig: Angabe maximaler Leistung, Regelung nach Raumtemperaturen, Strahlungsanteil und Sichtfaktor zuweisbar; • anlagenseitig: Definition von Mehrkesselanlagen über Teillastkennlinie, Stillstandsverluste und Verteilungsverluste
15	Mathematische Lösungsverfahren Wandmodell	eindimensional nach Response-Faktoren Methode
	Raummodell	Bilanzierung der Innen- und Außenoberflächen-, MRT- und Raumlufknoten, Schrittweite 1h, iterative Lösung der Gesamtbilanz in Matrizenform
	Gebäudemodell	iterativ, zonenweise, Schrittweite 1h

Tab. 4-8: Stichwortartige Zusammenstellung der vom Simulationsprogramm TAS für die Gebäudesimulation verwendete Berechnungsansätze (aufbauend auf [Kamps 1996])

4.1.7 Modellieren des Erdreichwärmetauschers in den Simulationsrechnungen

Bei der dynamischen Simulation der Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ muss das Betriebsverhalten eines Erdreichwärmetauschers (EWT) abgebildet werden. In Ergänzung zu den in [Pfafterot 1998] vorgestellten Ansätzen wird hierzu in [Knissel 1999-2] die so genannte Konzentrationsfaktormethode entwickelt und mit Messdaten verglichen. Diese ermöglicht die gekoppelte Berechnung des Betriebsverhaltens des EWT, der nachgeschalteten Lüftungsanlage und des zu versorgenden Gebäudes mit herkömmlichen Gebäudesimulationsprogrammen.

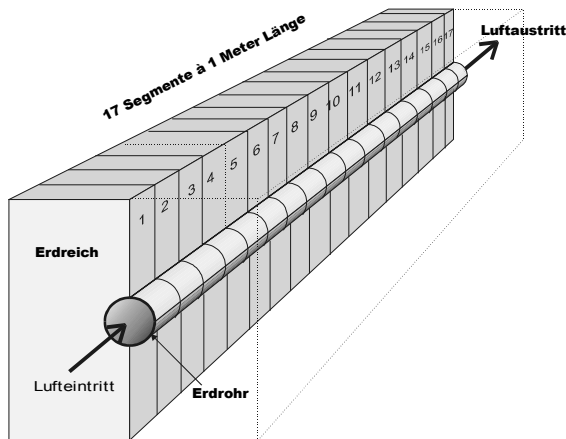


Abb. 4-6: Kaskadenmodell des Erdreichwärmetauschers

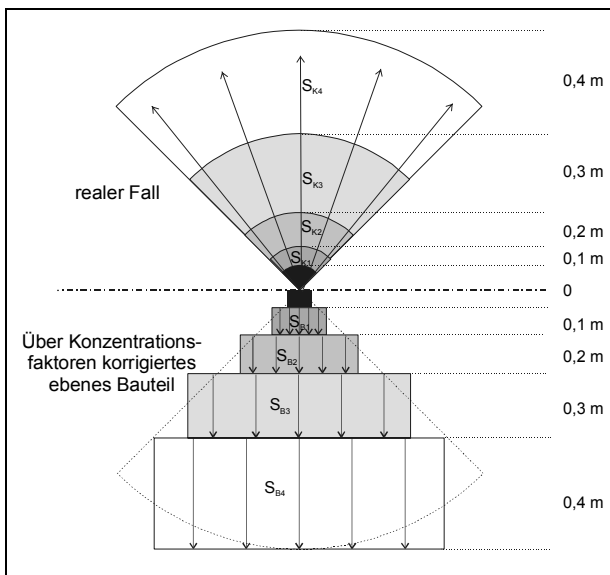


Abb. 4-7: Schematische Darstellung der Konzentrationsfaktormethode (S_X = Erdreich- bzw. Bauteilschicht X)

Zur Berechnung wird das Erdrohr in mehrere Segmente unterteilt (Abb. 4-6). Jedes Segment wird, wie in der Gebäudesimulation üblich, als Raummodell abgebildet. Das Luftvolumen der Räume entspricht dabei dem Erdkanal, die Raumumschließungsflächen (Wand, Decke, Boden) dem umgebenden Erdreich. Für jede Raumumschließungsfläche wird im Rahmen der Simulation das dynamische Temperaturverhalten bestimmt.

Ein derartig einfacher Modellansatz führt nur zu akzeptablen Ergebnissen, wenn bei der Abbildung des Erdreiches (Raumumschließungsflächen) die Zunahme von Speicherkapazität und Wärmeleitwert in radialer Richtung berücksichtigt wird. Hierzu wird die spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten mit so genannten Konzentrationsfaktoren korrigiert. Das sich hierdurch ergebende Modell des Erdreiches zeigt Abb. 4-7 für ein mehrschichtiges Bauteil.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten zeigt gute Übereinstimmung. Es kann angenommen werden, dass die Konzentrationsfaktormethode das Betriebsverhalten des Erdreichwärmetauschers für den hier untersuchten Fall hinreichend genau abbildet. Weitere Untersuchungen sind wünschenswert.

4.1.8 Klimarandbedingung

Die Simulationsrechnungen werden mit dem Testreferenzjahr TRY 6 (Frankfurt am Main) durchgeführt. Die Testreferenzjahre sind speziell für die Gebäude- und Anlagensimulation entwickelt. Sie bestehen aus stündlichen Werten, über die charakteristische Klimaverläufe für unterschiedliche Regionen in Deutschland beschrieben werden. Das Programm TAS verwendet für die Simulationsrechnungen folgende Größen:

- Lufttemperatur
- relative Feuchte
- Globalstrahlung
- Diffusstrahlung
- Bewölkungsgrad
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung.

4.2 Primärenergieeinsparung

Für die in Abschnitt 4.1.2 und 4.1.3 beschriebenen beiden Ausführungsvarianten des Beispielgebäudes (Abschnitt 4.1.1) wird mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen und einfachen Abschätzverfahren (Tab. 4-7) der Primärenergiebedarf berechnet. Den Primärenergiekennwert für beide Ausführungsvarianten sowie die Aufteilung auf die entsprechenden Teilenergiekennwerte zeigt Abb. 4-8.

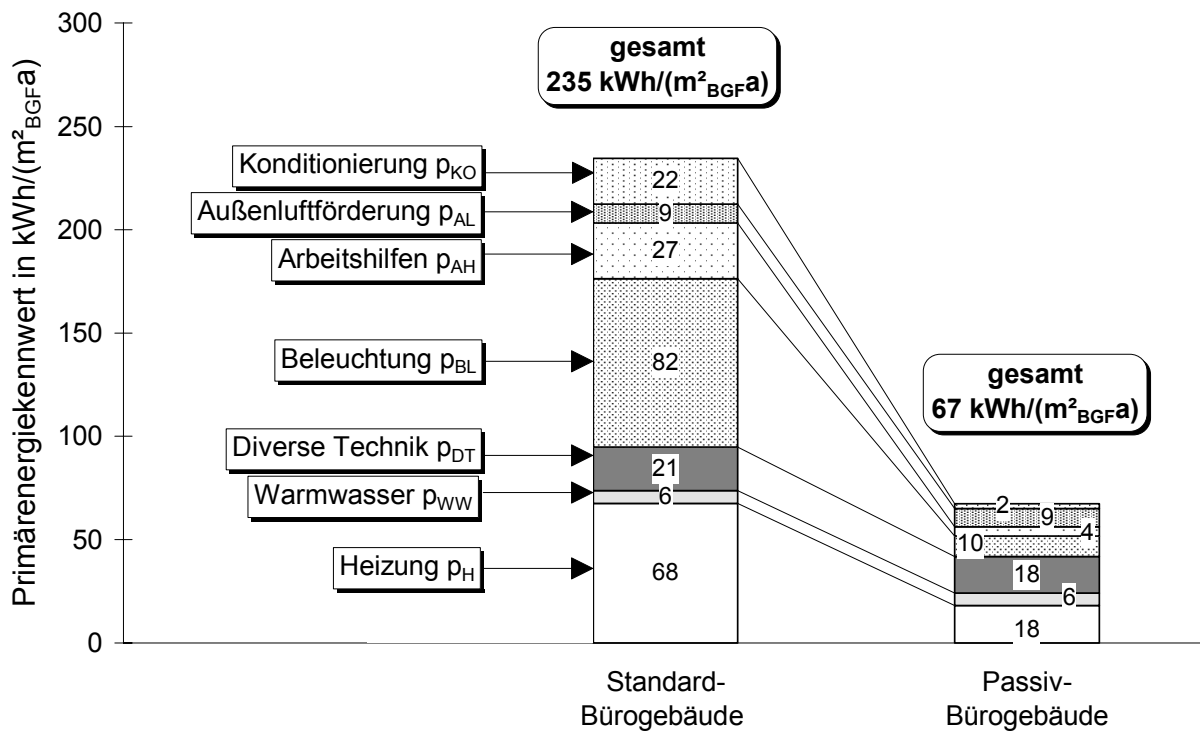


Abb. 4-8: Primärenergiekennwerte für das „Standard-„ und das „Passiv-Bürogebäude“ (Variantenbeschreibung: Tab. 4-2 und Tab. 4-3)

Der Primärenergiebedarf kann für das untersuchte Beispielgebäude von 235 kWh/(m²_{BGFa}) auf 67 kWh/(m²_{BGFa}) gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion von etwa 70 %. Im Folgenden wird kurz skizziert, wie die Einsparungen erreicht werden. Eine ausführliche Darstellung und die Untersuchung weiterer Ausführungsvarianten findet sich in [Knissel 1999].

Heizung

Der Primärenergiebedarf zur Beheizung des „Passiv-Bürogebäudes“ beträgt nur noch 18 kWh/(m²_{BGFa}). Ein derart niedriger Wert wird durch den Einbau von Dämmstoffdicken zwischen 30 cm bis 40 cm, die Verwendung von 3-fach Wärmeschutzverglasung und eine Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung und vorgeschaltetem Erdreichwärmetauscher erreicht. Erforderlich ist zudem eine hohe Dichtheit der Gebäudehülle und die Vermeidung von Wärmebrücken. Diese Konstruktionsmerkmale entsprechen weitgehend den in [Feist1996-1] für Wohngebäude beschriebenen Anforderungen an ein Passivhaus. Gegenüber dem „Standard-Bürogebäude“ reduziert sich der Primärenergiekennwert Heizung um ca. 80 %.

Warmwasser

Der Warmwasserbedarf wird an dieser Stelle nicht weiter untersucht, da er in Bürogebäuden eine untergeordnete Rolle spielt. Für beide Varianten wird ein konstanter Wert von $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ angenommen. In konkreten Projekten sollte untersucht werden, ob auf eine Warmwasserversorgung komplett verzichtet oder der Energiebedarf über eine thermische Solaranlage reduziert werden kann.

Diverse Technik

Auch diese Verbrauchsposition wird nicht weiter optimiert. Die leichte Reduktion ergibt sich durch einen geringeren Stromverbrauch der Heizungsumwälzpumpen sowie die Reduktion der elektrischen Verluste in den Transformatoren und Stromleitungen. Während die Position „Diverse Technik“ beim „Standard-Bürogebäude“ noch eine untergeordnete Bedeutung hat, nimmt sie beim „Passiv-Bürogebäude“ mit einem Anteil von über 25 % am gesamten Primärenergiekennwert eine relevante Größenordnung an. Bei der Umsetzung konkreter Bauprojekte sollte auch dieser Bereich unter Energiegesichtspunkten optimiert werden. So kann der Stromverbrauch der Aufzüge beispielsweise reduziert werden, indem ein einladendes zentral gelegenes Treppenhaus vorgesehen wird.

Beleuchtung

Im Bereich der Beleuchtung werden etwa 50 % der gesamten Primärenergieeinsparung realisiert. Erzielt wird der geringe Primärenergiebedarf zum einen durch den Einsatz eines effizienten Beleuchtungssystems. Es kommen hochglanz-eloxierte Spiegelrasterleuchten mit elektronischem Vorschaltgerät und Leuchtstofflampen in Stabform zum Einsatz. Eine Beleuchtungssteuerung schaltet die Lampen beim Überschreiten der Normbeleuchtungsstärke aus.

Zum anderen werden Einsparungen über eine Zonierung der Beleuchtungsstärke erreicht [Hofmann 1998]. Während im „Standard-Bürogebäude“ die gesamte Bürofläche mit 500 Lux ausgeleuchtet wird, ist in den Büros des „Passiv-Bürogebäudes“ lediglich eine Grundausleuchtung mit 220 Lux vorgesehen. Die auf der Arbeitsfläche erforderliche Beleuchtungsstärke von 500 Lux können die Mitarbeiter je nach individuellen Erfordernissen über Arbeitsplatzleuchten realisieren. Mit einer derartigen Zonierung können sowohl der Strombedarf als auch die Investitionskosten gesenkt werden. Ein solches Konzept geht konform mit den Vorgaben des europäischen Normentwurfs E-DIN 5034-2; 1996-06, und ist besonders für Bildschirmarbeitsplätze geeignet [IPH 1998].

Arbeitshilfen

Als Computer werden im „Passiv-Bürogebäude“ Notebooks eingesetzt. Diese haben wegen des LCD-Bildschirmes und der eingesetzten effizienten Komponenten einen geringen Stromverbrauch. Aber auch die anderen elektronischen Bürogeräte weisen eine hohe Energieeffizienz auf. Für Kopierer, Drucker und Fax wird ein Stromverbrauch angenommen, der 75 % der GED-Grenzwerte von 1998 [GED 1998] entspricht (siehe Abschnitt 4.1.2). Durch den Einsatz dieser stromsparenden Geräte kann der Primärenergiekennwert von $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ auf $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ reduziert werden.

Außenluftförderung

Der Primärenergieaufwand zur Außenluftförderung unterscheidet sich zwischen den beiden Varianten nur wenig. Zwar entfallen beim „Passiv-Bürogebäude“ die Strömungswiderstände der Heiz- und Kühlregister, es kommen aber mit dem Erdreichwärmetauscher und der Wärmerückgewinnung neue Strömungswiderstände hinzu. Entscheidenden Einfluss auf den Stromverbrauch der Ventilatoren hat im vorliegenden Fall die Dimensionierung der Lüftungstechnischen Komponenten. Die Konstantvolumenstromanlage des „Standard-Bürogebäudes“ ist auf den Luftwechsel in den Büros von $n = 1,3 \text{ h}^{-1}$ ausgelegt. Im „Passiv-Bürogebäude“ sind die Lüftungstechnischen Komponenten entsprechend dem maximal möglichen 3-fachen Luftwechsel (Büros) größer dimensioniert. Da aber auch im „Passiv-Bürogebäude“ in der Regel nur der Mindestluftwechsel von $n = 1,3 \text{ h}^{-1}$ gefördert wird, läuft diese Anlage überwiegend im Teillastbetrieb. Hieraus resultieren geringe Strömungsgeschwindigkeiten, was sich positiv auf den Stromverbrauch der Ventilatoren auswirkt.

Konditionierung

Im „Standard-Bürogebäude“ ist ein Primärenergieaufwand von $23 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$ zur Be- und Entfeuchtung sowie zur aktiven Kühlung der Raumluft in den Büros erforderlich. Im „Passiv-Bürogebäude“ kann auf diese Luftbehandlungsfunktionen verzichtet werden, da hier der Raumkomfort auch ohne diese Maßnahmen weitgehend im gewünschten Bereich bleibt (siehe Abschnitt 4.3). Die statt der Dampfbefeuchtung eingesetzte Feuchterückgewinnung erzeugt keinen zusätzlichen Energiebedarf, da der Druckverlust des Rotationswärmetauschers bereits unter der Position Außenluftförderung berücksichtigt ist. Trotz des Verzichts auf eine Klimatisierung ist der Primärenergiekennwert Konditionierung beim „Passiv-Bürogebäude“ nicht Null, da unter dieser Position auch der Aufwand zur Nachlüftung und freien Kühlung verbucht wird.

Die Entlastung der Umwelt von CO_2 -Emissionen sowie anderen klimarelevanten Gasen wie z. B. Methan, Lachgas kann über das CO_2 -Äquivalent bewertet werden. Hierbei wird die Schädlichkeit aller klimarelevanten Gase auf die Schädlichkeit von CO_2 umgerechnet. Durch Summenbildung ergibt sich eine CO_2 -Emission, die in Bezug auf den Treibhauseffekt der Wirkung aller klimarelevanten Gase entspricht. Die angenommenen CO_2 -Faktoren [Gemis 3.01] sowie die Einsparung zeigt Tab. 4-9.

	End-Energiebedarf $\text{kWh}_{\text{End}}/\text{a}$		CO_2 -Äquivalent Faktor $\text{kg}/\text{kWh}_{\text{End}}$	CO_2 -Äquivalent Emissionen $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-Äquivalent}} / \text{a}$	
	Standard-BG	Passiv-BG		Standard-BG	Passiv-BG
Gas	337.341	107.558	0,232	78.000	25.000
Strom	268.895	73.335	0,669	180.000	49.000
Summe ca.				258.000	74.000
vermiedene jährliche CO_2-Äquivalent Emissionen beim Passiv-Bürogebäude				184.000	

Tab. 4-9: Im „Passiv-Bürogebäudes“ jährlich vermiedene äquivalente CO_2 -Emissionen

Im vorliegenden Fall vermindert die Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ die CO_2 -Emissionen um 184 Tonnen pro Jahr.

4.2.1 Diskussion der berechneten Primärenergieeinsparung

Die ausgewiesene Primärenergieeinsparung von 71 % gilt nur für die hier definierten Ausführungsvarianten des Beispielgebäudes. Werden die Ausgangs- und die Endvariante verändert, ändert sich auch die erzielbare Primärenergieeinsparung. Die Definition der Varianten ist also für das Ergebnis von wichtiger Bedeutung.

Dass die Annahmen der Variante „Passiv-Bürogebäude“ heute weitgehend erreichbar sind, zeigt die in Abschnitt 4.6 vorgenommene Gegenüberstellung mit realen energieeffizienten Bürogebäuden. Der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Rechenergebnis wird durch die Parameterstudie in Abschnitt 4.5 dargestellt.

Im Folgenden wird die Ausgangsvariante „Standard-Bürogebäude“ näher betrachtet. Zunächst wird durch den Vergleich mit realen Gebäuden bewertet, ob der Primärenergiekennwert in einem heute üblichen Bereich liegt. In einem zweiten Schritt werden die Auswirkungen einiger Annahmen auf das Berechnungsergebnis diskutiert.

Vergleich der Variante „Standard-Bürogebäude“ mit realen Gebäuden

Die VDI 3807 gibt in Blatt 2 Kennwerte für den Heizungs- und Stromverbrauch von Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungen an. Diese wurden aus einer großen Anzahl gemessener Verbrauchswerte (überwiegend aus dem Zeitraum 1993 bis 1995) statistisch ermittelt. Angegeben werden Mittelwerte, die dem Modalwert der Verteilung entsprechen, und Richtwerte als arithmetisches Mittel aus dem unteren Quartil der Verteilung. Der Mittelwert beschreibt einen heute mittleren Standard, der Richtwert sollte bei der energetischen Modernisierung angestrebt werden. Im Bereich der Verwaltungsgebäude werden im Wesentlichen Gebäude der öffentlichen Hand ausgewertet. Unter Verwendung der in Tab. 4-6 angegebenen Primärenergiefaktoren, berechnet sich für die Gruppe „Verwaltungsgebäude mit normaler technischer Ausstattung“ ein Mittelwert für den Primärenergiekennwert von $168 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$. Bei differenzierter Berücksichtigung der Nutzung variiert dieser zwischen $136 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$ und $247 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$. Die hier definierte Ausführungsvariante „Standard-Bürogebäude“ liegt mit $236 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$ innerhalb dieses Bereiches, wenngleich an der oberen Grenze. Dies ist nicht verwunderlich, da in der VDI 3807 Blatt 2 bestehende Gebäude analysiert werden, während es sich bei der Ausführungsvariante „Standard-Bürogebäude“ um einen Neubau handelt. Zudem sind öffentliche Verwaltungen in der Regel geringer mit EDV-Arbeitshilfen ausgerüstet als übliche Bürogebäude und auf Lüftungs- bzw. Klimaanlage wird in öffentlichen Gebäuden, so weit möglich, verzichtet.

Dieser Sonderrolle der öffentlichen Gebäude wird durch den Vergleich mit 13 Bürogebäuden der freien Wirtschaft aus Frankfurt am Main deutlich (4 Gebäude aus dem Bankgewerbe; 5 Gebäude aus der Immobilienwirtschaft und 3 Gebäude aus sonstigen Wirtschaftszweigen). Im Auftrag des Energiereferats der Stadt Frankfurt am Main wurde deren Energie- und Wasserverbrauch vom Büro Amstein und Walthert (Frankfurt) analysiert [Energiereferat Frankfurt 2002]. Die Primärenergiekennwerte der Gebäude schwanken zwischen $190 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$ und $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$, wobei sich ein Mittelwert von etwa $500 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$ ergibt. Ein wesentlicher Grund für die im Vergleich zur Ausführungsvariante „Standard-Bürogebäude“ höheren Primärenergiekennwerte sind der hohe Stromverbrauch der Lüftungsanlage und der zentralen Dienste.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Primärenergiekennwert der Variante „Standard-Bürogebäude“ damit in dem heute üblichen Bereich liegt.

Alternative Realisierungsmöglichkeiten der Variante „Standard-Bürogebäude“

Bei der Definition der Ausführungsvarianten mussten eine große Anzahl von Entscheidungen in Bezug auf die konkrete Ausgestaltung des Gebäudemodells getroffen werden. Im Folgenden werden u.a. die in Abschnitt 4.1.2 angegebenen alternativen Realisierungsvarianten des „Standard-Bürogebäudes“ diskutiert.

Würde bei der Variante „Standard-Bürogebäude“, wie heute in der Regel üblich, eine Wärmerückgewinnung in die Lüftungsanlage eingebaut (Wärmebereitstellungsgrad 60 %), würde sich der Primärenergiebedarf Heizung um $23 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ reduzieren. Die gesamte Primärenergieeinsparung der Variante „Passiv-Bürogebäude“ beträgt in diesem Fall nur noch 68 %.

Der Verzicht auf eine Be- und Entfeuchtung würde zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs des „Standard-Bürogebäudes“ um $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ führen. Die mit der Variante „Passiv-Bürogebäude“ erzielte Primärenergieeinsparung reduziert sich in dem Fall von 71 % auf 70 %.

Würde das „Standard-Bürogebäude“ ohne abgehängte Decke ausgeführt, ergäbe sich ein geringerer Aufwand für die aktive Kühlung bzw. Nachtlüftung. Da diese mit $7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ jedoch nur einen geringen Anteil am gesamten Primärenergiebedarf haben, ergeben sich durch den Verzicht auf eine abgehängte Decke keine nennenswerten Veränderungen.

Durch derartige Einzelmaßnahmen wird die Primärenergieeinsparung nicht wesentlich verändert. Wird hingegen von einem energetisch guten Gesamtkonzept ausgegangen, wie er in [Knissel 1999] mit der Ausführungsvariante „Niedrigenergie-Bürogebäude“ beschrieben wird (Primärenergiebedarf des gesamten Gebäudes $136 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$), reduziert sich die erzielbare Primärenergieeinsparung auf 51 %.

Auch wenn die tatsächliche Primärenergieeinsparung im Einzelfall für die jeweiligen Randbedingungen bestimmt werden muss, lässt sich aus den hier durchgeführten Berechnungen schlussfolgern, dass mit heute am Markt verfügbaren Techniken eine wesentliche Primärenergieeinsparung möglich ist.

4.3 Raumkomfort

Von entscheidender Bedeutung ist die Frage, wie sich der Raumkomfort im „Passiv-Bürogebäude“ beim Verzicht auf eine aktive Kühlung sowie Be- und Entfeuchtung entwickelt. Um dies zu beurteilen, werden die Simulationsergebnisse für die Süd-Büros statistisch ausgewertet. Bestimmt wird die Häufigkeit, mit der gewisse Temperatur-Feuchte-Paare während der Nutzungszeit auftreten.

In Abb. 4-9 ist die Entwicklung der relativen Feuchte und der Raumlufttemperatur in den Südbüros des „Passiv-Bürogebäudes“ dargestellt. Die Auswertung umfasst das gesamte Jahr, wobei nur die Stunden innerhalb der Nutzungszeit betrachtet werden. Die Bezeichnung der Häufigkeitsklassen entspricht dem Mittelwert der Intervallgrenzen.

Um die Bewertung der Ergebnisse zu erleichtern, sind in das Diagramm unterschiedliche Behaglichkeitsbereiche eingezeichnet. Der Komfortbereich ist in Anlehnung an die Kriterien der DIN 1946 Teil 2 definiert. Hieran grenzt ein Übergangsbereich. Dieser umfasst Zustände, die aufgrund der differenzierten Definition der Behaglichkeitskriterien in DIN 1946 (z. B. gleitende Raumtemperaturanhebung bei hohen Außentemperaturen) innerhalb oder knapp außerhalb des Behaglichkeitsbereiches liegen, aber auf jeden Fall kurzfristig akzeptiert werden können.

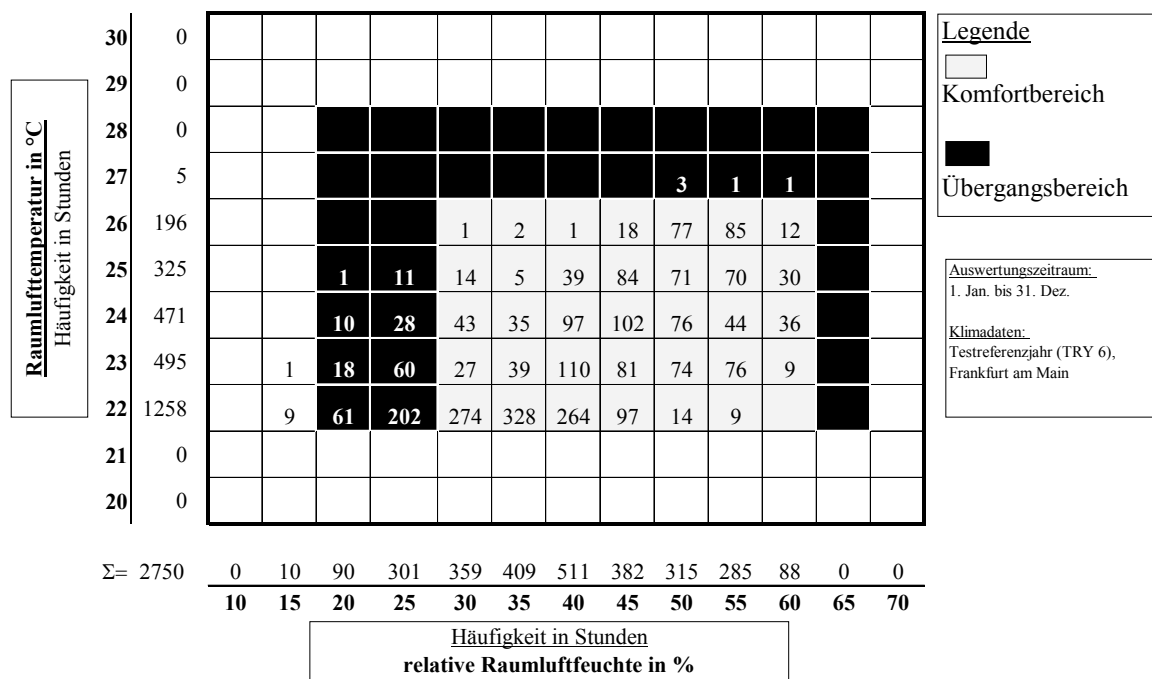


Abb. 4-9: Raumkomfort in den Südbüros des „Passiv-Bürogebäudes“ beim Verzicht auf eine aktive Kühlung sowie Be- und Entfeuchtung

Im „Passiv-Bürogebäude“ kann die Raumtemperatur wegen der geringen internen Wärmequellen und der hohen thermisch aktiven Speichermasse durch die freie Lüftung in Verbindung mit dem Erdreichwärmetauscher nahezu vollständig im Komfortbereich gehalten werden. Nur an fünf Stunden im Jahr steigt die Raumlufttemperatur auf 27 °C an. Der sommerliche Raumkomfort im „Passiv-Bürogebäude“ entspricht damit weitgehend dem eines aktiv gekühlten Gebäudes. Auch im Winter herrscht im „Passiv-Bürogebäude“ ein hoher Komfort. Durch die

Feuchterückgewinnung ergeben sich nur noch an 10 Stunden im Jahr relative Luftfeuchten unter 20 %.

Bei der Bewertung der relativen Feuchte ist zu bedenken, dass über die erforderliche Mindestfeuchte keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen (DIN 1946, Teil 2). Einen Sensor zum Bestimmen der relativen Feuchte besitzt der Mensch nicht, so dass auch bei niedrigen relativen Feuchten keine direkte Komforteinbuße eintritt. Die DIN 1946 legt trotzdem eine Mindestfeuchte fest, um den indirekten Komfortproblemen entgegenzuwirken: der verstärkten Aufwirbelung von Staub, dem Austrocknen der Schleimhäute und den vermehrten elektrostatischen Aufladungen.

Neue Untersuchungen aus dem Hermann Rietschel Institut der TU-Berlin deuten darauf hin, dass das Austrocknen der Schleimhäute weniger von einer geringen relativen Feuchte hervorgerufen wird, als vielmehr von der durch die mechanische Lüftungsanlage induzierten Raumluftrömung. Ohne Lüftungsanlage ergibt sich aufgrund des thermischen Auftriebs eine am Körper aufwärts gerichtete Strömung. Die Luft reichert sich dabei bereits mit Feuchte an, ehe sie in den Bereich der Schleimhäute (Augen, Nase, ...) kommt. Das Austrocknen der Schleimhäute ist damit geringer als im Fall einer Lüftungsanlage, bei der diese durch die mechanisch induzierte Luftbewegung direkt angeströmt werden. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse sollte die Frage der Feuchtegrenzwerte in Zukunft erneut kritisch diskutiert werden [Reske 2001].

Wie Untersuchungen in [Otto 1995] zeigen, werden die täglichen Schwankungen der relativen Raumlufffeuchte in der Realität entscheidend durch Sorptionsvorgänge in den Raumbooberflächen gedämpft. Da das Simulationsprogramm TAS in der Feuchtebilanz keine Sorptions- und Speichervorgänge berücksichtigt, werden die simulierten Werte der Raumlufffeuchte vor der statistischen Auswertung entsprechend korrigiert. Die simulierte Tagesamplitude der relativen Feuchte wird um einen Wert von 80 % gegenüber dem Tagesmittelwert gedämpft. Dies entspricht nach [Otto 1995] dem Verhalten eines Raumes mit mittlerer hygrischer Speicherkapazität.

Die jährlichen Feuchteschwankungen äußern sich in einem unterschiedlichen Feuchtegehalt der Bauteile im Sommer und im Winter. Durch diese Sorptions- und Speichervorgänge wird die relative Raumlufffeuchte im Sommer reduziert und im Winter erhöht, was sich positiv auf den Raumkomfort auswirkt. Die quantitative Bewertung dieser saisonalen Dämpfung ist sehr aufwendig. Sie ist in den Simulationsergebnissen nicht berücksichtigt. Die berechneten Werte der relativen Feuchte können deswegen als konservatives Ergebnis betrachtet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das „Passiv-Bürogebäude“ auch beim Verzicht auf eine aktive Kühlung, Be- und Entfeuchtung einen hohen Raumkomfort aufweist. Überhitzungen im Sommer treten nicht auf. Abweichungen vom anvisierten Komfortbereich durch zu geringe Werte der relativen Luftfeuchte im Winter sind beim „Passiv-Bürogebäude“ zwar noch vorhanden, aber deutlich reduziert.

4.4 Ökonomische Bewertung

Durch eine konsequente energetische Optimierung kann der Primärenergiebedarf des untersuchten Beispielgebäudes um 70 % reduziert werden. Um diese energetische Qualität zu erreichen, sind finanzielle Mehraufwendungen in einigen Bereichen wie z. B. dem Wärmeschutz erforderlich. Dem stehen Minderkosten bei der Haustechnik insbesondere der Klimatechnik gegenüber. Zudem ergeben sich bei dem optimierten Gebäude Einsparungen bei den Betriebs- und Wartungskosten. Im Folgenden soll abgeschätzt werden, wie sich die Wirtschaftlichkeit für das „Passiv-Bürogebäude“ im Vergleich zum „Standard-Bürogebäude“ darstellt.

Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf eine Darstellung der betriebswirtschaftlichen Kosten. Vernachlässigt werden dabei die indirekten Kosten des Energieverbrauchs, die z. B. durch Schäden aufgrund von Luftschadstoffen oder Treibhauseffekt entstehen. Diese so genannten externen Kosten werden heute noch von der Allgemeinheit beglichen. Für eine korrekte monetäre Bewertung müssten sie dem Energieverbrauch jedoch zugeordnet und damit in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einbezogen werden. Da die quantitative Bestimmung der externen Kosten sehr aufwendig ist und sie bei der Entscheidungsfindung in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielen, werden sie auch an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

Die angegebenen Kosten entsprechen dem Preisniveau von 1996. Die gesetzliche Mehrwertsteuer ist nicht enthalten. Die Vorzeichen werden entsprechend der betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise wie folgt definiert:

- Mehrausgaben werden als negative Beträge
- Minderausgaben werden als positive Beträge angegeben.

Die Mehr- bzw. Minderausgaben werden über Kostenschätzungen ermittelt. Diese sind im Anhang A-9 ausführlich dokumentiert. Tab. 4-10 zeigt das Ergebnis in zusammenfassender Form.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird eine Mehrertragsrechnung durchgeführt. Betrachtet werden hierbei die Kostendifferenzen zwischen dem „Standard-“ und dem „Passiv-Bürogebäude“. Bei den jährlichen Zahlungen werden Mehrausgaben rechnerisch wie Ausgaben, Minderausgaben wie Einnahmen behandelt. Das Gleiche gilt für die Investitionen. Auch hier werden nur die Differenzen von Standard- zu „Passiv-Bürogebäude“ betrachtet.

Mehr- bzw. Minder-Investitionen im ersten Jahr		
	€	Lebensdauer
Baulicher Wärmeschutz	-375.000	30
Beleuchtung	51.000	15
Arbeitshilfen	-160.000	5
HLK-Anlage*	270.000	15
Summe	-214.000	

* Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Anlage

jährliche Minderausgaben	
	€/a
Stromkosten	25.000
Gaskosten	5.000
Wartungskosten	8.000
Summe	38.000

Tab. 4-10: Mehr- (negativ) bzw. Minderausgaben (positiv) beim „Passiv-Bürogebäude“

Der Kapitalwert K_p einer Maßnahme ergibt sich, indem die Mehr- bzw. Minderinvestitionen I_0 vom Barwert B der im Betrachtungszeitraum auftretenden Zahlungen subtrahiert werden.

$$\text{Gl. 4-6} \quad K_p = B - I_0$$

mit

K_p Kapitalwert

B Barwert

I_0 Mehr- bzw. Minderinvestitionen bezogen auf den Anfangszeitpunkt t_0 .

Ist der Kapitalwert positiv, ist eine Maßnahme wirtschaftlich, ist er negativ, ist sie unwirtschaftlich.

Der Barwert B ist die Summe aller Zahlungen $Z(t)$ (Einnahmen sowie Ausgaben), die in einem Betrachtungszeitraum anfallen, jedoch ohne die Mehr- bzw. Minderinvestitionen I_0 . Zur Bestimmung des Barwertes werden die einzelnen Zahlungen nicht mit ihrem Nominalbetrag berücksichtigt, sondern mit dem Betrag, den man zum Anfangszeitpunkt t_0 auf der Bank hätte anlegen müssen, um die späteren Kosten bezahlen zu können (Diskontierung). Der Barwert ist damit der zum Kalkulationszins p anzulegende Gesamtbetrag, der zusammen mit den Zinsen alle laufenden Zahlungen deckt, wobei die jährliche Teuerungsrate s berücksichtigt wird [LEG 1995].

$$\text{Gl. 4-7} \quad B = \sum_{t=0}^{t=f-1} Z(t) \cdot \frac{(1+s)^t}{(1+p)^t}$$

mit

$Z(t)$ Zahlungen im Jahr t

s Inflationsrate

p Kalkulationszins

f Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums.

Als Betrachtungszeitraum zur Ermittlung des Barwertes werden im vorliegenden Fall 30 Jahre angenommen. Da Systeme mit einer rechnerischen Lebensdauer unter 30 Jahren in der Berechnung mit einbezogen werden (Beleuchtung, HLK-Anlage, Arbeitshilfen), müssen die entsprechenden Ersatzinvestitionen berücksichtigt werden. Die Mehr- bzw. Minderinvestitionen I_0 setzen sich somit aus den Erstinvestitionen $E(t_0)$ und den diskontierten Ersatzinvestitionen $E_0(t_E)$ zusammen. Die Ersatzinvestitionen werden mit folgender Formel auf den Anfangszeitpunkt t_0 diskontiert.

$$\text{Gl. 4-8} \quad E_0(t_E) = E(t_0) \cdot \frac{(1+s)^{t_E}}{(1+p)^{t_E}}$$

mit

E_0 Ersatzinvestition diskontiert auf den Anfangszeitpunkt t_0

t_E Jahr der Ersatzinvestition (Zählweise ab Null).

Die angenommenen Zeitpunkte der Ersatzinvestitionen zeigt Abb. 4-10.

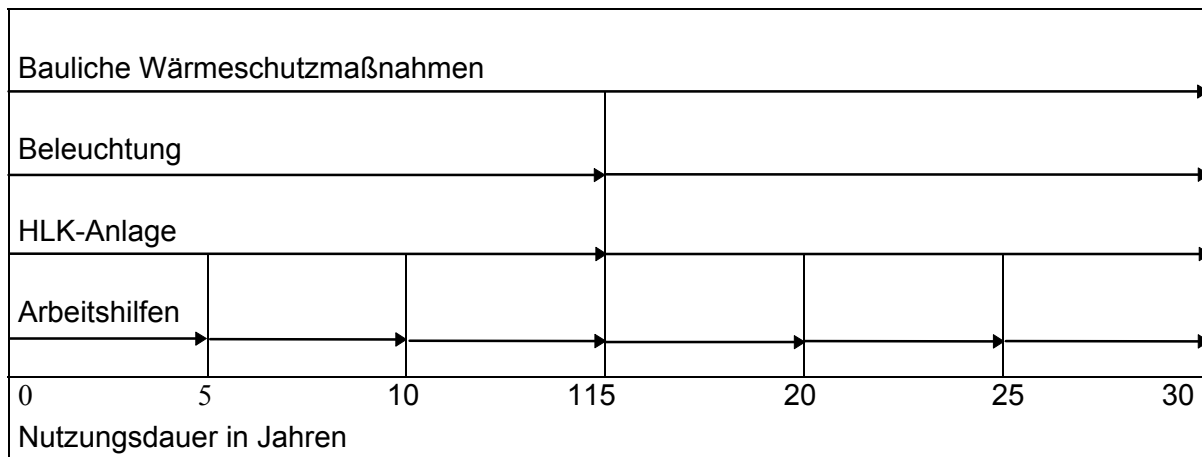


Abb. 4-10: Berücksichtigte Ersatzinvestitionen während der Nutzungsdauer von 30 Jahren

Um die Transparenz zu erhöhen, werden bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit die Barwerte der Energie- und Wartungskosteneinsparung sowie die Mehr- bzw. Minderinvestitionen I_0 getrennt bestimmt und ausgewiesen. Da sich die Mehr- bzw. Minderinvestitionen - mit Ausnahme des baulichen Wärmeschutzes - ebenfalls aus zeitlich verteilten Zahlungen zusammensetzen, werden sie im Folgenden auch als Barwerte bezeichnet. Der Kapitalwert der Gesamtmaßnahme wird durch Summenbildung aus den Einzelpositionen ermittelt.

Eine Schwierigkeit bei der ökonomischen Bewertung von Energiesparmaßnahmen stellt die Entwicklung der Energiepreise dar. Kurzfristige Prognose bezüglich der Energiepreisentwicklung sind in der Regel nur schwer möglich. Mittel- bis langfristig ist jedoch mit einem Anstieg der Energiepreise zu rechnen. Dies begründet sich zum einen im erforderlichen Klimaschutz zum anderen in der Verknappung der fossilen Brennstoffe. In der folgenden Abschätzung wird durch zwei Annahmen ein Bereich aufgespannt, innerhalb dessen sich die zukünftige Energiepreisentwicklung voraussichtlich abspielen wird. Es werden folgende Werte für die Energiepreissteigerung (nominale) angenommen

- Energiepreissteigerung $e = 2 \% \text{ p. a.}$ und $8,5 \% \text{ p. a.}$

Folgende weitere Annahmen liegen der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde:

- Inflationsrate $s = 2 \% \text{ p. a.}$
- Kalkulationszins (nominal) $p = 6 \% \text{ p. a.}$
- Steigerung der Wartungskosten = Inflationsrate.

Bei der hier durchgeführten Abschätzung wird nicht zwischen Eigen- und Fremdkapital, d. h. zwischen Haben- und Soll-Zins, unterschieden, sondern es wird mit einem einheitlichen Kalkulationszins gerechnet. Steuerliche Vor- und Nachteile sowie mögliche Fördermittel werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

4.4.1 Selbstgenutzte Immobilie

In selbstgenutzten Immobilien kommen die Minderausgaben bei Energie- und Wartungskosten direkt dem Investor zugute. Ihm fallen aber auch die Mehr- bzw. Minderinvestitionen zu. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit können in dem Fall somit alle Barwerte addiert werden. Den Kapitalwert am Ende des Betrachtungszeitraums zeigt Abb. 4-11.

Der Kapitalwert (ganz rechte Säule) ist positiv, d. h. der Bau eines „Passiv-Bürogebäudes“ ist

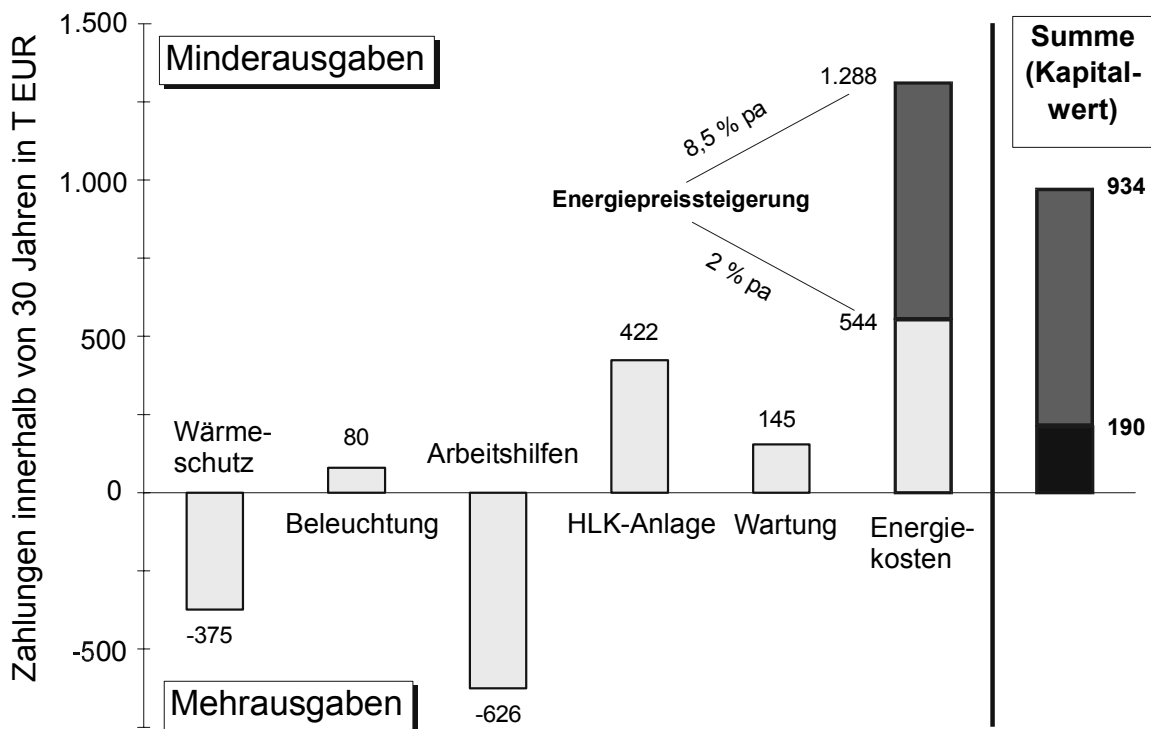


Abb. 4-11: Barwerte sowie Kapitalwert für den selbstnutzenden Investor bei Realisierung des hohen Effizienzstandards des „Passiv-Bürogebäudes“

für den selbstnutzenden Investor wirtschaftlich. Bei einer geringen Energiepreissteigerung entsprechend der allgemeinen Teuerung (2 % p. a.) belaufen sich seine Minderausgaben nach 30 Jahren auf ca. 190.000 EUR. Ergibt sich eine deutliche Energiepreissteigerung von 8,5 % pro Jahr, betragen die Minderausgaben ca. 900.000 EUR. Aus ökonomischer Sicht ist es für den selbstnutzenden Investor in dem hier betrachteten Beispiel sinnvoll, sich für den Bau eines Passiv-Bürogebäudes zu entscheiden.

Die zeitliche Entwicklung der Kosten zeigt Abb. 4-12. Dargestellt sind die Summenkurven für Energie- und Wartungskosten sowie für die investiven Kosten. Auch hier werden nur die Differenzen zur Variante „Standard-Bürogebäude“ betrachtet.

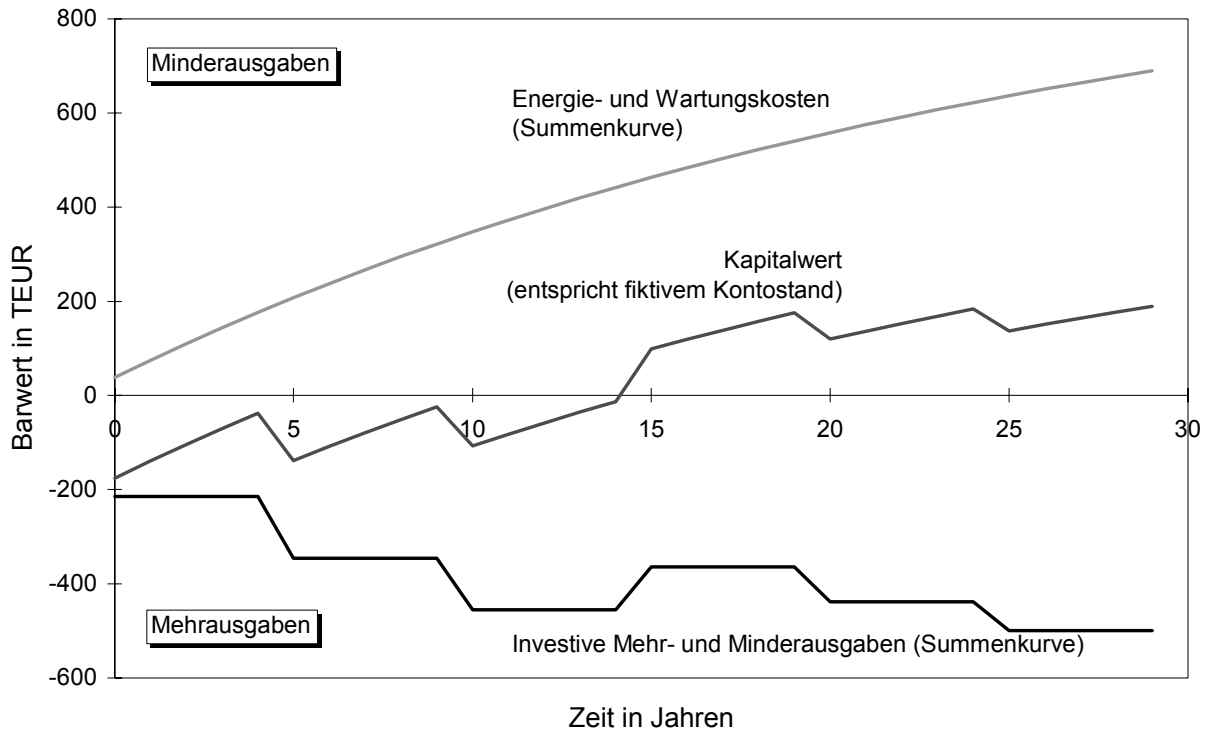


Abb. 4-12: Zeitliche Entwicklung der Barwerte und des Kapitalwerts im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren bei einer Energiepreissteigerung von 2 % p. a.

Die Summenkurve für die Energie- und Wartungskosten liegt im positiven Bereich, d. h. es ergeben sich Minderausgaben. Der Anstieg der Kurve ist nicht linear, da der angenommene Kalkulationszins (zur Diskontierung) kleiner ist als die angenommene Energiepreissteigerung. Damit nimmt der Barwert der Minderausgaben im Zeitverlauf ab.

Die Kurve der investiven Mehr- und Minderausgaben liegt im negativen Bereich. Insgesamt sind damit im investiven Bereich Mehrausgaben zu erbringen. Die Kurve weist Sprünge auf, die sich aus den erforderlichen Ersatzinvestitionen ergeben (siehe Abb. 4-10).

Werden beide Kurven addiert, ergibt sich der Kapitalwert, der als Stand eines fiktiven Kontos interpretiert werden kann. In den ersten 15 Jahren weist das Konto negative Beträge auf, d. h. die Investition ist für den Bauherrn noch unrentabel. Im Jahr 15 wechselt der Kontostand ins Positive. Grund sind Minderausgaben bei den Ersatzinvestitionen für Arbeitshilfen, Beleuchtung und HLK-Anlage. Der Nulldurchgang der Kurve des Kapitalwertes kann als eine Amortisationszeit interpretiert werden. Ab dem 15. Jahr bleibt der Kontostand positiv, da die Minderausgaben für die Energie- und Wartungskosten höher sind als die alle fünf Jahre wiederkehrenden Ersatzinvestitionen für die Arbeitshilfen. Am Ende des Betrachtungszeitraums ergibt sich der in Abb. 4-11 dargestellte positive Kapitalwert von etwa 190 TEUR.

Wird ein deutlicher Anstieg des Energiepreises von 8,5 % p. a. angenommen, erfolgt der Nulldurchgang der Kurve für den Kapitalwert und damit die Amortisation der Investition bereits nach acht Jahren.

4.4.2 Vermietete Immobilie

Anders stellt sich die Situation in vermieteten Immobilien dar. Zwar berechnen sich hier die gleichen Mehr- bzw. Minderausgaben, jedoch müssen sie entweder vom Vermieter oder vom Mieter bezahlt werden bzw. kommen ihm zugute.

- Der Vermieter bzw. Investor trägt die Kosten für die Herstellung des Gebäudes inklusive der Haustechnik. Er ist auch für die erforderlichen Ersatzinvestitionen in diesem Bereich verantwortlich, wobei er hierfür in der Regel Rücklagen aus den Mietzahlungen bildet.
- Die Ausrüstung der Arbeitsplätze mit energiesparenden Arbeitshilfen fällt in den Verantwortungsbereich des Mieters. Ihm kommen auf der anderen Seite die eingesparten Energie- und Wartungskosten zugute.

Unter diesen Randbedingungen ergeben sich die in Tab. 4-11 dargestellten Barwerte und Kapitalwerte für Vermieter und Mieter.

Sowohl für den Vermieter als auch für den Mieter ergeben sich positive Kapitalwerte, d. h. für beide Parteien ist die Maßnahme wirtschaftlich.

Den vom Vermieter aufzubringenden Mehrausgaben für den besseren baulichen Wärmeschutz stehen Minderausgaben im Bereich der Beleuchtung und HLK-Anlage gegenüber. Wird berücksichtigt, dass die geringeren Kosten auch bei der Ersatzinvestitionen nach 15 Jahren zu Buche schlagen, ergeben sich über 30 Jahre gerechnet Minderausgaben in der Größenordnung von ca. 127.000 EUR.

Vermieter		
Baulicher Wärmeschutz		-375.000 €
Beleuchtung		80.000 €
HLK-Anlage		422.000 €
Summe (Kapitalwert)		127.000 €
Mieter		
Energiepreissteigerung	8,5 % p.a.	2 % p.a.
Arbeitshilfen	-626.000 €	-626.000 €
Wartung	145.000 €	145.000 €
Energieeinsparung	1.288.000 €	544.000 €
Summe (Kapitalwert)	807.000 €	63.000 €

Tab. 4-11: Barwerte sowie Kapitalwert für Vermieter und Mieter beim „Passiv-Bürogebäude

Erhöhte Mieteinnahmen sind bei dieser ersten Abschätzung noch nicht berücksichtigt. Natürlich ist es denkbar, dass je nach Marktlage der Vermieter einen Anteil der eingesparten Energiekosten über eine höhere Nettomiete abschöpfen kann.

Der Mieter hat für die Ausrüstung mit stromsparenden Arbeitshilfen - hier speziell für die Anschaffung von Notebooks - zu sorgen. Die Mehrausgaben hierfür sind selbst bei Berücksichtigung der alle fünf Jahre erforderlichen Ersatzinvestitionen geringer als die Einsparungen an Energie- und Wartungskosten. Über einen Zeitraum von 30 Jahren betrachtet, ergeben sich für den Mieter Minderausgaben von ca. 60.000 EUR bei einer geringen und ca. 800.000 EUR bei deutlicher Energiepreissteigerung.

4.4.3 Diskussion der berechneten Kapitalwerte

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass die Realisierung der Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ sowohl für den selbstnutzenden wie auch für den vermietenden Investor betriebswirtschaftlich rentabel ist. Die berechneten Kapitalwerte gelten natürlich nur für die hier getroffenen Annahmen und die angesetzten Mehr- bzw. Minderausgaben. Im Folgenden werden einige Aspekte qualitativ diskutiert, durch die der Kapitalwert verändert wird.

Die Wirtschaftlichkeit wird im vorliegenden Fall als Mehrertragsrechnung durch den Vergleich zweier Ausführungsvarianten bestimmt. Sowohl der Ausgangs- wie auch der Endzustand (hier: „Standard-Bürogebäude“ > „Passiv-Bürogebäude“) haben entscheidenden Einfluss auf die Rentabilität. Wird als Ausgangszustand ein Bürogebäude angenommen, welches in Bezug auf die energetische Effizienz nicht dem Standard-, sondern eher der in [Knissel 1999] definierten Variante „Niedrigenergie-Bürogebäude“ entspricht, kann in der Regel bereits hier auf eine Klimatisierung verzichtet werden. Die Minderausgaben bei der HLK-Anlage können in dem Fall nicht mehr dem „Passiv-Bürogebäude“ zugerechnet werden, was dessen Wirtschaftlichkeit verschlechtert.

Aber auch durch Änderungen im Endzustand wird die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Kostenreduktionen sind beim „Passiv-Bürogebäude“ noch an mehreren Stellen möglich. So ist es unter Umständen vorstellbar, anstelle von Notebooks konventionelle Rechner mit Energiesparschaltung und LCD-Bildschirmen einzusetzen. Hierdurch würden sich die Mehrausgaben reduzieren. Da die Rechner alle fünf Jahre ersetzt werden müssen, wirken sich geringere Mehrausgaben in diesem Bereich deutlich auf die Wirtschaftlichkeit des „Passiv-Bürogebäudes“ aus. Auch ist es vorstellbar, beim „Passiv-Bürogebäude“ den Restheizwärmebedarf über die Zuluft in die unterschiedlichen Räume einzubringen. In dem Fall könnte auf den Einbau von Heizkörpern und Heizungsrohren verzichtet werden. Hierdurch würden sich zusätzliche Einsparungen ergeben, was die Wirtschaftlichkeit verbessert (siehe hierzu Abschnitt 5.1.3).

Nicht berücksichtigt sind steuerliche Aspekte. Verglichen mit der Variante „Standard-Bürogebäude“ ergeben sich bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ insbesondere für den Vermieter Vorteile durch die Umschichtung von Betriebs- zu Investitionskosten. So können die Herstellungskosten (Investitionskosten) entweder degressiv oder mit 3 % pro Jahr abgeschrieben werden. Zinsen werden als Ausgaben bzw. Verlust in die Bilanz eingebracht. Beides kann bei ausreichender Steuerschuld zu finanziellen Vorteilen für den Investor führen. Da die steuerlichen Vorteile jedoch entscheidend von den individuellen Randbedingungen abhängen, sind sie in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Bei Mietwohngebäuden ergibt sich durch die hohen Dämmstoffdicken der Außenwand ein Verlust an vermietbarer Fläche. Die hieraus resultierenden Mindereinnahmen sind genauso wenig in der Berechnung enthalten, wie Vorteile bei der Vermietung eines Gebäudes mit geringen Betriebskosten. So kann damit gerechnet werden, auch bei einem Überangebot an Bürofläche (Mietermarkt) eine gute Vermietbarkeit und damit geringe Leerstände realisiert werden können. Bei einer starken Nachfrage nach Büroflächen (Vermietermarkt) kann der Vermieter hingegen einen Teil der Einsparungen bei Energie- und Wartungskosten durch eine höhere Nettomiete abschöpfen und so seine Mieteinnahmen steigern. Das „Passiv-

Bürogebäude“ ermöglicht es den Vermietern damit, flexibel auf die aktuelle Marktsituation zu reagieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass, auch wenn Wirtschaftlichkeitsrechnungen immer mit Unsicherheiten behaftet sind, das „Passiv-Bürogebäude“ eine ökonomisch interessante Variante darstellt. Insbesondere vor dem Hintergrund der Umweltentlastung sollte diese Option bei jedem Neubau geprüft werden.

4.5 Variation wichtiger Gebäudeparameter

Im Folgenden wird untersucht, ob die beim „Passiv-Bürogebäude“ erzielten Energieeinsparungen auch unter anderen, als den bisher angenommenen Randbedingungen realisiert werden können. Dazu werden einige wichtige Gebäudeparameter variiert und deren Auswirkung auf den Primärenergiekennwert und den Raumkomfort in den Südbüros dargestellt.

4.5.1 Personenbelegungsdichte

In den bisherigen Simulationsläufen wurde in den Büros eine mittlere Personenbelegungsdichte von 15 m² Bürofläche pro Person angesetzt. Nachfolgend wird untersucht, ob die geringen Primärenergiekennwerte des „Passiv-Bürogebäudes“ auch bei anderen Personenbelegungsdichten realisiert werden können. Als hohe Personenbelegungsdichte wird dabei eine Belegungsdichte von 10 m² Bürofläche pro Person angenommen. Im Fall der geringen Personenbelegungsdichte stehen jeder Person 20 m² Bürofläche zur Verfügung.

Tab. 4-12 zeigt, wie sich die internen Wärmequellen in den Büros bei der unterschiedlichen Belegungsdichte verändern. Dargestellt sind die maximale Wärmeabgabe während der Nutzungszeit und die Vollbetriebsstunden.

Personenbelegungsdichte	m ² _{HNF} pro Person	10 (hoch)	15 (mittel)	20 (gering)	Vollbetriebsstunden
Beleuchtung	W/m ² _{HNF}	6,2	6,2	6,2	740 h/a
Personen sensibel	W/m ² _{HNF}	8,5	5,7	4,2	2200 h/a
Arbeitshilfen	W/m ² _{HNF}	3,9	2,6	2,0	1100 h/a
Summe	W/m²_{HNF}	18,6	14,5	12,4	

Tab. 4-12: Interne Wärmequellen in den Büros bei unterschiedlicher Personenbelegungsdichte

Die Personenbelegungsdichte hat Auswirkungen auf den Primärenergiekennwert des Gebäudes sowie auf den Raumkomfort in den Büros. Die Veränderung dieser Größen in Abhängigkeit der Personenbelegungsdichte zeigt Abb. 4-13. Der Primärenergiekennwert wird durch die Linie mit Dreiecken symbolisiert. Die Auswirkung auf den Raumkomfort wird durch die Säulengrafik dargestellt. Angegeben ist die Häufigkeit in Prozent, mit der die Raumluft während der jährlichen Nutzungszeit innerhalb der in Abb. 4-9 definierten Komfortzonen (Komfortbereich, Übergangsbereich, unkomfortabler Bereich) liegt. Untersucht werden die Südbüros, da hier im Sommer die höchsten Raumtemperaturen erwartet werden.

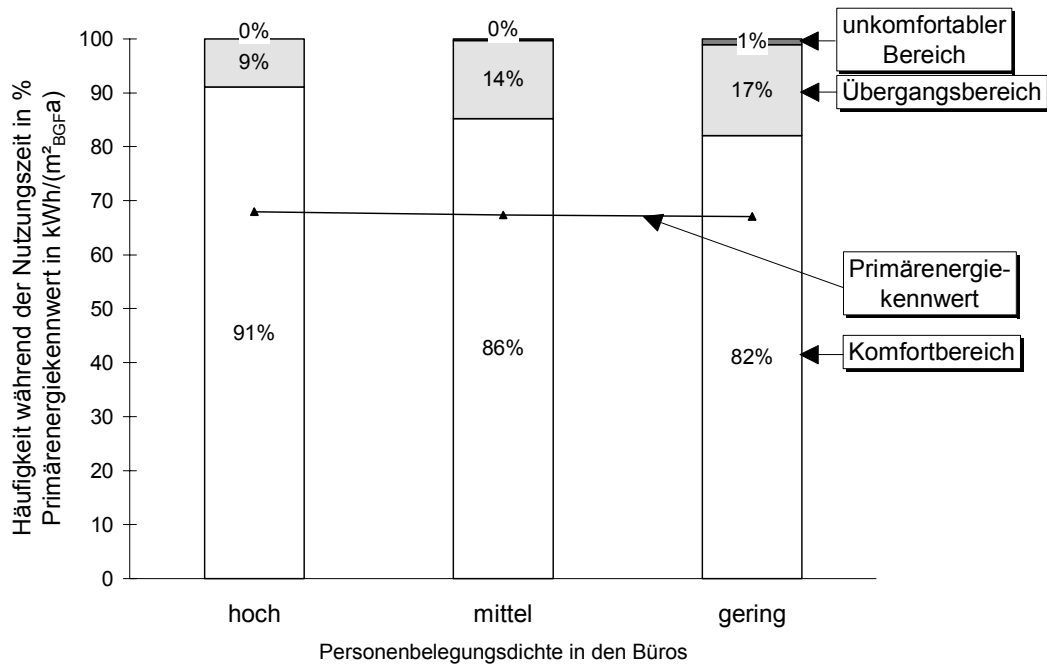


Abb. 4-13: Einfluss der Personenbelegungs-dichte auf Raumkomfort und Primärenergiekennwert im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Der Primärenergiekennwert des Gebäudes wird durch die Personenbelegungs-dichte kaum beeinflusst. Er variiert zwischen $67,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ und $68,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$. Der bei höherer Personenbelegung zu verzeichnende Anstieg des Stromverbrauchs der Arbeitshilfen (Computer) ist wegen der eingesetzten effizienten Technik gering. Zudem wird der Anstieg des Primärenergiebedarfs der Arbeitshilfen durch die Reduktion des Primärenergieaufwand zur Beheizung zum Teil kompensiert. Nimmt die Belegungs-dichte zu, kann wegen der steigenden Anzahl anwesender Personen ein größerer Anteil der Wärmeverluste des Gebäudes über den Abwärmestrom der Personen gedeckt werden. In der Summe ergibt sich die hier dargestellte vernachlässigbare Beeinflussung des Primärenergiekennwertes von der Personenbelegungs-dichte.

Auch der Einfluss der Personenbelegungs-dichte auf die Behaglichkeit in den Büros ist gering. Interessant ist, dass sich der Raumkomfort in den Büros mit zunehmender Personenbelegungs-dichte verbessert. Bei der hohen Belegungs-dichte von 10 m^2 pro Person treten Zustände aus dem Übergangsbereich nur noch an 9 % der Nutzungszeit auf. Unkomfortable Zustände stellen sich nicht mehr ein. Die Verbesserung des Raumkomforts ergibt sich durch einen Anstieg der Raumluftfeuchte im Winter aufgrund der Feuchteabgabe der zusätzlichen Personen. Da Abweichungen vom Komfortbereich im „Passiv-Bürogebäude“ primär durch zu geringe Werte der relativen Feuchte im Winter hervorgerufen werden, bewirkt dieser Feuchteanstieg die Verbesserung in der Häufigkeitsstatistik.

Sommerliche Überhitzungen treten auch bei hoher Belegungs-dichte nicht auf. Selbst bei der maximalen Belegungs-dichte von 10 m^2 pro Person ergeben sich Raumlufttemperaturen über 26°C in dem Beispielgebäude nur an 9 Stunden im Jahr. Temperaturen über 27°C stellen sich unter den hier gewählten Randbedingungen in den Büros nicht ein.

4.5.2 Höhe der internen Wärmequellen

Der Primärenergiebedarf und der Raumkomfort wird durch die internen Wärmequellen, d. h. Abwärme von Personen, Beleuchtung und Arbeitshilfen, maßgeblich beeinflusst. Die internen Wärmequellen schwanken in der Praxis stark. Dies ist zum einen in den unterschiedlichen Nutzungsanforderungen, zum anderen in der unterschiedlichen Effizienz der eingesetzten Technik begründet. Schwankungen treten dabei nicht nur bei der Erstausrüstung sondern auch im Laufe der Nutzungsphase des Gebäudes auf. Durch neue technische Entwicklungen (z. B. LCD-Monitore) oder durch Mieterwechsel kann sich die Höhe der internen Wärmequellen im Lebenszyklus eines Gebäudes verändern. Während bei selbst genutzten Gebäuden der Investor die Ausstattung mit Bürogeräten bestimmen kann, hat er bei vermieteten Gebäuden in der Regel keinen Einfluss auf die vom Mieter eingesetzten elektrischen Geräte.

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie der Primärenergiebedarf des Gebäudes und insbesondere der Raumkomfort durch die Höhe der internen Wärmequellen beeinflusst wird. Hierzu wird die Simulationsvariante „Passiv-Bürogebäude“ mit unterschiedlichen internen Wärmequellen ausgestattet. Neben dem „Standard-Bürogebäude“ (siehe Abschnitt 4.1.2) wird ein Niedrigenergiestandard für die internen Wärmequellen definiert. Dieser entspricht dem des Niedrigenergie-Bürogebäudes aus [Knissel 1999]. In Tab. 4-13 sind die in den Büros auftretenden maximalen Leistungen und die jährlichen Vollbetriebsstunden für Beleuchtung, Arbeitshilfen und Personen zusammenfassend dargestellt. Die Beschreibung der diesen Zahlen zugrunde liegenden technischen Systeme ist im Anhang A8 sowie in [Knissel 1999] zu finden.

		(Maximale Leistung Vollbetriebsstunden)							
		Beleuchtung		Arbeitshilfe		Personen		gesamt	
Variante	entspricht	W/m ² _{HNF}	h/a	W/m ² _{HNF}	h/a	W/m ² _{HNF}	h/a	W/m ² _{HNF}	h/a
niedrig	Passiv-BG	6,2	740	2,6	1155	5,7	2200	14,4	1380
mittel	Niedrigen.-BG	12,5	1375	8,8	1155	5,7	2200	26,9	1480
hoch	Standard-BG	27,1	1650	14,5	1155	5,7	2200	47,3	1560

Tab. 4-13: Maximale Leistung und Vollbetriebsstunden der internen Wärmequellen in den Büros

Den Fluren und Nebenräumen wird nur Abwärme über die Beleuchtungsanlage zugeführt. Die in den Simulationsrechnungen angesetzten Werte sind in Tab. 4-14 dokumentiert.

		(Maximale Leistung Vollbetriebsstunden)			
		Flur		Nebenräume	
Variante	entspricht	W/m ² _{HNF}	h/a	W/m ² _{HNF}	h/a
niedrig	Passiv-BG	1,7	2750	1,7	740
mittel	Niedrigenergie-BG	3	2750	3	1375
hoch	Standard-BG	7,3	2750	7,3	1650

Tab. 4-14: Maximale Leistung und Vollbetriebsstunden der Beleuchtungsanlage in Flur und Nebenräumen

Abb. 4-14 zeigt Raumkomfort und Primärenergiekennwert für die untersuchten Simulationsvarianten.

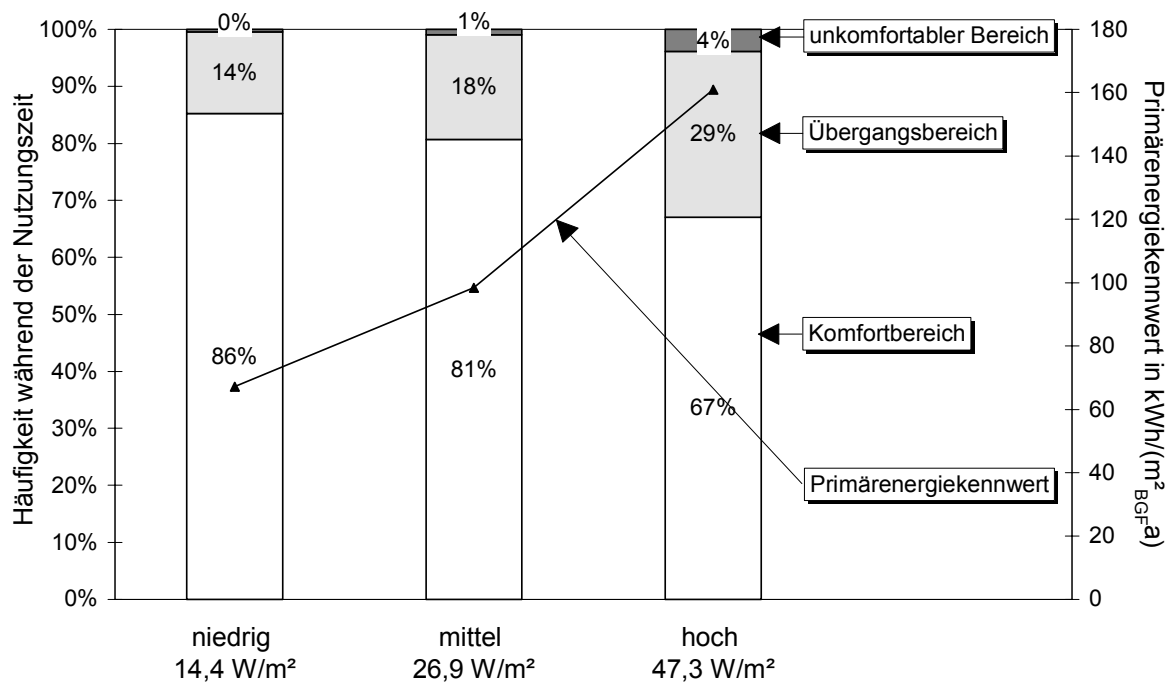


Abb. 4-14: Einfluss der internen Wärmequellen auf Raumkomfort und Primärenergiekennwert im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Eine Erhöhung der internen Wärmequellen führt zu einer Verschlechterung des Raumkomforts in den Büros sowie zu einem deutlichen Anstieg des Primärenergiebedarfs.

Während unkomfortable Zustände in den Büros bei den bisher angenommen „niedrigen“ internen Wärmequellen von $14,4 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{HNF}})$ unter $0,5 \%$ der Nutzungszeit liegen, steigen diese bei „hohen“ internen Wärmequellen bis auf 4% an. Zustände aus dem Übergangsbereich treten mit 29% bei „hohen“ internen Wärmequellen etwa doppelt so häufig auf wie bei „niedrigen“. Dies verdeutlicht, dass die internen Wärmequellen einen wesentlichen Einfluss auf den Raumkomfort haben. Entscheidend für die Verschlechterung ist dabei die Zunahme von Situationen mit zu geringen Werten der relativen Feuchte im Winter. Der Anstieg der relativen Feuchte ergibt sich aufgrund des höheren Niveaus der Raumtemperatur, das sich bei zunehmenden internen Wärmequellen einstellt. Überhitzungen nehmen in den Büros ebenfalls zu. Die Häufigkeit von Temperaturen über 26°C zeigt Tab. 4-15.

Höhe der internen Wärmequellen	niedrig $14,4 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{HNF}})$	mittel $26,9 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{HNF}})$	hoch $47,3 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{HNF}})$
Häufigkeit	0%	1 %	8 %

Tab. 4-15: Stundenhäufigkeit von Temperaturen über 26°C während der Nutzungszeit in den Südbüros des „Passiv-Bürogebäudes“

Während bei „niedrigen“ internen Wärmequellen die Häufigkeit von Temperaturen über 26°C unter 0,5 % liegt, treten diese bei „mittleren“ internen Wärmequellen bei 1 %, bei „hohen“ internen Wärmequellen an 8 % der Nutzungsstunden auf.

Ob der Komfort bei „hohen“ internen Wärmequellen ausreichend ist, ist letzten Endes eine individuelle Entscheidung des Bauherren. Die DIN 4108 Teil 2 gibt hierzu Hinweise. Sie gilt allerdings nur für Gebäude ohne RLT-Anlage. Selbstverständlich kann jeder Bauherr darauf bestehen, dass abweichend von DIN 1946 Blatt 2 nur diese Norm berücksichtigt werden soll. Die DIN 4108 Teil 2 erlaubt die Überschreitung einer Grenztemperatur an 10 % der Nutzungsstunden. Die Grenztemperatur liegt dabei abhängig von der Klimazone zwischen 25°C und 27°C.

Das bei der Simulation verwendete Testreferenzjahr 6 (Frankfurt a. M.) fällt in die Klimazone sommerheiß mit der Grenztemperatur von 27°C. Nach Tab. 4-15 wird selbst eine Grenztemperatur von 26°C nur an 8 % der Nutzungszeit überschritten. Die Anforderungen der DIN 4108 Teil 2 wären damit auch bei der Variante „hoch“ erfüllt.

Zu bedenken ist dabei, dass die Simulationsvarianten bereits eine Reihe von Konstruktionsmerkmalen aufweisen, die sich positiv auf das sommerliche Temperaturverhalten auswirken:

- gute Tageslichtnutzung
- hohe thermisch aktive Speichermasse
- Möglichkeiten zur freien Lüftung und Nachtlüftung in den Büros mit bis zu 3-fachem Luftwechsel
- Erdreichwärmetauscher zur Vorkühlung der Zuluft bei freier Lüftung.

Ohne diese Konstruktionsmerkmale wären die sommerlichen Temperaturen deutlich höher und der Komfort zumindest bei der Variante „hoch“ nicht gegeben.

Einfluss haben die internen Wärmequellen aber auch auf den Primärenergiekennwert. Zur detaillierteren Diskussion ist in Abb. 4-15 die Entwicklung der Teilenergiekennwerte dargestellt.

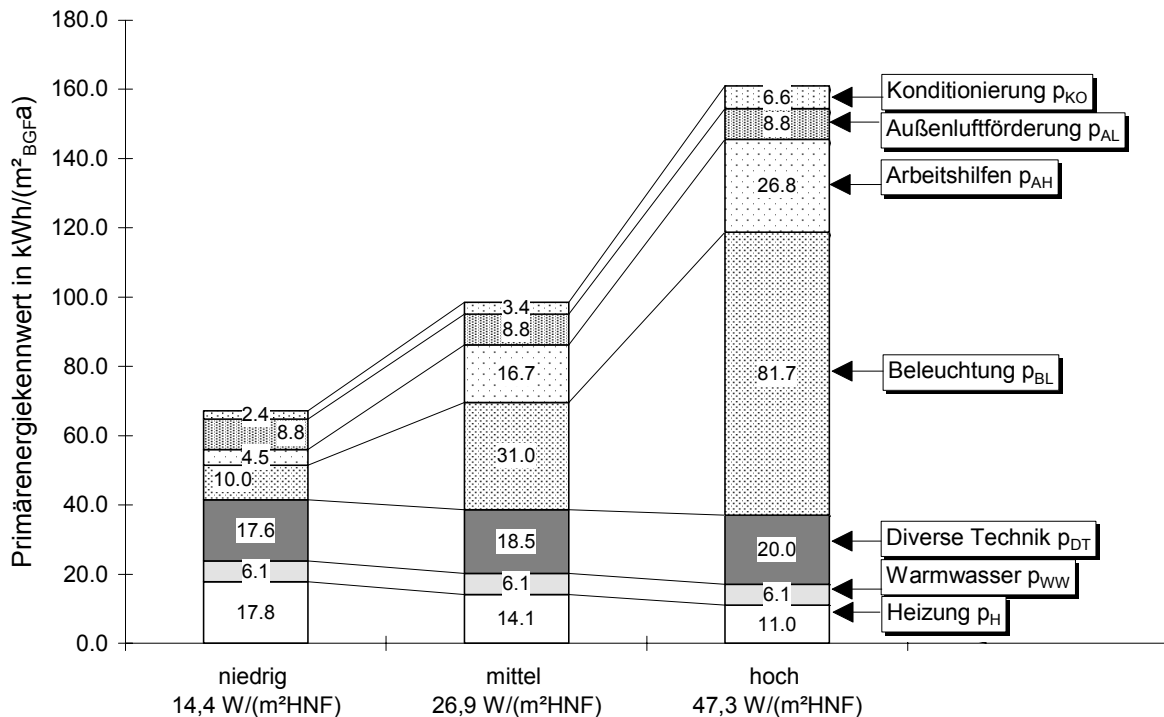


Abb. 4-15: Primärenergiekennwerte des „Passiv-Bürogebäudes“ bei unterschiedlichen internen Wärmequellen

Es zeigt sich ein deutlicher Anstieg des gesamten Primärenergiekennwertes des Gebäudes. Während er bei „niedrigen“ internen Wärmequellen bei $67 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{BGFa})$ liegt, steigt er bei der Simulationsvariante „mittel“ auf $98 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{BGFa})$, bei „hohen“ internen Wärmequellen auf $161 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{BGFa})$ an. Die Höhe der Teilenergiekennwerte zeigt, dass hier eine Fehloptimierung bei der Planung vorliegt. Bei der Variante mit „hohen“ internen Wärmequellen wäre es sinnvoller gewesen, die verfügbaren Finanzmittel in eine effizientere Beleuchtungsanlage zu investieren als z. B. in den hohen Wärmeschutz.

Auch wird deutlich, dass eine Kompensation des hohen Stromverbrauchs über den abnehmenden Primärenergiebedarf für die Beheizung nicht möglich ist. So sinkt der Primärenergiekennwert Heizung beim Vergleich der Simulationsvarianten „niedrig“ und „hoch“ zwar um $6,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{BGFa})$ der Primärenergiekennwert für Beleuchtung und Arbeitshilfen steigt aber um $94 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{BGFa})$ an.

Ein geringer Anstieg ist beim Primärenergiekennwert Konditionierung zu verzeichnen. Aufgrund der höheren Raumtemperaturen steigt der Aufwand für die freie Lüftung und Nachtkühlung und damit der Stromverbrauch der Ventilatoren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Reduktion der internen Wärmequellen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von energieeffizienten Gebäudekonzepten spielen. Der verminderte Wärmeeintrag hat mehrere positiven Auswirkungen:

- Er führt zu niedrigeren sommerlichen Temperaturen, so dass auf eine aktive Kühlung verzichtet werden kann. Erforderlich ist die Einbindung in ein entsprechendes Gebäudekonzept mit möglichst geringen solaren Wärmegeinnen, einer möglichst hohen aktiven Speicherkapazität und Möglichkeiten zur freien Kühlung sowie Nachtlüftung.
- Er führt dazu, dass im Winter die Temperaturen seltener über den Sollwert von z. B. 22°C ansteigen. Damit ergeben sich höhere Werten der relativen Feuchte im Winter. Dies erleichtert den Verzicht auf eine aktive Befeuchtung.
- Er ermöglicht einen hohen Wärmeschutz der Gebäudehülle, ohne dass die Raumtemperaturen im Sommer wesentlich ansteigen (siehe auch Abschnitt 5.1.2).
- Die effiziente Beleuchtungsanlage und entsprechende Arbeitshilfen führen selbst zu einem geringen Stromverbrauch und damit reduziertem Primärenergiebedarf.

Ein sinnvolles Gebäudekonzept setzt also die Optimierung dieses Bereiches voraus. Insbesondere bei der Beleuchtung besteht in der Planung ein großer Gestaltungsspielraum. Bei einer guten Tageslichtnutzung und einem effizienten Beleuchtungssystem ist ein möglicherweise nicht vermeidbarer Anstieg im Bereich der Arbeitshilfen ohne größere Komfortverschlechterung zu verkraften („mittel“). Deutlich schlechter wird der Raumkomfort, wenn neben den ineffizienten Arbeitshilfen auch ein ineffizientes Beleuchtungssystem realisiert wird („hoch“; entspricht Definition „Standard-Bürogebäude“) oder eine schlechte Nutzung des Tageslichtes vorliegt.

4.5.3 Orientierung der Hauptfassaden

Bei der Realisierung von „Passiv-Bürogebäuden“ kann nicht in jedem Fall die in den bisherigen Simulationsläufen angenommene Nord-Süd-Orientierung der Hauptfassaden eingehalten werden. Im Folgenden wird untersucht, wie sich der Raumkomfort und der Primärenergiekennwert des Gebäudes bei unterschiedlichen Ausrichtungen verändern. Hierzu wird das Beispielgebäude in die entsprechenden Himmelsrichtungen gedreht.

Da das Gebäude symmetrisch aufgebaut ist, entspricht der Primärenergiekennwert des Gebäudes bei Nord-Süd-Ausrichtung dem bei Süd-Nord-Ausrichtung. Für die Behaglichkeitsstatistik gilt diese Symmetrie nicht, da hier nur die Büros einer Fassadenseite ausgewertet werden. Wird das Gebäude um 180° gedreht, werden die Süd-Büros zu Nord-Büros, weswegen sich die Häufigkeitswerte unterscheiden. Die Ergebnisse der Variation zeigt Abb. 4-16.

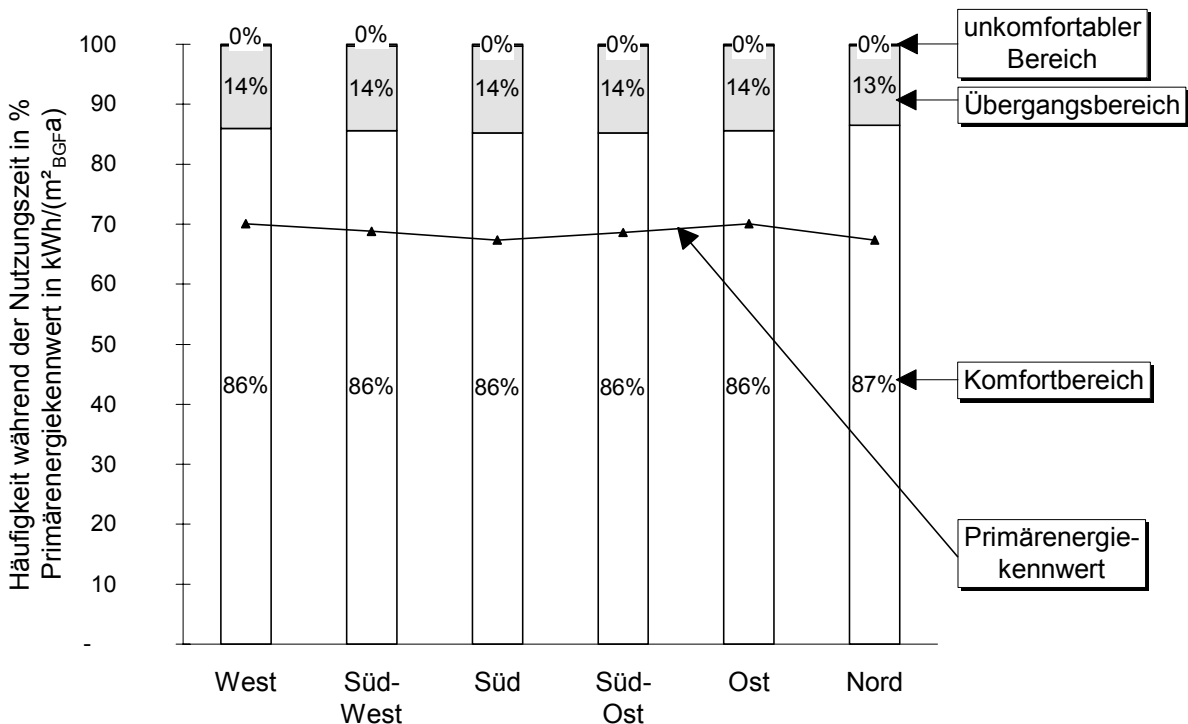


Abb. 4-16: Einfluss der Orientierung der Hauptfassade auf den Primärenergiekennwert und den Raumkomfort im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Der Einfluss der Orientierung ist gering. Der Primärenergiekennwert variiert zwischen 67 kWh/(m²_{BGFa}) für die Nord-Süd-Orientierung und 70 kWh/(m²_{BGFa}) für die Ost-West-Orientierung der Hauptfassaden. Aus energetischer Sicht müssen unter den hier gewählten Randbedingungen keine besonderen Anforderungen an die Ausrichtung der Hauptfassaden gestellt werden.

Auch auf die Behaglichkeit in den Büros hat die Orientierung keinen entscheidenden Einfluss. Unkomfortable Zustände treten nur in Ausnahmesituationen auf. Hervorgerufen werden sie durch zu geringe Werte der relativen Luftfeuchtigkeit im Winter. Eine Überschreitung der Raumlufttemperatur von 28 °C tritt in keinem Fall auf. Die Stunden mit Raumlufttemperaturen über 26°C sind selten. Der Maximalwert tritt bei einer Ost-Ausrichtung auf. Hier liegt die Raumtemperatur an 12 Stunden im Jahr über 26°C. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Lüftungsanlage erst um 6.00 Uhr eingeschaltet wird und der Sonnenschutz erst bei Beginn der Nutzungszeit um 7.00 Uhr geschlossen wird. Die Büros können sich entsprechend in den Morgenstunden aufheizen.

4.5.4 Fensterflächenanteil der Hauptfassaden

Die Größe der Fensterfläche hat neben dem Erscheinungsbild Einfluss auf das energetische Verhalten eines Gebäudes. Nachfolgend wird untersucht, welche Veränderungen sich beim Primärenergiekennwert des Gebäudes sowie beim Raumkomfort in den Südbüros ergeben, wenn die Fensterfläche im „Passiv-Bürogebäude“ zwischen 0 % auf 100 % variiert wird.

Während die thermischen Auswirkungen eines veränderten Fensterflächenanteils mit Hilfe der thermischen Gebäude- und Anlagensimulation sehr genau bestimmt werden können, ist die direkte Einbindung einer Tageslichtsimulation in dem derzeitigen Entwicklungsstand des Simulationsprogramms TAS (Version 8.0) nicht möglich. Der Einfluss unterschiedlicher Fensterflächenanteile auf den Strombedarf der Beleuchtung muss entsprechend über ein einfaches Berechnungsmodell angenähert werden. Dabei wird zuerst für den jeweiligen Fensterflächenanteil der Tageslichtquotienten in den Büros nach DIN 5034 Teil 3 berechnet und auf dieser Grundlage der Vollbetriebszeitfaktor der Beleuchtungsanlage nach [LEE 1995] ermittelt. Durch die Multiplikation des Vollbetriebszeitfaktors mit der maximalen Leistungsaufnahme des spezifizierten Beleuchtungssystems und der Nutzungszeit ergibt sich der jährliche Strombedarf. Dieser wird in der Simulation abgebildet, indem Tagesprofile definiert werden, die die täglichen und saisonalen Schwankungen berücksichtigen (siehe Anhang A-8).

Die bei den Simulationsläufen angenommenen Fenstergeometrien sowie der sich daraus ergebende Tageslichtquotient und Vollbetriebszeitfaktor sind in Tab. 4-16 zusammengefasst. Die Fensterfläche (Verglasung inkl. 30 % Rahmenanteil) ist dabei auf die Innenfläche der Außenwand bezogen.

Fensterflächenanteil		0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
Fensterhöhe	m	0	1,6	2,1	2,1	2,4	3
Fensterbreite	m	0	1,4	2,14	3,21	3,75	3,75
Tageslichtquotient / DIN 5034 T3		0	2,4	4,3	5,4	6,6	7,7
Vollbetriebszeitfaktor der Beleuchtungsanlage [LEE 1995]		1	0,42	0,27	0,22	0,21	0,21

Tab. 4-16: Angenommene Fenstergeometrie und lichttechnische Größen

Abb. 4-17 zeigt das Ergebnis der Simulationsrechnungen.

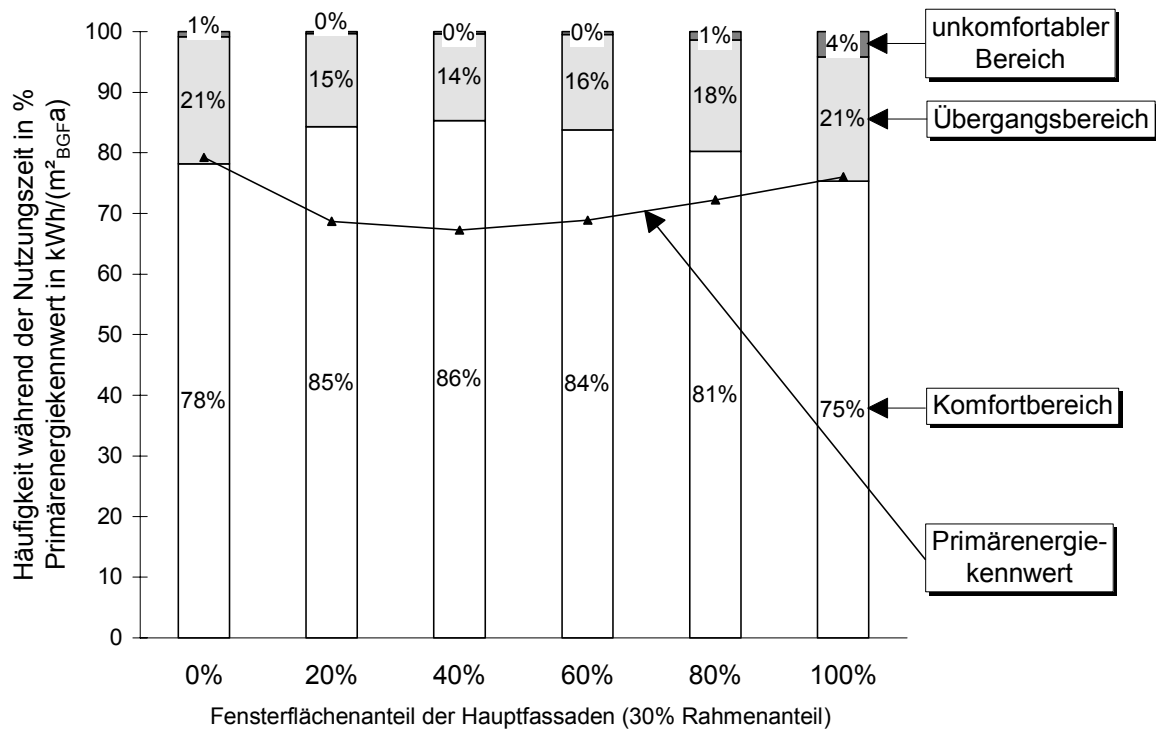


Abb. 4-17: Einfluss des Fensterflächenanteils auf Raumkomfort und Primärenergiekennwert im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Wird der Fensterflächenanteil von 0 % ausgehend vergrößert, verbessern sich zunächst sowohl der Primärenergiekennwert des Gebäudes als auch die Behaglichkeit in den Südbüros. Bei einem Fensterflächenanteil von 40 % wird für beide Größen ein Optimum erreicht. Steigt der Fensterflächenanteil über diesen Wert hinaus an, verschlechtert sich die Situation wieder. Im Folgenden sollen die Gründe für diesen Verlauf aufgezeigt werden, wobei zuerst die Behaglichkeit und anschließend der Primärenergiekennwert diskutiert wird.

Ausgangspunkt für die Diskussion der Behaglichkeit ist ein Fensterflächenanteil von 0 %. Zustände außerhalb des Komfortbereichs treten bei dieser Variante vergleichsweise häufig auf.

Verantwortlich dafür sind die hohen Werte der relativen Feuchte im Sommer. Wegen der fehlenden solaren Einträge (keine Fenster) liegen die Raumlufttemperaturen in den Büros bei dieser Variante im Sommer vergleichsweise niedrig. Bei gleicher absoluter Feuchte (Luftwechsel und Feuchteproduktion sind in allen Varianten gleich) bedingen niedrigere Raumlufttemperaturen jedoch höhere Werte der relativen Feuchte, was sich im Sommer negativ auswirkt.

Wird der Fensterflächenanteil erhöht, sinkt die relative Feuchte im Sommer und der Komfort in den Südbüros steigt an. Der optimale Raumkomfort tritt bei einem Fensterflächenanteil von 40 % auf. Hier liegt das Raumklima an 86 % der jährlichen Nutzungszeit in dem in Abb. 4-9 definierten engen Komfortbereich. Wird der Fensterflächenanteil weiter vergrößert, verschlechtert sich der Raumkomfort in den Südbüros wieder. Verantwortlich hierfür sind die nun häufiger auftretenden niedrigen Werte der relativen Feuchten im Winter und von Temperaturen über 26°C.

Insbesondere die zunehmenden Überhitzungen (nicht nur im Sommer) führen dazu, dass bei einem Fensterflächenanteil von 100 % der geringste Raumkomfort zu verzeichnen ist. Selbst der gute und richtig bediente Sonnenschutz kann die solaren Einträge bei einem derart großen Fensterflächenanteil nicht mehr im erforderlichen Umfang reduzieren. Raumlufttemperaturen über 26°C ergeben sich in dem Fall sogar bei niedrigen Außentemperaturen. Steigen die Außentemperaturen an, treten Raumtemperaturen von über 29°C auf. Dabei ist das Temperaturverhalten des hier untersuchten primärenergetisch optimierten Gebäudes noch vergleichsweise positiv. Durch die geringen internen Wärmequellen (Arbeitshilfen und Beleuchtung), den Kühleffekt durch den Erdreichwärmetauscher, die zugänglichen Speichermassen und den guten Sonnenschutz bleibt das Gebäude trotz hohem Fensterflächenanteil in Grenzen nutzbar. Ohne diese Eigenschaften würden die Temperaturen noch deutlich höher liegen.

Neben dem Raumkomfort wird durch die Größe des Fensterflächenanteils aber auch der Primärenergiekennwert des Gebäudes beeinflusst. Für eine Diskussion der Zusammenhänge ist in Abb. 4-18 der Primärenergiebedarf aufgeteilt nach Teilenergiekennwerten dargestellt.

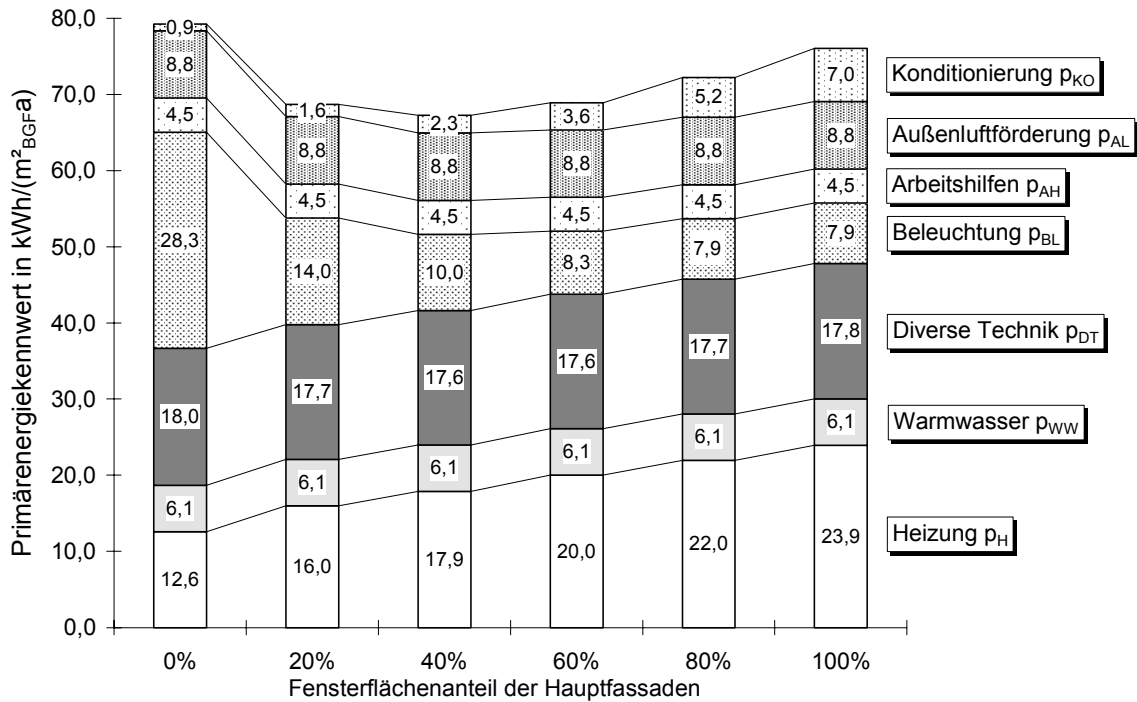


Abb. 4-18: Primärenergiekennwerte des „Passiv-Bürogebäudes“ bei unterschiedlichem Fensterflächenanteil der Hauptfassaden

Steigt der Fensterflächenanteil von 0 % an, sinkt der Primärenergiekennwert des Gebäudes zunächst ab, um dann bei einem Fensterflächenanteil von 40 % wieder anzusteigen. Diese Veränderung des Primärenergiekennwertes des Gebäudes ergibt sich als Summe der unterschiedlichen Teilenergiekennwerte. Relevante Veränderungen treten in folgenden Bereichen auf:

- Beleuchtung
- Heizung und
- Konditionierung.

Diese Punkte werden kurz diskutiert.

Sind keine Fenster in dem Gebäude vorhanden (Fensterflächenanteil 0 %), ergibt sich ein hoher Primärenergieaufwand Beleuchtung, da die Beleuchtungsanlage ständig eingeschaltet ist. Aus diesem Grund stellt sich diese - ohnehin nur theoretisch interessante - Variante primär-energetisch ungünstig dar. Steigt die Fensterfläche an, kann immer mehr des in den Büros und Nebenräumen erforderlichen Lichtbedarfs über Tageslicht gedeckt werden. Die Einschaltzeiten der Beleuchtung sinken und entsprechend reduziert sich der Primärenergiekennwert Beleuchtung. Die wesentlichen Einsparungen treten dabei im Bereich geringer Fensterflächenanteile auf. Ab einem Fensterflächenanteil von etwa 60 % wird durch die Vergrößerung der Fensterfläche keine nennenswerte Stromeinsparung bei der Beleuchtung mehr erzielt.

Im Bereich der Heizung führt ein Anstieg der Fensterfläche zu einem Anstieg des entsprechenden Primärenergiekennwertes. Dieses Ergebnis überrascht zunächst, da aus anderen Untersuchungen bekannt ist, dass Fenster mit einem sehr guten U-Wert über die Heizperiode

eine positive Energiebilanz aufweisen [Loga, Feist 1996]. Die Summe der nutzbaren solaren Wärmegewinne ist über die Heizperiode betrachtet größer als die Summe der Transmissionsverluste über die Fenster. Dies gilt aber nur für unverschattete Südfenster. Im vorliegenden Fall werden neben den Südfenstern auch die Nordfenster vergrößert und es ist ein Verschattungsfaktor von 0,88 berücksichtigt. Diese beiden Faktoren führen dazu, dass die Jahres-Energiebilanz im Mittel über alle Fenster negativ ist und der Heizenergiekennwert des Gebäudes mit zunehmender Fensterfläche ansteigt.

Der Primärenergiekennwert Konditionierung setzt sich bei der vorliegenden Ausführungsvariante aus dem Strombedarf der Ventilatoren zur freien Kühlung und Nachtlüftung zusammen. Er steigt mit zunehmender Fensterfläche an, da die vermehrten solaren Einträge über einen erhöhten Außenluftvolumenstrom weg gelüftet werden müssen. Der Luftvolumenstrom in den Büros kann bis auf einen dreifachen Außenluftwechsel erhöht werden. Entsprechend steigt der Strombedarf der Ventilatoren und damit der Primärenergiekennwert an. Positiv für die freie Kühlung wirkt sich dabei aus, dass die Außenluft beim Durchströmen des Erdreichwärmetauschers abgekühlt wird. So kann aus den Büros ein größerer Wärmestrom abgeführt werden, als wenn die Zuluft mit Außentemperatur eingeblasen würde.

Aus energetischer Sicht sind bei dem vorliegenden Beispielgebäude Fensterflächenanteile zwischen 20 % und 60 % zu empfehlen, wobei das Optimum bei 40 % liegt. Hier ist die Tageslichtausleuchtung bereits gut und die solaren Einträge führen noch nicht zu Überhitzungen. Dieser optimale Fensterflächenanteil gilt zunächst nur für die hier gewählten Randbedingungen. Er kann sich für andere Gebäude in gewissen Grenzen verschieben. Veränderungen können sich ergeben z. B.

- bei anderer Ausrichtung des Gebäudes
- bei unterschiedlichen Fensterflächenanteilen in der Süd- und Nordfassade
- unterschiedlichem Transmissionsgrad der Verglasung
- bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke und Effizienz des Beleuchtungssystems
- bei unterschiedlichen U-Werten von Fenster und/oder Außenwand
- bei unterschiedlicher Regelung und Effizienz der Ventilatoren.

In der Regel liegen sinnvolle Fensterflächenanteile jedoch in dem hier aufgezeigten Bereich.

4.5.5 Kompaktheit des Baukörpers

Die Kompaktheit eines Baukörpers hängt von der Größe und der Kubatur des Gebäudes ab. Quantifiziert wird die Kompaktheit über das so genannte A/V-Verhältnis:

$$\text{Gl. 4-9} \quad AV = \frac{A_{\text{Hülle}}}{V_{\text{Geb,brutto}}}$$

mit

AV Oberflächen zu Volumenverhältnis / A/V-Verhältnis
 $A_{\text{Hülle}}$ Summe aller Flächen der thermischen Gebäudehülle (Außenmaßbezug)
 $V_{\text{Geb,brutto}}$ beheiztes Brutto-Volumen des Gebäudes.

Die A/V-Verhältnisse von Bürogebäuden variieren in einem großen Bereich. Verantwortlich hierfür sind Unterschiede in der Kubatur und der Gebäudegröße. Um den Einfluss des A/V-Verhältnisses auf den Primärenergiebedarf darzustellen, wird basierend auf den Simulationen aus [Grimm 2000] das untersuchte Beispielgebäude schrittweise verkleinert. Verändert werden dabei Länge und Höhe des Gebäudes. Die Breite wird konstant bei 10,73 m belassen, da diese durch die Tiefe der Büros, die Breite des Flurs und die Wanddicken bestimmt wird. In

Abb. 4-19 sind die Größenverhältnisse der untersuchten Varianten schematisch dargestellt.

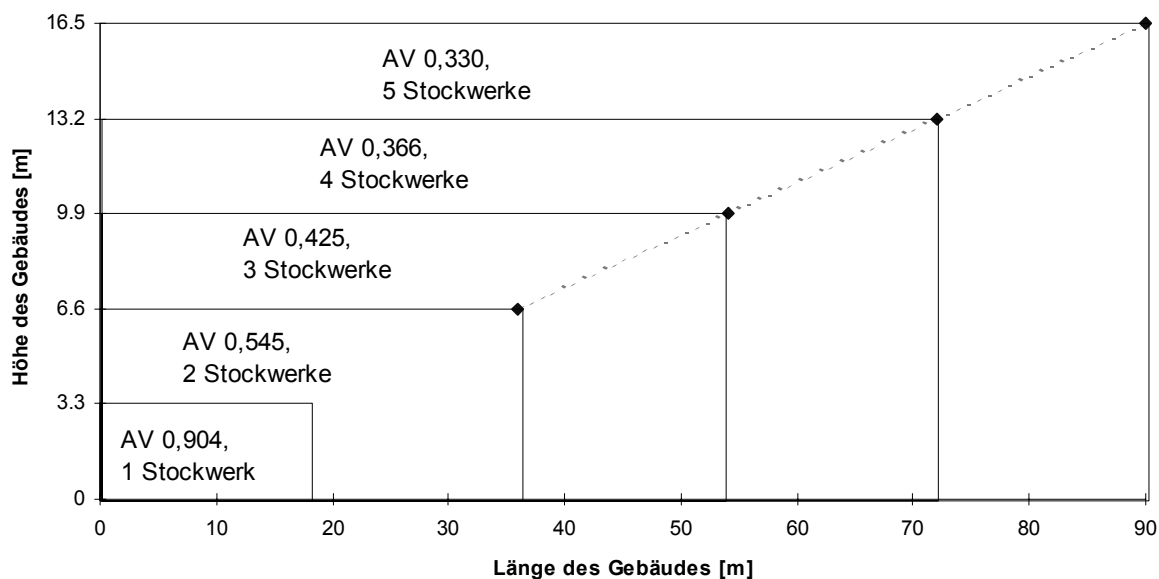


Abb. 4-19: Größenverhältnisse der untersuchten Varianten

Aufgrund der sich ändernden Proportionen des Gebäudes ist es nicht möglich, sowohl das Verhältnis der einzelnen Teilflächen (Außenwand, Fenster, Dach, Kellerdecke) der Hüllfläche als auch das Verhältnis von Hauptnutz-, Nebennutz-, Verkehrs- und Konstruktionsflächen konstant zu halten. Die realisierten Varianten sind ein Kompromiss aus beiden Anforderungen. Die Abmessungen und Flächenaufteilungen sind in Tab. 4-17 zusammengestellt.

Stockwerke	A/V Verhältnis	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Büros [m ²]	Verkehrsflächen [m ²]	Nebenträume [m ²]	NGF [m ²]	BGF [m ²]
5	0,330	90	10,73	16,5	2400	600	1400	4400	4890
4	0,366	72	10,73	13,2	1568	392	890	2850	3130
3	0,425	54	10,73	9,9	900	225	473	1598	1760
2	0,545	36	10,73	6,6	392	98	215	705	782
1	0,904	18	10,73	3,3	98	25	50	173	195

Tab. 4-17: Geometrische Abmessungen der untersuchten Varianten

Mit der Skalierung des Gebäudes geht eine Veränderung des Kanalnetzes der RLT-Anlage einher. Vereinfachend werden die Druckverluste des Kanalnetzes und damit die von den Ventilatoren zu erzeugenden Druckdifferenzen jedoch für alle Varianten gleich angenommen. Da der Gesamtdruckverlust von Einbauten wie Filter, Heizregister, Schalldämpfer und Durchlässen dominiert wird, ist diese Vereinfachung zulässig.

Den Einfluss vom A/V-Verhältnis auf den Raumkomfort in den Südbüros des Beispielgebäudes zeigt Abb. 4-20.

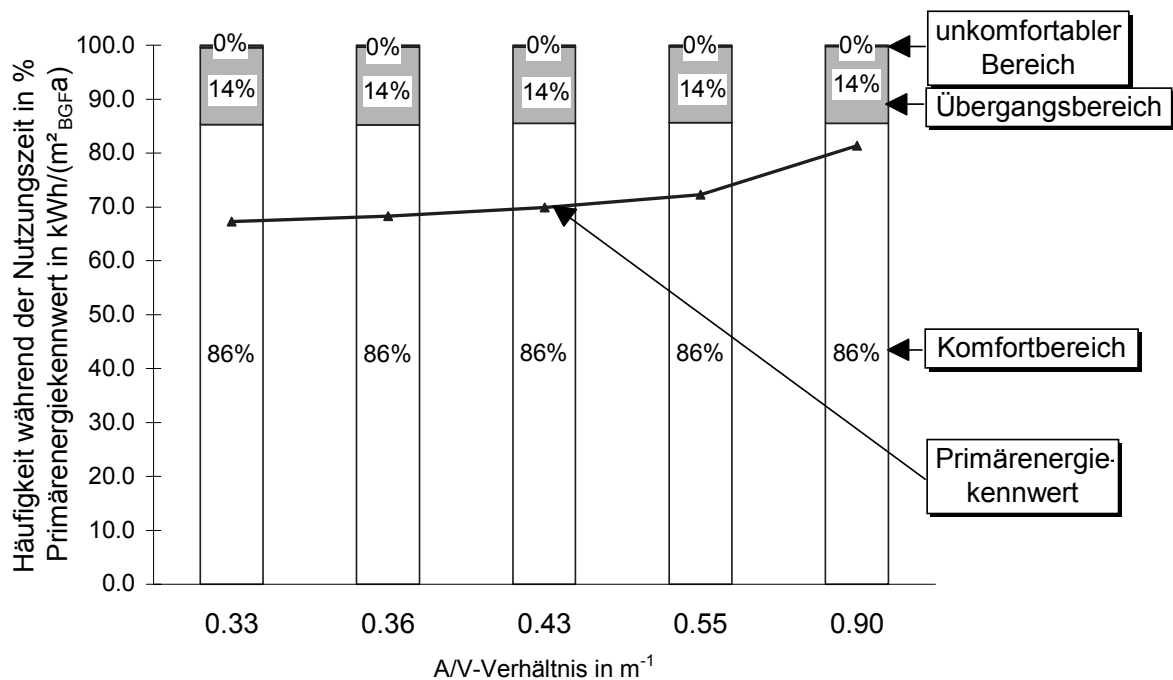


Abb. 4-20: Einfluss vom A/V-Verhältnis auf Primärenergiekennwert und Raumkomfort im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Das A/V-Verhältnis des Baukörpers (Rechteckgrundriss bei unterschiedlicher Gebäudegröße) hat keinen wesentlichen Einfluss auf den Raumkomfort in den Südbüros. Zwar ergibt sich bei genauer Betrachtung der Häufigkeitsverteilung mit zunehmenden A/V-Verhältnis ein Rückgang des sommerlichen Temperaturniveaus im freischwingenden Bereich. Dies hat aber keine Auswirkungen auf die hier dargestellte Häufigkeitsverteilung.

Zur Diskussion des Einflusses auf den Primärenergiebedarf sind die Teilenergiekennwerte in Abb. 4-21 differenziert dargestellt.

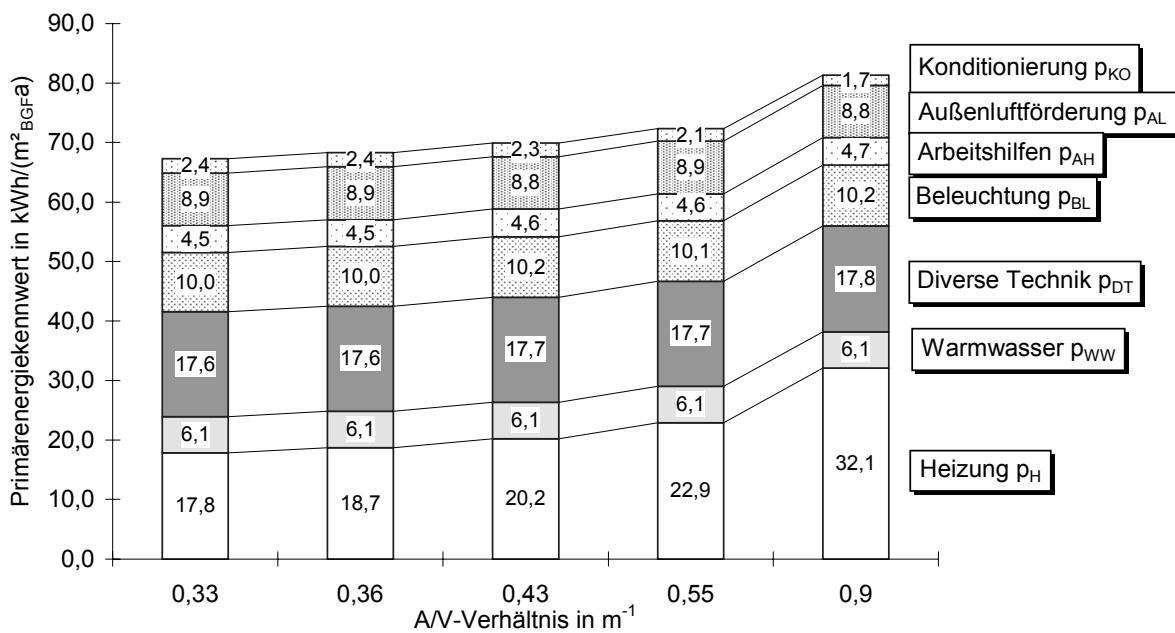


Abb. 4-21: Primärenergiekennwerte des „Passiv-Bürogebäudes“ bei unterschiedlichen A/V-Verhältnissen des Baukörpers

Wesentliche Veränderungen ergeben sich nur beim Primärenergieaufwand für die Beheizung. So führt die Zunahme des A/V-Verhältnisses von $0,33 m^{-1}$ auf $0,9 m^{-1}$ zu einem Anstieg um $14,3 kWh/(m^2_{BGFa})$ von $17,8 kWh/(m^2_{BGFa})$ auf $32,1 kWh/(m^2_{BGFa})$. Dieser Anstieg ergibt sich aufgrund der Zunahme der auf das Volumen (und bei gleicher Geschosshöhe damit auch auf die Grundfläche) bezogenen Hüllfläche. Eine größere Hüllfläche je Gebäudevolumen / Grundfläche führt zu höheren Transmissionsverlusten und die zu einem höheren Primärenergieaufwand Heizung.

Während bei dem A/V-Verhältnis von $0,33 m^{-1}$ der bei Passiv-Wohngebäuden geltende maximale Heizwärmebedarf von $15 kWh/(m^2_{NGFa})$ gerade eingehalten werden kann, ist dies bei größeren A/V-Verhältnissen nicht mehr möglich. Verantwortlich hierfür sind die höheren Werte des Luftwechsels und die gesonderte Belüftung der Nebennutzflächen und Flure in den hier untersuchten Varianten.

Der Aufwand für „Diverse Technik“ steigt leicht an, da sich bei höherem Heizwärmebedarf der Stromverbrauch der Umwälzpumpen erhöht. Die Veränderungen im Bereich Beleuchtung,

Arbeitshilfen und Außenluftförderung ist auf die oben erwähnten geringen Unterschiede im Anteil der Bürofläche zurückzuführen.

Der Primärenergiekennwert Konditionierung sinkt leicht mit zunehmendem A/V-Verhältnis. Aufgrund der zunehmenden spezifischen Hüllfläche (s. o.) kann im Sommer in Hitzeperioden mehr Wärme durch Transmission aus dem Gebäude abgeführt werden. Freie Kühlung und Nachtlüftung wird dadurch in geringerem Umfang erforderlich, was sich in einem geringeren Stromverbrauch der Ventilatoren und in einem geringeren Primärenergiekennwert widerspiegelt.

Die Zunahme des A/V-Verhältnisses von $0,33 \text{ m}^{-1}$ auf $0,9 \text{ m}^{-1}$ führt zu einem Anstieg des Primärenergiekennwertes des gesamten Gebäudes von $67,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ auf $81,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$. Betrachtet man die extremen Größenunterschiede zwischen beiden Varianten, lässt sich schlussfolgern, dass die Realisierung eines extrem geringen Primärenergiebedarfs unabhängig vom A/V-Verhältnis möglich ist.

4.5.6 Höhe des Außenluftwechsels

Die DIN 1946 definiert einen personen- und einen flächenbezogenen Mindestaußenluftstrom für unterschiedliche Nutzungssituationen. Für die hier untersuchten Einzelbüros beträgt der Mindestaußenluftstrom $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$. Bezogen auf eine lichte Raumhöhe von 3 Metern entspricht dies einem 1,3-fachen Luftwechsel in den Büros. Dieser Wert wurde in den bisherigen Simulationen zugrunde gelegt. Er reicht aus, um die von Personen abgegebenen Verunreinigungen abzuführen und so eine ausreichende Luftqualität sicherzustellen. Kommen weitere Luftverunreinigungen durch Raucher oder überdurchschnittliche hohe Emissionen aus Baustoffen und Einrichtungsgegenständen hinzu, ist ein höherer Luftwechsel zu empfehlen.

Welcher Luftwechsel in dem jeweiligen Einzelprojekt erforderlich ist, muss anhand der konkreten Randbedingungen entschieden werden. Dabei sollte der Beseitigung der Ursachen, d. h. verringern der Verunreinigungslast, der Vorrang vor der Bekämpfung der Symptome - z. B. durch Erhöhen des Luftwechsels - gegeben werden. Konkret bedeutet dies, dass in der Planung Maßnahmen zur Vermeidung von Luftverunreinigungen möglichst weitgehend ausgeschöpft werden sollten. Hierzu zählen z. B. die Einrichtung von Raucherbereichen oder die Verwendung von Baustoffen und Einrichtungsgegenständen, die nur im geringen Maße Luftverunreinigungen abgeben.

Der Einfluss der Außenluftwechsel auf den Primärenergiekennwert des gesamten Gebäudes und auf die Behaglichkeit in den Südbüros wird im Folgenden dargestellt. Dabei wird der minimale und der maximale Luftwechsel in den Büros schrittweise erhöht (Anlage mit variablem Volumenstrom). Der Luftwechsel in den Fluren und Nebenräumen wird im gleichen Verhältnis angehoben wie der Mindestluftwechsel in den Büros. Die in der Simulation angenommenen Luftwechselzahlen sind in Tab. 4-18 dokumentiert.

Variantenbezeichnung		n = 1,3	n = 2	n = 3	n = 6
		Luftwechsel in h ⁻¹			
Büro	Min	1,3	2	3	6
	Max	3	4	6	6
Flur		0,4	0,6	0,9	1,8
Nebenräume		0,4	0,6	0,9	1,8

Tab. 4-18: In den Berechnungen angenommener Luftwechsel

Die Veränderung des Primärenergiekennwertes und des Raumkomforts in den Südbüros zeigt Abb. 4-22.

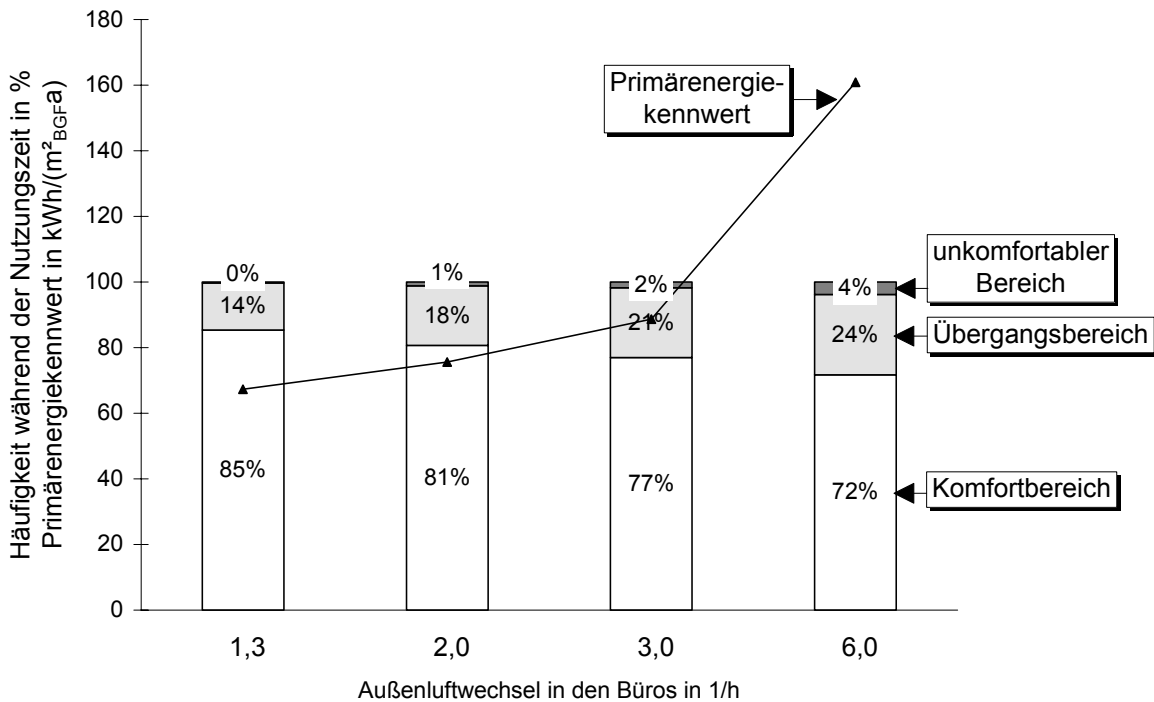


Abb. 4-22: Einfluss des Luftwechsels auf Raumkomfort und Primärenergiekennwert im „Passiv-Bürogebäude“ (Definition der Behaglichkeitsbereiche entsprechend Abb. 4-9)

Eine Erhöhung des Luftwechsels in den Büros führt zu einem Anstieg des Primärenergiekennwertes sowie einer Verschlechterung der Behaglichkeit in den Südbüros. Zunächst sollen kurz die Gründe für die Verschlechterung der Behaglichkeit genannt werden. Der Anstieg des Primärenergiekennwertes wird weiter unten anhand von Abb. 4-23 diskutiert.

Verantwortlich für Zustände außerhalb des Komfortbereiches sind zu geringe Werte der relativen Feuchte im Winter und zu hohe Werte im Sommer. Beides wird durch die Erhöhung des Luftwechsels verstärkt.

So sinkt die relative Feuchte im Winter bei ansteigendem Luftwechsel, da die Raumluft über die erhöhten Zufuhr von trockener Außenluft stärker entfeuchtet wird. Im Sommer steigen hingegen die Werte der relativen Feuchte mit zunehmendem Luftwechsel an. In dieser Jahreszeit enthält die Außenluft häufig mehr Feuchte (Wasserdampf) als die Raumluft. Eine Erhöhung des Luftwechsels führt deswegen im Sommer zu einer Befeuchtung der Büros, was nicht erwünscht ist. Positiv auf die Feuchtesituation wirkt sich dabei die Entfeuchtung der Zuluft im Erdreichwärmetauscher aus. Ein Teil der Außenluftfeuchte kondensiert beim Durchströmen der Erdrohre aus und wird so den Büros nicht mehr zugeführt (um eventuelle Verkeimungen beheben zu können, muss der Erdreichwärmetauscher mit Revisionsöffnungen ausgestattet sein). Negativ auf die Raumluftfeuchte wirkt sich andererseits die vorkühlende Wirkung des Erdreichwärmetauschers aus. Da die Raumtemperaturen bei erhöhtem Luftwechsel im Sommer weniger stark ansteigen, ergeben sich bei gleicher absoluter Feuchte höhere Werte der relativen Feuchte. Die in Abb. 4-22 dargestellte Situation ist die Überlagerung der unterschiedlichen Effekte.

Neben der Behaglichkeit hat eine Erhöhung des Luftwechsels Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes. Die Veränderung der einzelnen Teilenergiekennwerte zeigt Abb. 4-23.

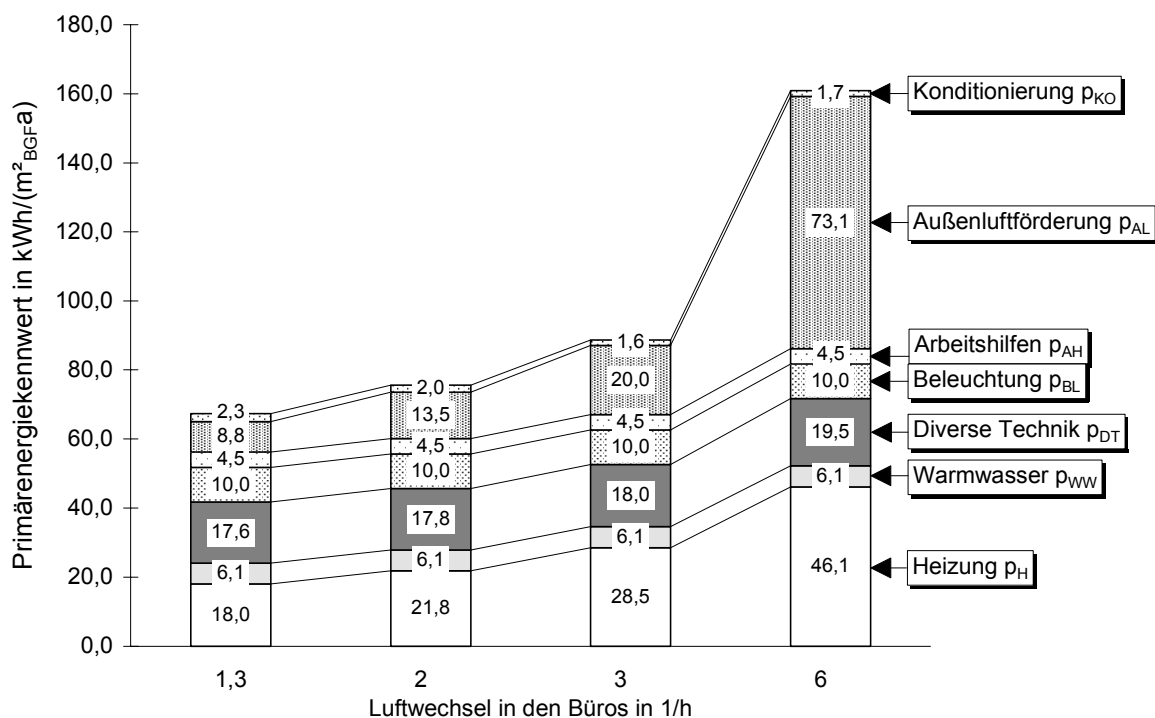


Abb. 4-23: Primärenergiekennwerte des „Passiv-Bürogebäudes“ bei unterschiedlichen Werten des Luftwechsels

Die Erhöhung des Luftwechsels führt zu einer deutlichen Erhöhung des Primärenergiebedarfs. Liegt der Primärenergiekennwert des Gebäudes in der Basisvariante ($n = 1,3$) bei $67 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ steigt er bei einem 6-fachen Luftwechsel in den Büros ($n = 6$) auf einen Wert von $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ an. Verantwortlich hierfür ist in erster Linie der Anstieg des Primärenergiebedarfs für Heizung und Außenluftförderung.

Der Primärenergiekennwert Heizung nimmt mit größer werdendem Luftwechsel zu, da die Lüftungswärmeverluste ansteigen. Dieser Anstieg wird im vorliegenden Fall durch den vorgeschalteten Erdreichwärmetauscher und die Wärmerückgewinnung mit einer Rückwärmzahl von 75 % deutlich reduziert. Ohne diese beiden Komponenten läge der Primärenergiekennwert Heizung bei der Variante $n=6$ über $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$.

Ein deutlicher Anstieg ist bei dem Primärenergiekennwert Außenluftförderung, d. h. bei dem Strombedarf der Ventilatoren, zu verzeichnen. Auffällig ist dabei die überproportionale Zunahme bei einer Erhöhung des Mindestluftwechsels in den Büros von 3 h^{-1} auf 6 h^{-1} . Verantwortlich hierfür ist neben dem Anstieg des zu fördernden Luftvolumenstroms die Dimensionierung des Kanalnetzes. Die Strömungsgeschwindigkeit im System wird durch den Querschnitt der Kanäle und den Volumenstrom bestimmt. Wird die Anlage im Teillastbetrieb gefahren, sinkt der Volumenstrom und damit die Strömungsgeschwindigkeit. Dies hat eine überproportionale Reduktion der Druckverluste und des Stromverbrauchs der Ventilatoren zur Folge. Unter Berücksichtigung der hier gewählten elektronischen Regelung der Ventilatoren ergibt sich etwa eine quadratische Abnahme des Stromverbrauchs mit der Strömungsgeschwindigkeit.

Im Simulationsmodell ist angenommen, dass das Kanalnetz entsprechend dem maximalen Luftvolumenstrom ausgelegt wird. In der Regel fördert die Lüftungsanlage jedoch nicht den maximalen, sondern den Mindestluftwechsel, d. h. sie fährt im Teillastbetrieb. Tab. 4-19 zeigt, welcher prozentuale Anteil des Auslegungsvolumenstroms im Teillastbetrieb (Mindestluftvolumenstrom) bei den hier untersuchten Varianten gefördert wird.

	Mindestluftwechsel h^{-1}	Auslegungsluft- wechsel h^{-1}	Anteil des Mindest- am Auslegungsluftwechsel
Basisvariante	1,3	3	55 %
Variante $n=2$	2	4	50 %
Variante $n=3$	3	6	50 %
Variante $n=6$	6	6	100 %

Tab. 4-19: Prozentualer Anteil des Mindest- am Auslegungsluftwechsel

Während bei den Varianten $n=1,3$, $n=2$ und $n=3$ die Luftmenge im Teillastbetrieb auf 50 bis 55 % heruntergefahren wird, wird bei der Variante $n=6$ immer der Auslegungsluftwechsel gefördert. Dies bedingt höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeiten, wodurch die Druckver-

luste und damit der Strombedarf der Ventilatoren ansteigen. Dies spiegelt sich in der verstärkten Zunahme des Primärenergiekennwertes Außenluftförderung bei der Variante n=6 wider.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass auch beim „Passiv-Bürogebäude“ Luftwechsel über dem Mindestwechsel durchaus realisiert werden können. Wichtig ist dabei aber die großzügige Dimensionierung des Kanalnetzes und eine geeignete Regelung der Ventilatoren.

4.6 Modellprojekte

Derzeit existieren bereits Gebäude, die bezüglich des energetischen Standards der hier simulierten Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ ähneln. Im Folgenden werden zwei Gebäude kurz vorgestellt und die wichtigsten Kenndaten tabellarisch zusammengestellt [SolarBau Monitor 2000], [Hennings/Knissel 2001]. Anschließend werden die ersten gemessenen Verbrauchswerte den simulierten Primärenergiekennwerten gegenübergestellt. Beide vorgestellten Objekte werden gefördert im Rahmen des Teilkonzepts 3 des Förderprogramms „solaroptimiertes Bauen“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

4.6.1 Verwaltungsgebäude Wagner & Co

Das neue Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co Solartechnik GmbH in Cölbe (bei Marburg) weist einen Rechteckgrundriss mit einer abgerundeten Stirnseite und drei Vollgeschossen auf (siehe Abb. 4-24). Es beherbergt neben den Büroarbeitsplätzen, die in der Regel mit PCs ausgestattet sind, den Versand sowie eine Kantine mit Küche. Das Gebäude wurde im Jahr 1998 fertig gestellt und bezogen.

Das Energiekonzept (Tab. 4-20) wurde vom Passivhaus Institut in Darmstadt entwickelt und in der Umsetzung betreut. Das Gebäude weist einen sehr hohen Wärmeschutz, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und vorgeschaltetem Erdreichwärmetauscher sowie ein effizientes Beleuchtungssystem auf [Schweizer 1999].

Im Vergleich zu der hier untersuchten Variante „Passiv-Bürogebäude“ nicht umgesetzt wurde die Zonierung der Beleuchtungsstärke und der hohe Effizienzstandard im Bereich der



Abb. 4-24: Ansicht der Verwaltungsgebäudes des Firma Wagner & Co in Cölbe bei Marburg

Arbeitshilfen. Zudem erfolgt die Heizwärmeverteilung in dem Gebäude der Firma Wagner & Co nicht über Heizkörper (Radiatoren) sondern über die Lüftungsanlage. Ein Teil der Energie für Heizung und Warmwasser wird regenerativ über thermische Sonnenkollektoren erzeugt und in einem zentral im Gebäude aufgestellten saisonalen Speicher für die winterliche Heizzeit zwischengespeichert. Als Zusatzheizung ist ein Blockheizkraftwerk installiert. Die anfallende Überschusswärme wird an ein Nachbargebäude abgeführt.

Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co	
<u>allgemein</u>	Standort: Zimmermannstr. 12, 35091 Cölbe (Marburg) Ansprechpartner: Herr Schweizer, Wagner & Co, Cölbe Baujahr: 1998 Grundriss: Rechteckgrundriss mit einer abgerundeten Stirnseite Brutto-Grundfläche: 2180 m ² ; Netto-Grundfläche: 1948 m ²

Baukörper: Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co.				
	Außenwand	Dach	Kellerdecke	Fenster
Dämmstoffdicke [cm]	30	40	24	$g_L \approx 0,42$
U-Wert [W/(m ² K)]	ca. 0,13	ca. 0,1	ca. 0,14	$U_F = 0,8$
Sonnenschutz	durch außen liegende Verschattung			
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • A/V-Verhältnis: 0,36 • keine abgehängte Decke • Luftdichtheit: sorgfältiges Dichtheitskonzept, $n_{50} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ 			

Nutzung: Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co.	
Hauptsächlich Büronutzung, Belegungsdichte ca. 15 m ² _{HNF} pro Person daneben: Versandbereich ca. 250 m ² , Speisesaal mit Küche ca. 350 m ² ; Ausstellungsfläche im EG Nutzungszeit: Werktags von 7.00 bis 18.00 Uhr	
Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Während der Nutzungszeit: 22 °C (in den Büros) • keine Nacht- bzw. Wochenendabsenkung
Feuchte	nicht begrenzt
Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> • Spiegelrasterleuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten • über Tageslicht-geführtes Dimmsystem kontinuierlich geregelt
Arbeitshilfen	handelsübliche Geräte

HLK-Anlage: Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co.	
Regelung	<ul style="list-style-type: none"> • DDC-Regelung und Daten-Bussystem zur Regelung von: Lüftungsanlage, Solaranlage, Heizregister, Heiz-Kraft-Anlage, Sonnenschutz-Jalousien, Beleuchtung und Nachtlüftung (Fenstermotoren)
Heizung	<ul style="list-style-type: none"> • thermische Solaranlage: Kollektorfläche 65 m², Speicher 85 m³, • Blockheizkraftwerk: 12 kW thermisch, 5 kW elektrisch • Wärmeverteilung im Gebäude über die Zuluft
Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Zu- und Abluftanlage mit Erdreichwärmetauscher und Wärmerückgewinnung • Wärmerückgewinnung: vier Kreuzstromwärmetauscher ($\Phi_{WRG} = 0,8$) • Luftwechsel: Maximalwert 1-fach h⁻¹, Durchschnittswert 0,5-fach h⁻¹ (bezogen auf das gesamte Gebäudevolumen). • Erdreichwärmetauscher: Länge = 35 m, Durchmesser = 0,5 m, Tiefe = 1,5 m, vier parallele Rohre • Nachtlüftung über Schwerkraft durch motorisch öffnbare Fenster und Abluftöffnungen im Dachbereich
Klima	<ul style="list-style-type: none"> • Kälte: nicht vorhanden • Entfeuchtung: nicht vorhanden • Befeuchtung: nicht vorhanden

Tab. 4-20: Wichtigste Kenndaten des Verwaltungsgebäudes der Firma Wagner & Co.

4.6.2 Verwaltungsgebäude Lamparter

Das Passiv-Bürogebäude Lamparter wurde im Jahr 1999 fertig gestellt. Es besitzt einen Rechteckgrundriss mit einem zurückgesetzten Dachgeschoss. Die beheizte Netto-Grundfläche des Gebäudes beträgt 1000 m². Das Energiekonzept wurde vom Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme aus Freiburg entwickelt. Es weist deutliche Gemeinsamkeiten mit der Variante „Passiv-Bürogebäude“ auf. So sind Dämmstoffdicken zwischen 24 bis 35 cm realisiert. Die Fenster sind mit 3-fach-Wärmeschutzverglasung ausgerüstet, wobei im Unterschied zum Simulationsmodell konventionelle Holzfensterrahmen verwendet wurden. In Verbindung mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und vorgeschaltetem Erdreichwärmetauscher wird ein sehr geringer Primärenergiebedarf für die Beheizung erreicht.

Zur guten Tageslichtausleuchtung sind die Fenster mit einem deckenbündigen Oberlichtband ausgerüstet. In Verbindung mit an die Belichtungssituation angepassten Bürotiefen und einem außen liegenden Sonnenschutz, dessen Lamellenstellung im Bereich des Oberlichtbandes gesondert gewählt werden kann, können die Büros tagsüber weitgehend ohne zusätzliches Kunstlicht genutzt werden. Die so erzielten geringen Einschaltzeiten der Beleuchtung in Verbindung mit einem effektiven Beleuchtungssystem sichern einen geringen Primärenergieaufwand für die Beleuchtung.



Abb. 4-25: Ansicht der Verwaltungsgebäudes des Ingenieur- und Vermessungsbüros Hans Lamparter GbR in Weilheim a. d. Teck [Foto: D. Hennings]

Im Unterschied zur Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ wurden keine Zonierung der Beleuchtungsstärke vorgenommen. Auch wurden der Stromverbrauch der Arbeitshilfen nicht bewusst minimiert. Da das Gebäude ein Vermessungsbüro beherbergt, sind 50 % der Arbeitsplätze mit CAD-geeigneten Rechnern ausgestattet. Beheizt wird das Gebäude, wie das Gebäude Wagner & Co, über die Zuluft. Auf Heizkörper und Wärmeverteilungen konnte so verzichtet werden. Ergänzt werden die Maßnahmen zur Energieeinsparung um eine kleine thermische Solaranlage und eine Photovoltaikanlage.

Verwaltungsgebäude Lamparter	
<u>allgemein</u>	Standort: Bahnhofstraße 4; 73235 Weilheim a. d. Teck Ansprechpartner: Herr Kuckluck-Rothfuß; Ingenieur- und Vermessungsbüro Hans Lamparter GbR; Weilheim a. d. Teck Baujahr: 1999 Grundriss: Reckteckgrundriss Brutto-Grundfläche: ca. 1150 m ² ; beh. Netto-Grundfläche: 1000 m ²

Baukörper: Verwaltungsgebäude Lamparter				
	Außenwand	Dach	Kellerdecke	Fenster
Dämmstoffdicke [cm]	24	35	18	$g_{\perp} \approx 0,6$
U-Wert [W/(m ² K)]	ca. 0,15	ca. 0,1	ca. 0,16	$U_F = 1,1$
Sonnenschutz	durch außen liegende Verschattung			
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • A/V-Verhältnis: 0,3 • keine abgehängte Decke • Luftdichtheit: sorgfältiges Dichtheitskonzept, $n_{50} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ 			

Nutzung: Verwaltungsgebäude Lamparter	
Büronutzung, Belegungsdichte ca. 17 m ² _{HNF} pro Person Nutzungszeit: Werktags von 7 bis 18 Uhr	
Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Während der Nutzungszeit: 20 - 22 °C (in den Büros) • Nacht- bzw. Wochenendabsenkung werden realisiert
Feuchte	nicht begrenzt
Beleuchtung (Büros)	<ul style="list-style-type: none"> • indirekt strahlende Leuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten • über Tageslicht-geführtes Dimmsystem kontinuierlich geregelt • Zweigeteilter Sonnenschutz; außen liegendes Lichtschwert zur Lichtlenkung
Arbeitshilfen	handelsübliche Geräte; 50 % als CAD-Arbeitsplätze

HLK-Anlage: Verwaltungsgebäude Lamparter	
Regelung	<ul style="list-style-type: none"> • DDC-Regelung und EIB-Bussystem zur Regelung von: Lüftungsanlage, Heizregister, Sonnenschutz-Jalousien, Beleuchtung und Nachtlüftung (Fenstermotoren für Abluftöffnung im Dach)
Heizung	<ul style="list-style-type: none"> • Gas-Brennwertkessel • Wärmeverteilung im Gebäude über die Zuluft
Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Zu- und Abluftanlage mit Erdreichwärmetauscher und Wärmerückgewinnung • Wärmerückgewinnung ($\Phi_{WRG} = 0,85$) • Konstanter Außenluftvolumenstrom von 2000 m³/h; entspricht etwa 0,7-fach h⁻¹ bezogen auf das gesamte Netto-Gebäudevolumen • Erdreichwärmetauscher: 2 Rohre mit je 90 m Länge • Nachtlüftung über thermischen Auftrieb durch manuell geöffnete Fenster und Abluftöffnungen im Dachbereich
sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • PV-Anlage mit 8 kW (Peak) • kleine thermische Solaranlage (4 m²) für Warmwasser

Tab. 4-21: Wichtigste Kenndaten des Verwaltungsgebäudes der Lamparter

4.6.3 Vergleich der gemessenen Verbräuche mit den Simulationsrechnungen

In beiden vorgestellten Projekten wird das Betriebsverhalten 2 Jahre lang messtechnisch erfasst. Im Gebäude Wagner & Co führt die messtechnische Begleitung der Fachbereich Physik der Uni Marburg, im Gebäude Lamparter der Fachbereich Bauphysik der Fachhochschule Stuttgart durch. Die ersten gemessenen Energieverbräuche liegen für die Gebäude vor. Sie werden im Folgenden den theoretisch simulierten Primärenergiekennwerten gegenübergestellt. Dies gibt Hinweise darauf, ob die in den Simulationen getroffenen Annahmen plausibel sind und die aufgezeigte Primärenergieeinsparung in der Praxis tatsächlich erzielt werden kann.

Die Verbrauchsdaten der Gebäude sind [Wagner et al. 2001] und [Seeberger 2001] entnommen. Um einen Vergleich zu den theoretischen Berechnungen zu ermöglichen, müssen die ausgewiesenen Messergebnisse modifiziert werden.

1. Die Kennwerte werden über den Faktor 0,87 auf die Brutto-Grundfläche umgerechnet.
2. Im Gebäude Wagner & Co wird als Wärmeerzeuger ein Gas-Brennwertkessel anstatt des BHKW Moduls und des aktiv solaren Heizsystems angenommen (Jahresnutzungsgrad Heizung: 0,85; Jahresnutzungsgrad Warmwasser: 0,5).
3. Die thermische Solaranlage wird bei beiden Gebäuden beim Primärenergieaufwand Warmwasser nicht berücksichtigt.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich die in Abb. 4-26 dargestellten Primärenergiekennwerte im Vergleich zu den Simulationsrechnungen. Im Rahmen der Diskussion werden Gründe für Differenzen in den Primärenergiekennwerten genannt. Diese sind nur als erster Hinweis zu verstehen. Eine differenzierte Analyse steht noch aus.

Der gemessene Primärenergieaufwand Heizung und Warmwasser liegt in beiden Projekten unter dem simulierten Wert. Die aufgezeigte Primärenergieeinsparung kann damit erreicht oder sogar unterschritten werden. Noch nicht berücksichtigt ist dabei, dass der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser im Gebäude Wagner & Co zu 42 % durch die thermische Solaranlage gedeckt wird und so primärenergetisch nicht wirksam wird. Im Gebäude Lamparter können ebenfalls 93 % des Wärmebedarfs für Warmwasser durch die thermische Solaranlage gedeckt werden.

Bei der Beleuchtung liegt der gemessene Verbrauchswert im Gebäude Lamparter mit 19,6 kWh/(m²_{BGF}a) über dem simulierten Primärenergieaufwand von 10 kWh/(m²_{BGF}a). Verantwortlich für die Differenz kann der Verzicht auf eine Zonierung der Beleuchtungsstärke im realisierten Gebäude sein. Ohne diese errechnet sich in den Simulationen ein Primärenergiekennwert von etwa 17 kWh/(m²_{BGF}a) (siehe „Niedrigenergie-Bürogebäude“ in [Knissel 1999]).

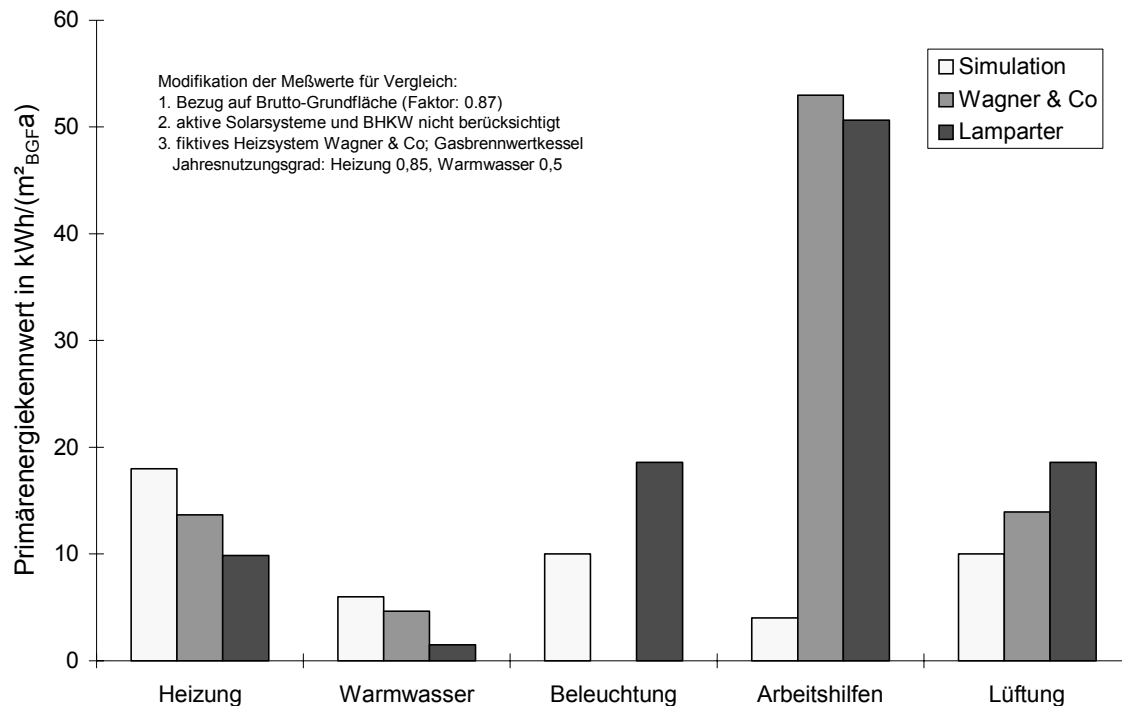


Abb. 4-26: Vergleich der berechneten Primärenergiekennwerte mit den Verbrauchsdaten (leicht modifiziert) realer Gebäude

Ähnliche Unterschiede ergeben sich im Primärenergiekennwert Lüftung. Trotz vergleichbarer Luftwechsel betragen die gemessenen Primärenergiekennwerte 15 bzw. 19 kWh/(m²_{BGFa}). Der simulierte Wert liegt mit 10 kWh(m²_{BGFa}) um 5 bis 9 kWh(m²_{BGFa}) darunter.

Für das Gebäude Wagner & Co könnten die Differenzen in der unterschiedlichen Laufzeit der Lüftungsanlage begründet liegen. Während die Anlage des Gebäudes Wagner & Co kontinuierlich betrieben wird, wird in den Simulationsrechnungen eine Nacht- und Wochenendabschaltung vorgenommen. Wird dies berücksichtigt, stimmen die beiden Werte gut überein.

Im Gebäude Lamparter wird eine Nacht- und Wochenendabschaltung der Lüftungsanlage vorgenommen, so dass hieraus die Unterschiede nicht erwachsen. Eine Erklärung für die Differenzen könnte sein, dass es sich bei der Anlage des Gebäudes Lamparter um eine Konstant-Volumenstromanlage handelt, die immer mit dem Auslegungsvolumenstrom betrieben wird. Bei der Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ ist hingegen eine variable Volumenstromanlage berücksichtigt, die auf einen 3-fachen Luftwechsel ausgelegt ist, aber in der Regel mit einem 1,3-fachen Luftwechsel (in den Büros) betrieben wird. Damit läuft diese Anlage die meiste Zeit im Teillastbetrieb, wodurch geringere Strömungsgeschwindigkeiten in den Lüftungskanälen auftreten. Diese geringeren Geschwindigkeiten führen zu niedrigeren Reibungsverlusten und damit zu einem verminderten Stromverbrauch der Ventilatoren (siehe hierzu auch Abschnitt 4.5.6). Dies kann zu einer Reduktion des Primärenergiekennwertes in der Größenordnung von bis zu 40 % führen.

Wesentliche Differenzen gibt es im Primärenergiekennwert Arbeitshilfen. Während in den Simulationsrechnungen ein Wert von 4 kWh(m²_{BGFa}) ausgewiesen wird, zeigen die Messungen im Gebäude Lamparter einen Primärenergieaufwand von 51 kWh(m²_{BGFa}), im Gebäude

Wagner & Co von $53 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$. Die gemessenen Werte liegt sogar noch deutlich über dem für das „Standard-Bürogebäude“ ermittelten Wert für ineffiziente Arbeitshilfen von $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$.

Ursache für den hohen Stromverbrauch kann im Gebäude Lamparter die Ausrüstung mit CAD-Arbeitsplätzen sein und die in der Simulation nicht berücksichtigten zentralen Geräte wie File- oder Internet-Server.

Im Gebäude Wagner & Co lässt sich der Primärenergieaufwand für alle PCs und die Kopierer zu etwa $8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ abschätzen [Spieler 2001]. Er liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie in den Simulationsrechnungen. Durch den Stromverbrauch der Kantine und insbesondere der Daten-Server (auch Telefonanlage) erhöht sich der Primärenergiekennwert jedoch um 11 bzw. 26 $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$, so dass sich bei Berücksichtigung des Stromverbrauchs der Werkstatt der gesamte Primärenergieverbrauch von $53 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGFa}})$ ergibt.

Dem stehen die extremen Annahmen der Simulationsrechnung gegenüber. Hier wurde davon ausgegangen, dass die Arbeitsplätze mit energieeffizienten Notebooks ausgerüstet sind und Kopierer, Drucker und Faxgeräte die GED-Grenzwerte [GED 1998] um 25 % unterschreiten.

Neben den nutzungsbedingten Anforderungen ist der hohe Stromverbrauch der Arbeitshilfen bei den betrachteten Objekten sicher auch auf eine nicht durchgeführte Optimierung zurückzuführen. Es wird deutlich, dass bei fehlender Optimierung der Primärenergieaufwand für die Arbeitshilfen etwa ein Drittel bis die Hälfte des gesamten Primärenergieverbrauchs des Gebäudes ausmachen kann. Diesem Bereich ist damit von Seiten der Bauherren aber auch der Fördermittelgeber zukünftig besondere Beachtung zu schenken.

Abschließend lässt sich sagen, dass die theoretischen Berechnungen weitgehend durch die gemessenen Verbrauchswerte bestätigt werden. Die Unterschiede im Bereich Heizung, Beleuchtung und Lüftung scheinen auf die jeweiligen Betriebs- und Randbedingungen zurückzuführen zu sein, wobei differenzierte Auswertungen noch ausstehen. Wesentliche Differenzen ergeben sich im Bereich der Arbeitshilfen. Hier liegen die gemessenen Verbräuche deutlich über dem simulierten Wert. Neben den nutzungsbedingten Besonderheiten der Gebäude wie CAD-Arbeitsplätzen oder einer Kantine scheint dies auf den Stromverbrauch der zentralen EDV-Server zurückzuführen zu sein, der in den Simulationsrechnungen nicht berücksichtigt wurde.

5 VORSCHLAG FÜR EIN SINNVOLLES WÄRMESCHUTZNIVEAU BEI ENERGIEEFFIZIENTEN BÜROGEBÄUDEN

Die Dämmstoffdicken der in Abschnitt 4 untersuchten Variante „Passiv-Bürogebäude“ entsprechen weitgehend den bei Passiv-Wohngebäuden üblichen Werten. In diesem Abschnitt wird untersucht, nach welchen Kriterien der Wärmeschutz von energieeffizienten Bürogebäuden sinnvoll dimensioniert werden kann.

Ausgangspunkt ist dabei die Tatsache, dass die energieeffiziente Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ einen geringen Primärenergiebedarf aufweist und gleichzeitig wirtschaftlich ist. Das überrascht zunächst, da eine derart hohe Energieeffizienz häufig nur mit hohen Kosten erreicht werden kann. Grund für die Wirtschaftlichkeit beim „Passiv-Bürogebäude“ sind neben den reduzierten Energiekosten und Wartungskosten die Einsparungen bei den Investitionskosten für die HLK-Technik. So kann aufgrund der reduzierten internen Wärmequellen ohne nennenswerten Komfortverlust auf eine aktive Kühlung verzichtet werden. Das heißt: ab einem gewissen Effizienzstandard der elektrischen Verbraucher (Beleuchtung, Arbeitshilfen) können die Investitionskosten für die aktive Kühlung eingespart werden.

Aus den Erfahrungen mit Passiv-Wohngebäuden ist bekannt, dass Ähnliches sich auch im Bereich der Heizung einstellt. Ab einem gewissen Niveau des Wärmeschutzes kann die Beheizung des Gebäudes über die Lüftungsanlage erfolgen. Damit kann auf Heizkörper verzichtet werden [Feist 1999]. Auch hier ergeben sich also ab einem gewissen Effizienzstandard des Wärmeschutzes Einsparungen bei den Investitionskosten der Haustechnik. Diese sind in der Wirtschaftlichkeitsrechnung in Abschnitt 4.4 übrigens noch nicht berücksichtigt.

Die Investitionskosteneinsparungen bei der Haustechnik tragen also entscheidend zur Wirtschaftlichkeit bei. Es stellt sich die Frage, ob die Effizienzstandards zum Erreichen dieser Einsparungen durch einfache Kenngrößen - so genannte Effizienzkenngößen - abhängig von den jeweiligen Gebäudeparametern beschrieben werden können. Als Effizienzkenngößen sind nach Vorüberlegungen folgende beide Größen geeignet:

- Eine Sommer-Kenngröße, die einen maximalen Wert der internen Wärmequellen angibt, bis zu dem auf eine aktive Kühlung verzichtet werden kann
- eine Winter-Kenngröße, die ein Wärmeschutzniveau der Gebäudehülle definiert, ab dem eine Beheizung über die Zuluft mit dem hygienischen Mindestaußenluftwechsel möglich ist.

Die Effizienzkenngößen sollten bereits in einem frühen Planungsstadium ermittelt werden können, da wichtige Entscheidungen für das zukünftige energetische Verhalten eines Gebäudes bereits durch den Gebäudeentwurf festgelegt werden. Die erforderlichen Eingabedaten müssen deswegen begrenzt sein und der Rechenaufwand deutlich unter dem für eine dynamische Gebäudesimulation liegen.

Neben der Beschreibung von energetisch und ökonomisch sinnvollen Effizienzstandards, sind derartige Effizienzkenngößen noch auf andere Weise nutzbar.

1. Sie könnten zur Optimierung von Gebäudeentwürfen herangezogen werden
2. Sie beschreiben einen hohen energetischen Standard, der vom Bauherrn genutzt werden kann, um den Planungsbeteiligten ein gewünschtes Effizienzniveau mitzuteilen
3. Sie könnten zur Beschreibung eines neuen energetischen Standards bei Bürogebäuden herangezogen werden, z. B. einem Passivhausstandard für Bürogebäude. In dem Fall müssen die beiden Effizienzkenngößen (Sommer-Kenngöße und Winter-Kenngöße) durch einen maximalen Primärenergiekennwert für den Gebäudeenergiebedarf ergänzt werden (Abb. 5-1).



Abb. 5-1: Mögliche Definition eines energetischen Gebäudestandards bei Bürogebäuden

In der vorliegenden Arbeit wird die Winter-Kenngöße näher betrachtet. Untersucht wird die Frage, nach welchen Kriterien der Wärmeschutz der Gebäudehülle von energieeffizienten Bürogebäuden dimensioniert werden sollte. Die Ausarbeitung der Sommer-Kenngöße sowie die Kopplung beider Kenngößen muss in einer weiteren Studie erfolgen.

Aufbau

Zur Konkretisierung der Winter-Kenngöße wird in einem ersten Schritt der Einfluss des Wärmeschutzes auf das sommerliche Temperaturverhalten (Abschnitt 5.1.2) und die Wirtschaftlichkeit (Abschnitt 5.1.3) untersucht. Anschließend wird eine Berechnungsvorschrift für den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle abgeleitet (Abschnitt 5.2) und diese auf das oben definierte Beispielgebäude angewandt (Abschnitt 5.4). Der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten wird über eine Sensitivitätsanalyse bestimmt (Abschnitt 5.5) und so genannte Effizienzrandbedingungen vorgeschlagen (Abschnitt 5.6), die einen hohen energetischen Standard sichern. Nach einer Konkretisierung des Dimensionierungsvorschlags an drei unterschiedlichen Gebäudeentwürfen (Abschnitt 5.6.1), werden in Abschnitt 5.7 Hinweise für die Umsetzung einer Luftheizung gegeben.

Methodik

Da die Winter-Kenngöße bereits in einem frühen Planungsstadium und mit geringem Zeitaufwand genutzt werden soll, wird die Berechnungsgleichung aus der stationären Wärmestrombilanz des Gebäudes abgeleitet. Angelehnt ist das Vorgehen und die quantitative Bestimmung der Wärmeströme an die DIN 4701 Teil 1, in der die Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden und die Grundlage zur Dimensionierung von Heizungsanlagen festgelegt sind. Der in der DIN 4701 unterstellte Mittelungszeitraum für die Wärmeströme von 2 Tagen wird für die hier durchgeführten Untersuchungen auf 7 Tage erweitert.

Die Bilanzgrenze stellt die thermische Gebäudehülle dar, d. h. es werden nicht einzelne Räume, sondern das gesamte Gebäude als integrale Einheit betrachtet.

Vereinfachungen

Die gewählte Methodik hat Vereinfachungen zur Folge, die über die in der Einleitung von Abschnitt 4 genannten Punkte hinausgehen. Diese werden im Folgenden aufgeführt und die sich daraus ableitenden Fragen genannt. Mehrere Fragen werden bereits in dieser Arbeit beantwortet, andere müssen in weiterführenden Studien untersucht werden.

- Dynamische Effekte werden bei dem stationären Ansatz nicht berücksichtigt. Konsequenzen ergeben sich für folgende Punkte.
 1. Kurzfristige Schwankungen im Außenklima (Außentemperatur, Solarstrahlung) und der Nutzung werden aufgrund der Mittelbildung nicht erfasst. Dies ist zulässig, da die hier betrachteten energieeffizienten Gebäude wegen des guten Wärmeschutzes eine große Zeitkonstante besitzen (z. B. Passiv-Bürogebäude aus Abschnitt 4: τ ca. 23 Tage), die derartige Schwankungen ausgleicht.
 2. Bei dem unterstellten intermittierenden Betrieb der Lüftungs- und damit der Heizungsanlage ist ein morgendliches Aufheizen des Gebäudes vor Beginn der Nutzungszeit erforderlich. In Anhang 12 werden Untersuchungen zu der sich ergebenden morgendlichen dynamischen Aufheizlast und dem daraus resultierenden erforderlichen Luftwechsel angestellt.
- Lokale Unterschiede in der Nutzung und der Raumtemperatur werden bei der gebäudebezogenen Betrachtung nicht berücksichtigt. In der Berechnung wird von einer einheitlichen Nutzung und einer einheitlichen Gebäudetemperatur ausgegangen. Bei der weiteren Konkretisierung der Planung müssen die Untersuchungen auf eine raumweise Betrachtung detailliert werden. Von Bedeutung sind dabei folgende Fragen:
 1. Welche Anforderungen an den Wärmeschutz ergeben sich, wenn die Winter-Bedingung auf kritische Einzelräume (z. B. Eckraum im obersten Geschoss) angewandt wird? Untersuchungen hierzu werden im Anhang A 11 durchgeführt.
 2. Können kritische Einzelräume am Morgen vor Beginn der Nutzungszeit mit der vorhandenen Heizleistung (Luftwechsel) aufgeheizt werden? Diese Frage wird im Rahmen der oben erwähnten Arbeiten in Anhang A 12 untersucht.
 3. Welche Temperaturunterschiede ergeben sich im Fall der Luftheizung zwischen Räumen mit unterschiedlich hohen internen Wärmequellen? Welches Regelkonzept ist geeignet? Hierzu werden erste Vorüberlegungen in Abschnitt 5.7 gegeben. Weitere Untersuchungen sind erforderlich.
 4. Wie werden die Unterschiede in der Heizleistung realisiert, die sich aufgrund der Lage der Räume im Gebäude ergeben (vollständig eingebaut - Eckraum unter dem Dach).
- Die konkrete anlagentechnische Realisierung der Lüftungs- bzw. Heizaufgabe wird nicht betrachtet. Erste Hinweise sind dem Abschnitt 5.7 zu entnehmen.

5.1 Winter-Bedingung zur Definition des Wärmeschutzniveaus

Bevor eine Bedingung für den Wärmeschutz von energieeffizienten Bürogebäuden festgelegt wird, soll zunächst ein Blick auf die derzeitige Praxis bei Passivhäusern geworfen werden. Bei Passiv-Wohngebäuden wird der Effizienzstandard der einzelnen Komponenten derzeit über zwei Anforderungen definiert [Feist 1996-2]. Zum einen darf der Primärenergiebedarf für Heizung, Lüftung, Warmwasser, Allgemeinstrom und Haushaltsstrom einen spezifischen Wert von $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGFA}})$ nicht überschreiten. Zum zweiten wird gefordert, dass der Heizwärmebedarf den Wert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGFA}})$ erreicht oder unterschreitet. Diese zweite Bedingung wird in der Veröffentlichung „Kostengünstige Passivhäuser in Mitteleuropa“ [Feist 1999] für Passiv-Wohngebäude ergänzt: „Ein Passivhaus ist ein Gebäude mit derart geringem Heizwärmebedarf, dass eine separate Heizung überflüssig wird: Die Wärme kann über das ohnehin vorhandene Zuluftsystem zugeführt werden.“ Vorausgesetzt wird dabei, dass über die Lüftungsanlage nur der hygienisch erforderliche Luftwechsel gefördert wird.

Der „Verzicht auf ein separates Heizsystem“ scheint auch für Bürogebäude eine geeignete Bedingung zur Dimensionierung des Wärmeschutzes, da

1. das Kriterium in direktem Zusammenhang zum Wärmeschutz der Gebäudehülle steht
2. durch den Verzicht auf ein separates Heizsystem - genauer Heizkörper und Heizungsverteilungen - die Investitionskosten sinken und sich somit ökonomische Vorteile ergeben.

In Anlehnung an [Feist 1999] wird entsprechend folgende Winter-Bedingung definiert:

Winter-Bedingung

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist so zu dimensionieren, dass das Gebäude mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom über die Zuluft beheizt werden kann.

Bei dieser Winter-Bedingung handelt es sich zunächst um eine qualitative Aussage. Quantifiziert wird die Winter-Bedingung über eine Winter-Kenngröße: den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{ges} . Dieser muss einen gewissen Grenzwert einhalten. Der Grenzwert wird als Winter-Kriterium U_{max} bezeichnet. Wird das Winter-Kriterium eingehalten, ist die Winter-Bedingung erfüllt. Stellvertretend für diese Trilogie „Bedingung - Kenngröße - Kriterium“ wird im Folgenden häufig vereinfachend von der „Winter-Kenngröße“ gesprochen.

Vor einer Konkretisierung der Winter-Bedingung wird analysiert, ob diese tatsächlich einen energetisch und ökonomisch sinnvollen Standard beschreibt. Untersucht werden die Fragen:

1. Wie stark beeinflusst ein hoher Wärmeschutz das sommerliche Temperaturverhalten? Energetisch nicht sinnvoll wäre es, wenn durch den hohen Wärmeschutz eine aktive Kühlung mit dem entsprechenden zusätzlichen Strombedarf erforderlich würde.
2. Wird die Wirtschaftlichkeit im Bereich des Wärmeschutzes wesentlich vom Verzicht auf Heizkörper und Wärmeverteilungen beeinflusst?

Zum besseren Verständnis der weiteren Untersuchungen wird zunächst jedoch das Gebäudemodell beschrieben, das den Arbeiten aus Abschnitt 5 zugrunde liegt.

5.1.1 Beschreibung des zugrunde liegenden Gebäudemodells

Auch den Untersuchungen aus Abschnitt 5 liegt ein Gebäudemodell zugrunde. Dieses entspricht weitgehend dem Beispielgebäude aus Abschnitt 4.1. Unterschiede ergeben sich jedoch in folgenden beiden Punkten:

- Die Beheizung des Gebäudes geschieht nicht über Heizkörper sondern über eine Luftheizung. Hierbei wird die Zuluft mit einer Temperatur oberhalb der Raumtemperatur eingblasen. Die Zulufttemperatur wird bei der hier vorgenommenen gebäudebezogenen Betrachtung einheitlich für das gesamte Gebäude über ein Heizregister in der Lüftungszentrale geregelt.
- Es werden nur noch die Büros (Zuluftzone) mit Außenluft versorgt (siehe Abb. 5-2). Von den Büros strömt die Luft über die Flure (Überströmzone) in die Nebenräume (Abluftzone). Die Nebenräume sind an das Abluftkanalnetz angeschlossen. Von hier wird die Abluft aus dem Gebäude abgeführt. Im Unterschied zu den Simulationsrechnungen aus Abschnitt 4 wird damit den Verkehrs-, Funktions- und Nebennutzflächen kein eigener Außenluftvolumenstrom zugeführt. Durch die „Mehrfachnutzung“ der Luft in den unterschiedlichen Lüftungszonen erlaubt dieses Konzept die Sicherstellung einer guten Raumluftqualität bei geringem Außenluftvolumenstrom. Da Passiv-Wohngebäude in der Regel dieses Lüftungskonzept aufweisen [Feist1996-1], wird es im Folgenden auch als „Passivhaus-Lüftungskonzept“ bezeichnet.

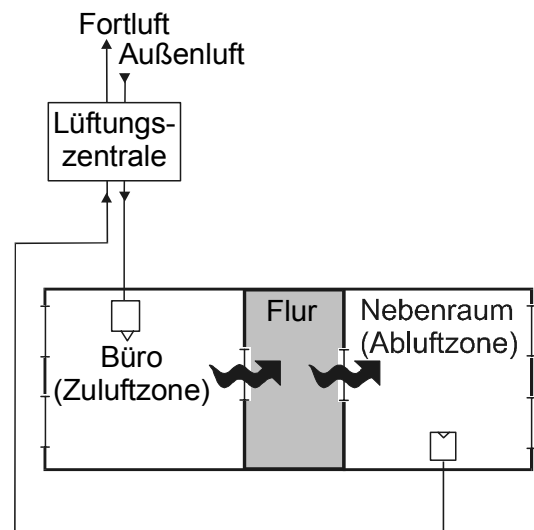


Abb. 5-2: Skizze des angenommenen Lüftungskonzepts (Passivhaus-Lüftungskonzept)

Zu beachten ist, dass bei der Anwendung dieses Lüftungskonzepts in Bürogebäuden Fragen des Brand- und des Schallschutzes gelöst werden müssen, was den Einbau von Brandschutzklappen bzw. schallgedämmten Überströmöffnungen erforderlich machen kann. Zudem müssen Raucherbereiche (Abluftzone) in dem Gebäude definiert werden. Hier müssen in Zukunft noch praxistaugliche Lösungen für die Realisierung entwickelt und dargestellt werden.

In Abb. 5-3 sind die Wärmeströme grafisch dargestellt und bezeichnet.

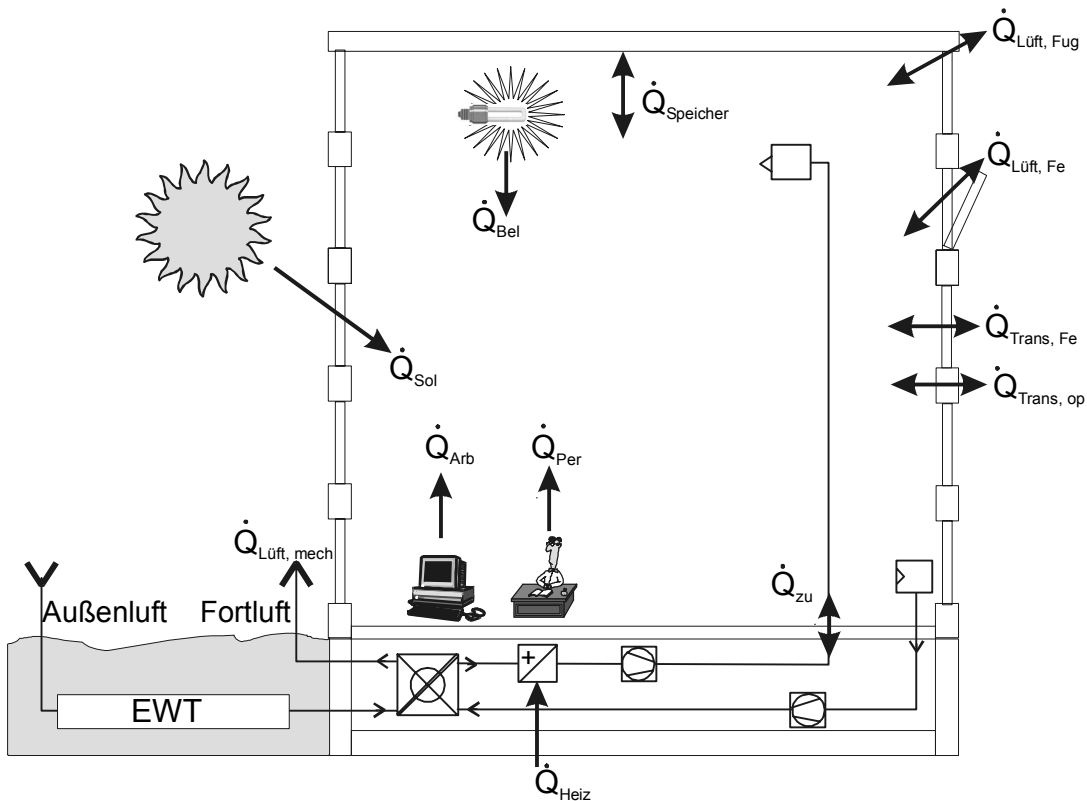


Abb. 5-3: Schematische Darstellung der Wärmeströme einem Bürogebäude mit Luftheizung

Unterschiede zu Abb. 4-4 bestehen nur im Bereich der Beheizung. \dot{Q}_{Heiz} tritt nicht an den Heizkörpern auf (nicht vorhanden) sondern im Heizregister.

\dot{Q}_{Heiz} vom Heizregister abgegebener Wärmestrom

Alle weiteren Bezeichnung der Wärmeströme sind identisch mit Abschnitt 4.1.4.

Da für die Überlegungen zum Wärmeschutz der Gebäudehülle (Abschnitt 5) der über die Zuluft transportierbare Heizwärmestrom \dot{Q}_{Zu} ausschlaggebend ist, wird die Wärmestrombilanz bezogen auf das beheizte Gebäudevolumen erstellt. Bilanzgrenze ist die thermische Gebäudehülle. Konsequenzen ergeben sich insbesondere für die Lüftungswärmeverluste. Diese setzen sich nach Gl. 4-4 aus folgenden Anteilen zusammen:

$$\dot{Q}_{Lüft} = \dot{Q}_{Lüft, mech} + \dot{Q}_{Lüft, Fe} + \dot{Q}_{Lüft, Fug} .$$

Da die Außenluft in der Regel in der Lüftungszentrale, z. B. im Keller erwärmt wird, muss $\dot{Q}_{Lüft, mech}$ nicht über die Zuluftbeheizung gedeckt werden. Wird als Bilanzgrenze die thermische Gebäudehülle angesetzt, entfällt dieser Anteil der Lüftungswärmeverluste:

Gl. 5-1 $\dot{Q}_{Lüft, mech} = 0 .$

Die derart modifizierten Lüftungswärmeverluste werden entsprechend Gl. 4-3 als $\dot{Q}_{\text{Lüft,Geb}}$ bezeichnet.

Die zeitliche Änderung der inneren Energie des Gebäudes ergibt sich aus der Summe der Wärmeströme. Für den hier betrachteten Fall lässt sich die Bilanz der Wärmeströme für das beheizte Gebäudevolumen unter Verwendung von Gl. 4-1 bis Gl. 4-4 wie folgt schreiben:

$$\text{Gl. 5-2} \quad \frac{dI_{\text{Geb}}}{dt} = C \cdot \frac{dT_{\text{Geb}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{Zu}} + \dot{Q}_{\text{Lüft,Geb}} + \dot{Q}_{\text{Trans}} + \dot{Q}_{\text{Sol}} + \dot{Q}_{\text{int}}$$

mit

I_{Geb}	innere Energie des Gebäudes
C	wirksame Speicherkapazität des Gebäudes
T_{Geb}	mittlere Gebäudetemperatur.

Bei stationären Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass sich die innere Energie eines Gebäudes über den Bilanzzeitraum nicht ändert. Speichervorgänge treten somit nicht auf. Die stationäre Wärmestrombilanz ergibt sich entsprechend zu:

$$\text{Gl. 5-3} \quad 0 = \dot{Q}_{\text{Zu}} + \dot{Q}_{\text{Lüft,Geb}} + \dot{Q}_{\text{Trans}} + \dot{Q}_{\text{Sol}} + \dot{Q}_{\text{int}}$$

5.1.2 Einfluss des Wärmeschutzes auf das sommerliche Temperaturverhalten

Bei Bürogebäuden ist der sommerliche Wärmeschutz von großer Bedeutung, da auch in Hitzeperioden ein ausreichender Komfort für die Mitarbeiter sichergestellt werden muss. Vielfach wird befürchtet, dass es in gut gedämmten Gebäuden zu sommerlichen Überhitzungen kommt, da die Abwärme von Personen, Beleuchtung und elektrischen Bürogeräten sowie der durch solare Einträge zugeführte Wärmestrom nicht in ausreichendem Maß an die Umgebung abgeführt werden können. Energetisch nicht sinnvoll wäre es, wenn durch den hohen Wärmeschutz zwar Heizenergie eingespart, dafür aber ein Kühlenergiebedarf erzeugt würde.

Ziel dieses Abschnitts ist es deswegen, die Auswirkungen eines hohen Wärmeschutzes auf die Energiebilanz und damit auf das Temperaturverhalten im Sommer zu bewerten. Die Frage wird in Form von systematischen Betrachtungen diskutiert. Zur Quantifizierung der einzelnen Wärmeströme werden dabei einfache Ansätze herangezogen.

Die Änderung der inneren Energie in einem Zeitintervall Δt und damit die Temperaturentwicklung ergibt sich nach Gl. 5-2 aus der Differenz von Wärmegewinnen durch

- mit der Zuluft zugeführte Heizleistung \dot{Q}_{Zu} (im Sommer in der Regel Null),
- solare Einträge \dot{Q}_{Sol} sowie
- Abwärme von Beleuchtung, Arbeitshilfen und der Personen \dot{Q}_{int}

und Wärmeverluste über

- Lüftung $\dot{Q}_{Lüft,Geb}$ und
- Transmission \dot{Q}_{Trans} .

$$\text{Gl. 5-4} \quad \Delta I_{Geb} = C \cdot \Delta T_{Geb} = \int_{\Delta t} (\dot{Q}_{Zu} + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{Lüft,Geb} + \dot{Q}_{Trans}) dt$$

Wird dem Gebäude ein größerer Wärmestrom zugeführt, als über Transmission und Lüftung abgeführt werden kann, steigt die innere Energie und damit die Temperatur im Gebäude an. Der Temperaturanstieg wird dabei durch die Speicherkapazität des Gebäudes bestimmt. Je leichter ein Gebäude, d. h. je geringer die thermisch aktive Speicherkapazität, umso größer ist der Anstieg der Temperatur bei gleicher Differenz zwischen Wärmegewinnen und -verlusten. Sowohl für Transmission als auch für Lüftung kann ein spezifischer Wärmeverlust in W/K angegeben werden. Dieser entspricht dem Wärmestrom, der bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin auftritt.

Der spezifische Wärmeverlust „Transmission“ berechnet sich aus dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle und der Hüllfläche:

$$\text{Gl. 5-5} \quad H_{Trans} = U_{ges} \cdot A_{Hülle}$$

mit

H_{Trans} spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes durch Transmission
 U_{ges} mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle.

U_{ges} wird für die folgenden Abschätzungen als flächengewichtetes Mittel aus dem U-Wert der einzelnen Bauteile bestimmt. Aufgrund der speziellen Temperaturrandbedingung wird bei unbeheiztem Keller der U-Wert der Kellerdecke bzw. der U-Wert von Bauteilen, die an Erdreich grenzen, mit dem Faktor 0,5 multipliziert.

$$\text{Gl. 5-6} \quad U_{ges} = \frac{A_{AW} U_{AW} + A_F U_F + A_{DA} U_{DA} + A_{KD} 0,5 U_{KD}}{A_{Hülle}}$$

Durch Multiplikation von H_{Trans} mit der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft wird der Transmissionswärmestrom berechnet.

Der spezifische Wärmeverlust „Lüftung“ ergibt sich aus dem Luftwechsel n , dem Gebäudevolumen (netto) und der volumenspezifischen Speicherkapazität von Luft zu

$$\text{Gl. 5-7} \quad H_{Lüft} = n \cdot V_{Geb} \cdot c_L$$

mit

$H_{Lüft}$ spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes durch Lüftung
 n Luftwechsel
 V_{Geb} beheiztes Netto-Volumen des Gebäudes
 c_L volumenspezifische Wärmekapazität von Luft.

Der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes berechnet sich als Summe zu

$$\text{Gl. 5-8} \quad H_{ges} = H_{Trans} + H_{Lüft}$$

mit

H_{ges} spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes (Transmission + Lüftung).

Im Folgenden wird abgeschätzt, in welchem Verhältnis die spezifischen Wärmeverluste Transmission und Lüftung zueinander stehen und wie sich der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes bei einer Erhöhung des U-Werte der Gebäudehülle bzw. des Luftwechsels verändert.

Betrachtet wird das in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Beispielgebäude mit

$$A_{Hülle} = 4.930 \text{ m}^2$$

$$V_{Geb} = 13.200 \text{ m}^3.$$

Unterstellt wird das in Abb. 5-2 dargestellte Passivhaus-Lüftungskonzept, bei dem nur noch den Büros ein Außenluftvolumenstrom zugeführt wird. Werden die Büros mit dem nach DIN 1946 aus hygienischen Gründen erforderlichen flächenbezogenen Mindestluftwechsel von $v_{hyg} = 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ versorgt, ergibt sich ein Luftwechsel bezogen auf das Netto-Gebäudevolumen von $n = 0,73 \text{ h}^{-1}$. Abb. 5-4 zeigt den gesamten spezifischen Wärmeverlust des Gebäudes für unterschiedliche Wärmeschutzniveaus der Gebäudehülle, quantifiziert über den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{ges} . Angegeben ist der spezifische Wärmeverlust „Lüftung“ $H_{Lüft}$ bei $n = 0,73 \text{ h}^{-1}$ und $n = 2,2 \text{ h}^{-1}$ sowie der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes H_{ges} bei $n = 0,73 \text{ h}^{-1}$. Die gestrichelten Hilfslinien zeigen als Orientierung u. a. den U-Wert für die in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 beschriebenen Ausführungsvarianten des Beispielgebäudes.

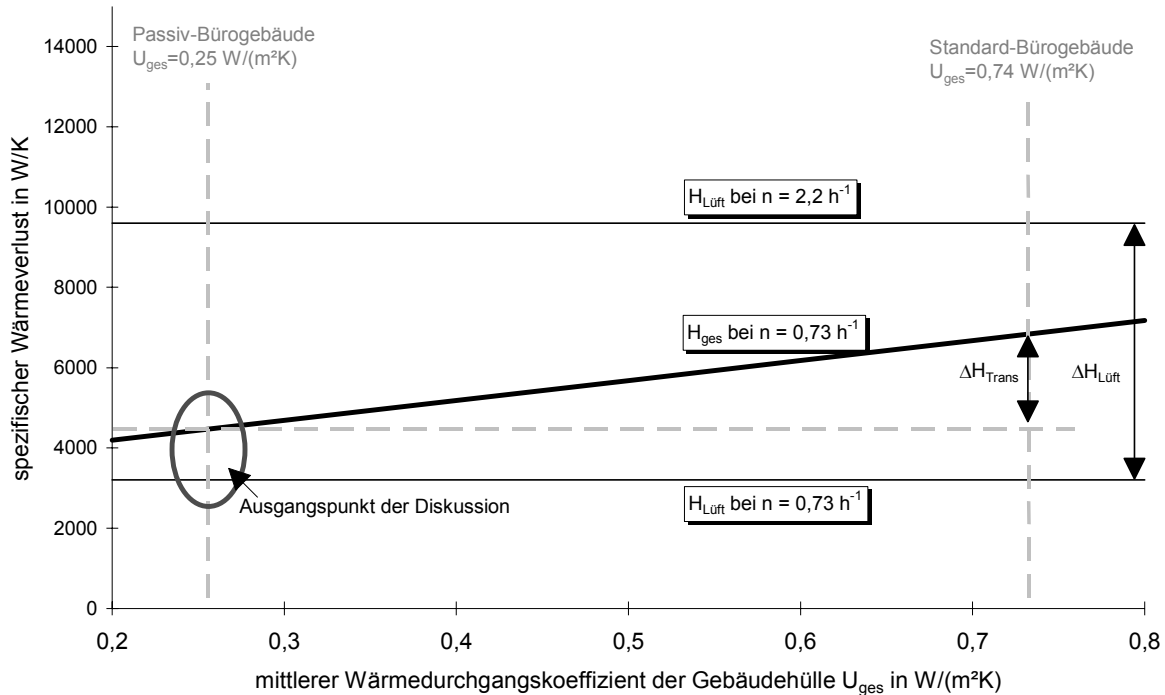


Abb. 5-4: Spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes in Abhängigkeit vom Wärmeschutz und Außenluftwechsel

Ausgangspunkt für die Diskussion von Abb. 5-4 ist die Variante „Passiv-Bürogebäude“ mit $U_{ges} = 0,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes H_{ges} beträgt 4.400 W/K, wovon 3.200 W/K auf Lüftung ($H_{Lüft}$ bei Luftwechsel $n=0,73 \text{ h}^{-1}$) und 1.200 W/K auf Transmission entfallen. Der Anteil der „Transmission“ beträgt damit etwa 25 %.

Wird der mittlere U-Wert der Gebäudehülle erhöht, d. h. der Wärmeschutz reduziert, steigt der spezifische Wärmeverlust „Transmission“ und damit auch der gesamte spezifische Wärmeverlust H_{ges} an. Bei einer Verdreifung des U-Wertes - dies entspricht etwa dem Unterschied der Varianten „Standard-“ und „Passiv-Bürogebäude“ - beträgt der Anstieg $\Delta H_{Trans} \approx 2.400 \text{ W/K}$. Der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes H_{ges} erhöht sich damit auf etwa 155 %.

Zum Vergleich ist dargestellt, welchen Einfluss die Verdreifung des Luftwechsels auf den spezifischen Wärmeverlust des Gebäudes hat. Wird der mittlere Außenluftwechsel im Gebäude von $n = 0,73 \text{ h}^{-1}$ auf $n=2,2 \text{ h}^{-1}$ angehoben, erhöht sich der spezifische Wärmeverlust Lüftung um $\Delta H_{Lüft} \approx 6.400 \text{ W/K}$. Der gesamte spezifische Wärmeverlust des Gebäudes H_{ges} steigt damit auf 200 % bis 240 % des Ausgangswertes an.

Als nächstes wird aufgezeigt, um wieviel der Wärmestrom durch interne Wärmequellen reduziert werden muss, um den durch den hohen Wärmeschutz reduzierten Transmissionswärmestrom im Tagesmittel auszugleichen. Soll die innere Energie und damit das sommerliche Temperaturverhalten gleich bleiben, gilt bei konstantem Luftwechsel

$$\text{Gl. 5-9} \quad \int_{\Delta t} \Delta \dot{Q}_{\text{int}} dt = - \int_{\Delta t} \Delta \dot{Q}_{\text{Trans}} dt .$$

Als Betrachtungszeitraum wird ein Tag gewählt. Die Reduktion der über Transmission abgeführten Wärme berechnet sich zu

$$\text{Gl. 5-10} \quad \Delta Q_{\text{Trans}} = \Delta H_{\text{Trans}} \cdot \int_{\Delta t} (T_A - T_R) dt$$

mit

T_A Außenlufttemperatur

T_R Raumlufthtemperatur.

Die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumlufthtemperatur ist von dem aktuellen Wetter und der Temperaturentwicklung im Gebäude abhängig. Für die weiteren Betrachtungen wird ein typischer Verlauf der Raumtemperatur im „Passiv-Bürogebäude“ an einem heißen sonnigen Sommertag (Testreferenzjahr Frankfurt, Tag 246) herangezogen. Abb. 5-5 zeigt den Verlauf der beiden Temperaturen und die auftretende Differenz.

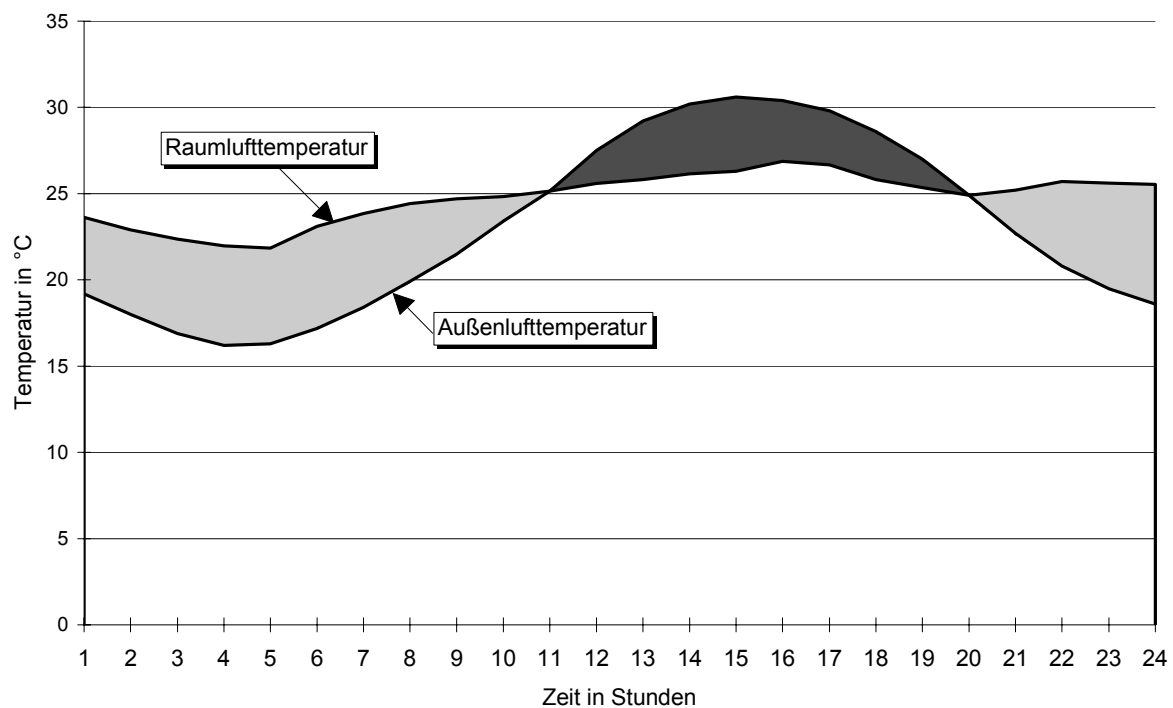


Abb. 5-5: Verlauf der Außenluft- und Raumlufthtemperatur an einem heißen, sonnigen Sommertag (TRY Frankfurt; Tag 246) in den Südbüros des Passiv-Bürogebäudes berechnet mit dem dynamischen Simulationsprogramm TAS (Temperaturdifferenz ($T_A - T_R$) farbig markiert)

Über den Tag betrachtet ergibt sich eine Differenz zwischen Außenluft- und Raumlufttemperatur von

$$\text{Gl. 5-11} \quad \int_{t=1h}^{24h} (T_A - T_R) dt = -42 \text{ Kh}.$$

Die abgeführte Wärme sinkt bei dem Beispielgebäude aufgrund des verbesserten Wärmeschutzes damit um folgenden Betrag:

$$\text{Gl. 5-12} \quad \Delta Q_{Trans} = \Delta H_{Trans} \cdot \int_{\Delta t} (T_A - T_R) dt = 2400 \frac{W}{K} \cdot 42 \text{ K} \cdot h = 100.800 \text{ Wh}.$$

Die durch interne Wärmequellen zugeführte Wärme wird in der Regel berechnet aus dem Maximalwert des flächenspezifischen Wärmestroms multipliziert mit der Betriebszeit, dem Vollbetriebszeitfaktor und der Nettofläche der betrachteten Gebäudezone:

$$\text{Gl. 5-13} \quad Q_{int} = \dot{q}_{int,max} \cdot b \cdot b_v \cdot A_{HNF}$$

mit

$\dot{q}_{int,max}$ maximaler Wärmestrom der interner Wärmequellen bezogen auf die Hauptnutzfläche

b Nutzungszeit

b_v Vollbetriebszeitfaktor (Quotient aus mittlerem zu maximalem (Ab)-Wärmestrom in der Nutzungszeit)

A_{HNF} Hauptnutzfläche nach DIN 277 Teil 1.

Die erforderliche Reduktion des Maximalwertes des flächenspezifischen Wärmestroms ergibt sich zu

$$\text{Gl. 5-14} \quad \Delta \dot{q}_{int,max} = \frac{Q_{int}}{b \cdot b_v \cdot A_{HNF}}.$$

Für folgende Randbedingungen des Beispielgebäudes

b	tägliche Nutzungszeit	11 h
b_v	Vollbetriebszeitfaktor	0,5
A_{HNF}	Hauptnutzfläche Büro	2400 m ²

ergibt sich eine erforderliche Reduktion des maximalen Wärmestroms durch interne Wärmequellen um

$$\text{Gl. 5-15} \quad \Delta \dot{q}_{int,max} = \frac{100.800}{11 \cdot 0,5 \cdot 2400} \cdot \frac{Wh}{h \cdot m_{HNF}^2} = 7,6 \frac{W}{m_{HNF}^2}.$$

Der Maximalwert der internen Wärmequellen in den Büros muss somit um 7,6 W/m²_{HNF} gesenkt werden, um den Anstieg der inneren Energie aufgrund des erhöhten Wärmeschutzes zu kompensieren. Die tatsächliche Reduktion des maximalen Wärmestroms durch interne Wärme-

quellen in den Büros liegt bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ mit $33 \text{ W/m}^2_{\text{HNF}}$ etwa um den Faktor 4 höher.

Zudem ist in der Variante „Passiv-Bürogebäude“ ein Erdreichwärmetauscher vorgesehen. Dieser ermöglicht es, auch in Hitzeperioden eine Zulufttemperaturdifferenz von 8 Kelvin zur Raumluft zu realisieren. Bei einem Volumenstrom von $9.600 \text{ m}^3/\text{h}$ kann damit ein Wärmestrom von 26.000 Watt durch freie Kühlung aus dem Gebäude abgeführt werden. Wird die Laufzeit der Lüftungsanlage berücksichtigt, ist die dem Gebäude pro Tag durch freie Kühlung entzogene Wärme 3,5mal größer als zur Kompensation für den erhöhten Wärmeschutz erforderlich.

Fazit

Eine Erhöhung des Wärmeschutzes führt zu einer Verringerung des Transmissionswärmestroms auch im Sommer. Bei sonst gleichen Randbedingungen ergibt sich dadurch ein Anstieg der inneren Energie und damit des Temperaturniveaus. Der Anstieg ist jedoch gering und kann z. B.

- durch den Einsatz eines Erdreichwärmetauschers
- durch eine Erhöhung des Luftwechsels zur freien Kühlung oder
- durch eine Verringerung der internen Wärmequellen

kompensiert werden. Bei dem hier untersuchten Fall (Vergleich „Standard- und Passiv-Bürogebäude“) liegt die Verminderung der inneren Energie durch den Erdreichwärmetauscher um den Faktor 3,5 über dem Wert, der zur Kompensation des hohen Wärmeschutzes erforderlich wäre. Die in der Variante „Passiv-Bürogebäude“ realisierte Reduktion der internen Wärmequellen ist um den Faktor 4 höher als zur Kompensation erforderlich.

In Summe ist deswegen in der Variante „Passiv-Bürogebäude“ trotz des hohen Wärmeschutzes der Gebäudehülle die innere Energie an heißen Sommertagen niedriger als bei der Variante „Standard-Bürogebäude“. Entsprechend zeigen auch die Simulationsrechnungen ein besseres sommerliches Temperaturverhalten (Abschnitt 4.3). Bei den hier untersuchten energieeffizienten Gebäudekonzepten kann also ein hoher Wärmeschutz ohne die Gefahr von sommerlichen Überhitzungen realisiert werden. Damit ist es möglich, den Wärmeschutz der Gebäudehülle ohne die Berücksichtigung des sommerlichen Temperaturverhaltens allein über den Winterfall (Heizfall) zu definieren.

5.1.3 Einfluss des Wärmeschutzes auf die Wirtschaftlichkeit

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie eine Erhöhung des Wärmeschutzes die Wirtschaftlichkeit verändert und welche Auswirkung der Verzicht auf ein separates Heizsystem - genauer auf Heizkörper und Wärmeverteilungen - auf die Wirtschaftlichkeit hat. Hierzu wird eine rein betriebswirtschaftliche Betrachtung angestellt mit den in Abschnitt 4.4 erwähnten Einschränkungen bezüglich der „externen Kosten“. Zunächst werden die Investitionskosten des Heizsystems in Abhängigkeit vom Wärmeschutz ermittelt und anschließend der Kapitalwert für unterschiedliche Randbedingungen berechnet.

Für das in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Beispielgebäude und die in Abschnitt 4.4 gemachten

Kostenannahmen ist der Verlauf der Investitionskosten für die Heizungsanlage in Abb. 5-6 dargestellt. Wird der U-Wert ausgehend von einem Wert von $U_{ges} = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert, vermindern sich die Investitionskosten kontinuierlich entsprechend der abnehmenden Nennleistung des Wärmeerzeugers und der geringeren Fläche der Heizkörper. Ab einem gewissen Wärmeschutz - quantifiziert durch den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{ges} - ist die maximale Heizlast des Gebäudes so gering, dass sie über die Zuluft in das Gebäude eingebracht werden kann. In dem Fall kann auf Heizkörper und Wärmeverteilungen verzichtet werden. Hierdurch ergibt

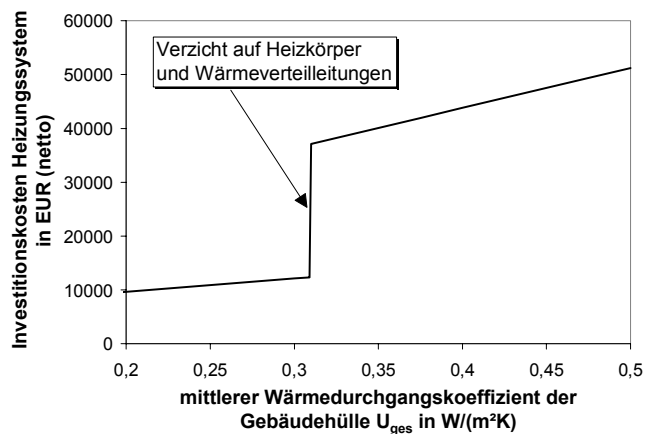


Abb. 5-6: Investitionskosten des Heizungssystems (Kessel, Verteilungen, Heizkörper) in Abhängigkeit vom Wärmeschutz der Gebäudehülle; Kostenansätze nach Tab. 5-1

sich eine sprunghafte Reduktion der Investitionskosten für die Heizungsanlage. Nach dem Sprung verläuft die Gerade flacher, da nur noch die abnehmende Nennleistung des Wärmeerzeugers zu einer Reduktion der Investitionskosten führt.

Zum Erreichen der geringen U-Werte sind zusätzliche Investitionen für

- die Dämmung von Außenwand, Dach und Kellerdecke,
- die hochwertigen Passivhausfenster

erforderlich. Gleichzeitig ergeben sich jedoch Einsparungen bei

- Wartungskosten und
- Heizenergiekosten.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden diese Größen quantitativ bewertet und entsprechend dem Vorgehen in Abschnitt 4.4 der Kapitalwert für unterschiedliche Werte des Wärmeschutzes bestimmt. Durchgeführt wird eine Mehrertragsrechnung gegenüber der Variante „Standard-Bürogebäude“. Den Berechnungen liegen folgende Annahmen zugrunde (siehe auch Anhang A-9).

Mehrkosten für Fenster sowie Dämmung von Außenwand, Dach und Kellerdecke,	Fenster 175 EUR/m ² _{BTf} <u>Kosten je zusätzlichem cm Dämmstoff</u> Außenwand 1,55 EUR/m ² _{BTf} Dach 0,95 EUR/m ² _{BTf} Kellerdecke 2,5 EUR/m ² _{BTf}
Investitionskosten Heizungsanlage	Wärmeerzeuger: 125 EUR/kW Heizkörper und Verteilung: 500 EUR/kW Anteil Heizkörper an Nennleistung Wärmeerzeuger: 50 %
Wartungskosten	2,5 % der Investitionskosten pro Jahr
Heizenergiekosten	Heizenergiebedarf über stationäre Bilanzverfahren [PHPP 1998] Gaspreis im ersten Jahr: 0,024 EUR/kWh Gaspreissteigerung: 2 % pro Jahr

Tab. 5-1: Kostenannahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung

Wärmerückgewinnung und Erdreichwärmetauscher beeinflussen den U-Wert der Gebäudehülle nicht. Um Sprünge in der Kurve zu vermeiden, wird davon ausgegangen, dass bereits die Variante „Standard-Bürogebäude“ mit beiden Komponenten ausgerüstet ist. In der Mehrertragsrechnung werden damit weder die Investitionskosten noch die Energieeinsparung dieser Komponenten berücksichtigt.

Abb. 5-7 zeigt die Kapitalwerte, die sich unter diesen Randbedingungen für einen verbesserten winterlichen Wärmeschutz des Beispielgebäudes ergeben. Während die Dämmstoffdicken kontinuierlich erhöht werden, sind getrennte Kurven für den Fall des

- „konventionellen“ Fensters ($U_F = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) mit 2fach Wärmeschutzverglasung und Rahmengruppe 1 und
- des „Passivhausfensters“ ($U_F=0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) mit 3fach Wärmeschutzverglasung und hochwärmedämmten Rahmen

aufgeführt.

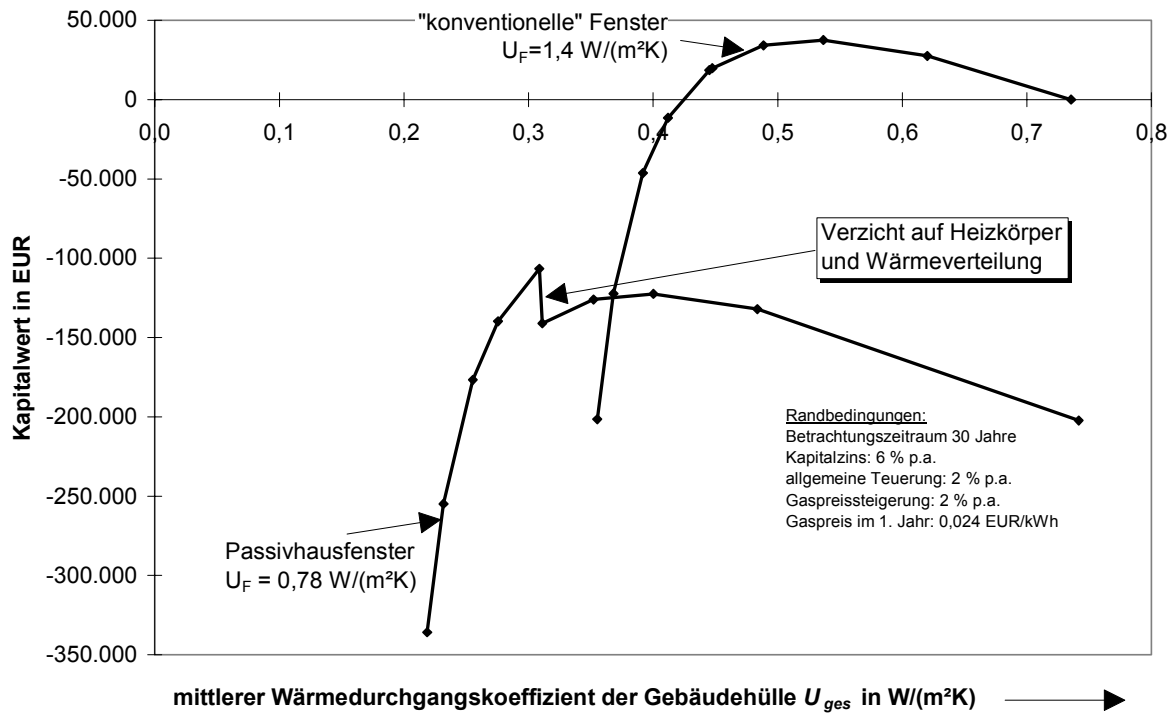


Abb. 5-7: Kapitalwert bei unterschiedlichem Wärmeschutz mit „konventionellen“ und Passivhausfenstern (Mehrertragsrechnung gegenüber Variante „Standard-Bürogebäude“)

Positive Kapitalwerte werden unter den hier angenommenen Randbedingungen nur für den Fall des „konventionellen“ Fensters und U-Werten der Gebäudehülle über $U_{ges} \geq 0,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erzielt. Wird U_{ges} weiter reduziert - d. h. der Wärmeschutz erhöht - kann eine ausreichende Verzinsung des eingesetzten Kapitals über die Einsparung an Heizenergie und Wartung nicht mehr erreicht werden und der Kapitalwert wird negativ.

Der Schnittpunkt der beiden Kurven liegt bei $U_{ges} = 0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Für diesen Punkt sind die Kapitalwerte beider Kurven gleich, d. h. es ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht egal, ob U_{ges} mit konventionellen Fenstern und Dämmstoffdicken von ca. 45 cm oder mit Passivhausfenstern und Dämmstoffdicken von ca. 15 cm erreicht wird. Niedrigere Werte für U_{ges} werden aus betriebswirtschaftlicher Sicht günstiger mit Passivhausfenstern und den geringeren Dämmstoffdicken erreicht. Dies belegt der höhere Kapitalwert dieser Kurve. Eine Reduktion des U-Wertes führt jedoch auch bei dieser Kurve zunächst zu einer weiteren Verringerung des Kapitalwertes. Bei $U_{ges} = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ kann bei dem hier betrachteten Beispielgebäude auf ein separates Heizsystem - d.h. auf Heizkörper und Wärmeverteilungen - verzichtet werden. Hierdurch ergibt sich ein sprunghafter Anstieg des Kapitalwerts und es tritt das Maximum der Kurve für Passivhausfenster auf.

Es wird deutlich, dass bei dem Einsatz von Passivhausfenstern die Kapitalwerte unabhängig von U_{ges} alle negativ, die Investitionen somit unwirtschaftlich sind. Dies ist auf die derzeit noch hohen Mehrkosten für die Passivhausfenster und die angenommene geringe Energiepreissteigerung von 2 % pro Jahr zurückzuführen. Der Einfluss dieser beiden Annahmen wird im Weiteren dargestellt.

In Abb. 5-7 wird von einem Energiepreisanstieg entsprechend der allgemeinen Teuerung von 2 % pro Jahr ausgegangen. Mittel- bis langfristig ist jedoch mit einem realen Anstieg des Energiepreises zu rechnen. Abb. 5-8 zeigt den Einfluss der Energiepreissteigerung auf den Verlauf der Kapitalwerte bei Verwendung von Passivhausfenstern.

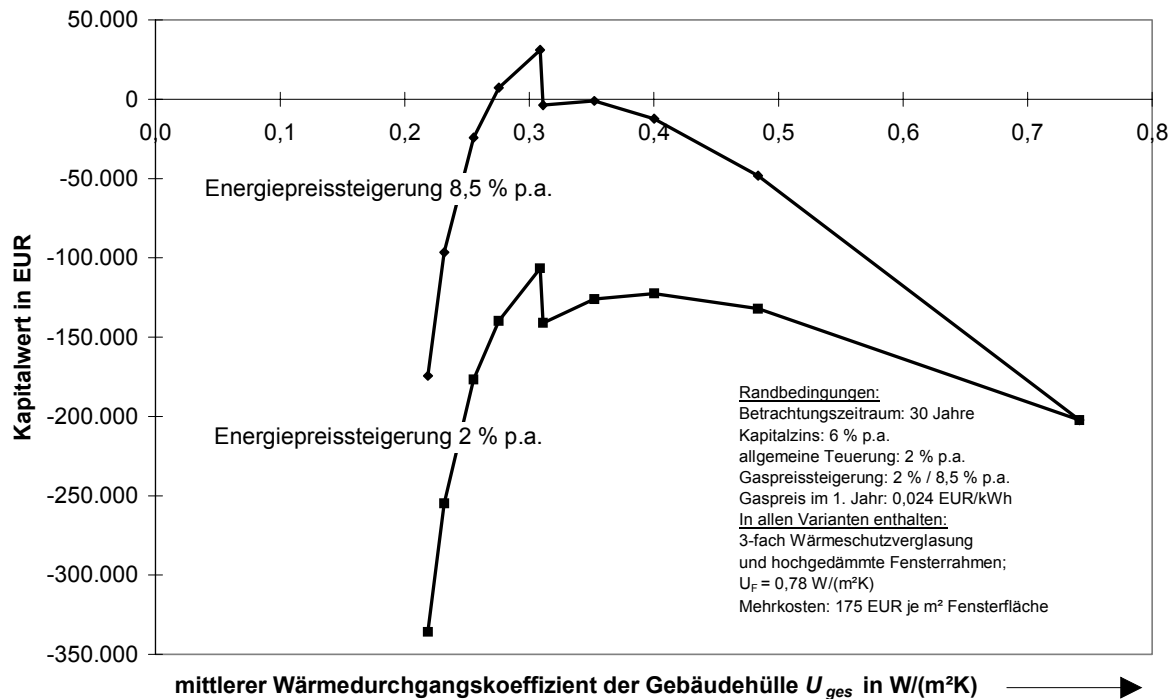


Abb. 5-8: Kapitalwert in Abhängigkeit vom Wärmeschutz für zwei Annahmen zur Energiepreissteigerung (Mehrertragsrechnung gegenüber Variante „Standard-Bürogebäude“)

Es wird deutlich, dass die Annahmen zur Energiepreissteigerung den Kurvenverlauf entscheidend beeinflussen. Wird von einer Energiepreissteigerung von 8,5 % pro Jahr über die nächsten 30 Jahre ausgegangen, stellt sich die ökonomische Situation deutlich günstiger dar. Auch hier tritt das Optimum der Kurve bei dem Verzicht auf Heizkörper und Verteilungen auf. Der Kapitalwert wird an diesem Punkt positiv, die Rentabilität damit erreicht.

Die Mehrkosten für Passivhausfenster sind wegen der geringen Stückzahlen derzeit noch vergleichsweise hoch. Bei Fortsetzung der positiven Entwicklung im Bereich der Passivhäuser kann mit einer stärkeren Marktdurchdringung und damit abnehmenden Mehrkosten gegenüber konventionellen Fenstern gerechnet werden. Abb. 5-9 zeigt die Veränderung der Kapitalwerte für den Fall, dass die Mehrkosten für die Passivhausfenster von 175 auf 50 EUR pro m^2 Fensterfläche sinken, wobei die Energiepreissteigerung mit dem niedrigen Wert von 2 % pro Jahr angesetzt wird.

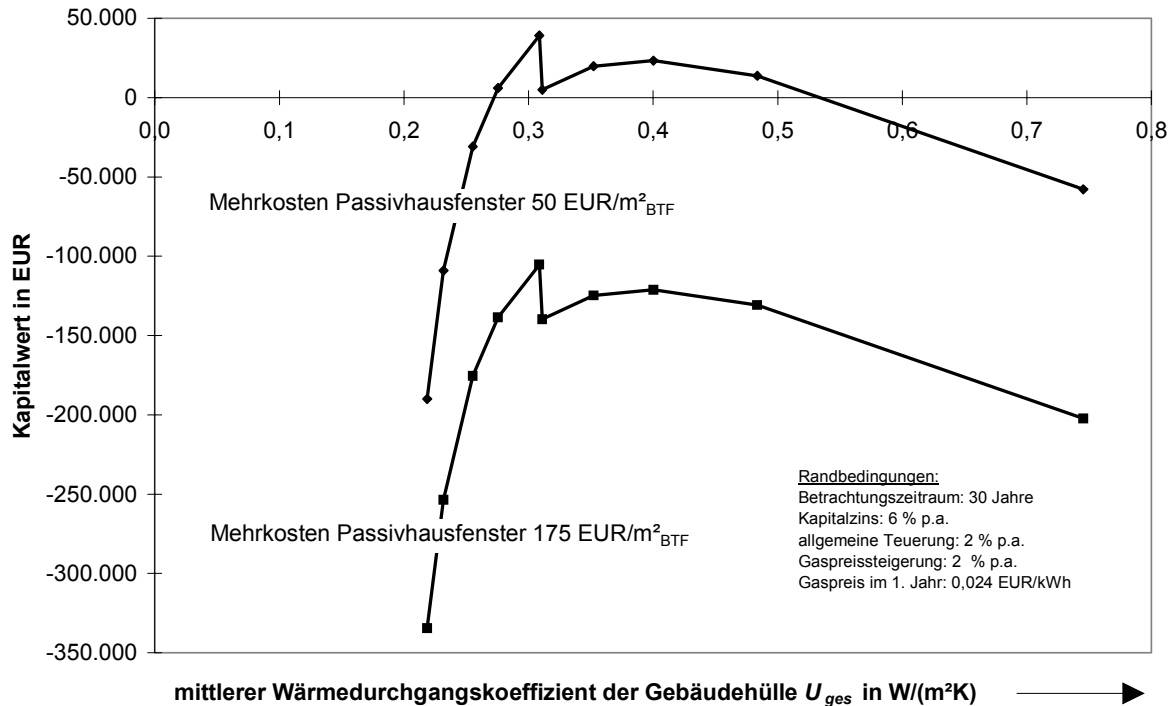


Abb. 5-9: Kapitalwert in Abhängigkeit vom Wärmeschutz für zwei Annahmen zu den Mehrkosten der Passivhausfenster

Die Mehrkosten für die Fenster haben deutlichen Einfluss auf den Kapitalwert. Sinken diese auf 50 EUR pro m² Fensterfläche, wird selbst bei der hier angenommenen geringen Energiepreissteigerung von 2 % pro Jahr die Wirtschaftlichkeit erreicht. Der maximale Kapitalwert liegt dabei über dem Maximum bei konventionellen Fenstern (Abb. 5-7). Damit stellt diese Variante das wirtschaftliche Optimum dar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von Passivhausfenstern wegen der derzeit noch hohen Mehrkosten nicht wirtschaftlich ist. Sowohl eine stärkere Energiepreissteigerung als auch eine Kostenreduktion bei den Passivhausfenstern beeinflussen die Rentabilität jedoch positiv. Die Zukunft wird sich voraussichtlich als eine Kombination dieser beiden Effekte darstellen, so dass der Einbau von Passivhausfenstern in einem ökonomisch vertretbaren Rahmen liegen kann.

In dieser Arbeit werden Realisierungsmöglichkeiten für energieeffiziente Bürogebäude untersucht. Aus Abb. 5-7 wird deutlich, dass zur Realisierung geringer U-Werte Passivhausfenster erforderlich sind. Aus dem Grund wird für die weiteren Betrachtungen der Einsatz von Passivhausfenstern vorausgesetzt. In dem Fall tritt das Optimum des Kapitalwertes beim Verzicht auf Heizkörper und die entsprechenden Wärmeverteilungen auf.

5.2 Winter-Kenngröße zur Beschreibung des Wärmeschutzniveaus

Die Winter-Bedingung ist prinzipiell geeignet, den Wärmeschutz der Gebäudehülle zu definieren. Es hat sich gezeigt, dass das so beschriebene Wärmeschutzniveau das wirtschaftliche Optimum darstellt, sofern der Einbau von Passivhausfenstern vorausgesetzt wird. Auch kann ein gutes sommerliches Temperaturverhalten bei hohem Wärmeschutz erreicht werden. Voraussetzung ist, dass gleichzeitig die Effizienz der elektrischen Geräte gesteigert wird, was Teil des hier vorgestellten Konzeptes ist.

Diese qualitative Winter-Bedingung muss nun für die praktische Anwendung über eine quantitative Kenngröße operationalisiert werden. Diese Kenngröße sollte mit geringem zeitlichen Aufwand für einen Gebäudeentwurf ermittelt werden können und sicherstellen, dass beim Unterschreiten bestimmter Grenzwerte der Investitionskostenprung im Bereich der Heizung erreicht wird.

Die im Folgenden untersuchte Winter-Kenngröße leitet sich aus folgender Argumentation ab.

Winter-Kenngröße:

Die Winter-Bedingung ist erfüllt, wenn die maximal dem Gebäude mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom zuführbare Heizleistung im Wochenmittel größer oder gleich der entsprechend gemittelten Gebäudeheizlast ist. Der maximal dem Gebäude mit der Zuluft zuführbare Wärmestrom lässt sich aus dem hygienisch erforderlichen Mindestvolumenstrom, der Betriebszeit der Lüftungsanlage und einer maximalen Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Raumluft bestimmen. Dieser Wert definiert die maximal zulässige Gebäudeheizlast. Hieraus lassen sich - bei vorgegebenem Wert für die Lüftungsverluste durch Undichtheiten und Fenster und unter Berücksichtigung des Wärmestroms durch solare Einträge und interne Wärmequellen - die maximal zulässigen Transmissionswärmeverluste berechnen. Diese wiederum bestimmen einen maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{max} , der erreicht oder unterschritten werden muss, damit auf ein separates Heizsystem verzichtet und das Gebäude mit dem Mindestaußenluftwechsel beheizt werden kann. U_{max} entspricht dem Winter-Kriterium, das von der Winter-Kenngröße U_{ges} eingehalten werden muss, damit die Winter-Bedingung erfüllt wird.

Im Folgenden wird eine Berechnungsvorschrift für die Winter-Kenngröße aus der Bilanz der Wärmeströme des Gebäudes abgeleitet.

5.2.1 Allgemeiner Berechnungsansatz

Entsprechend dem Berechnungsansatz der DIN 4701, wird im Folgenden eine stationäre Betrachtung vorgenommen. Dynamische Effekte können zu einem späteren Zeitpunkt möglicherweise analog der DIN 4701 durch eine Außentemperaturkorrektur berücksichtigt werden.

Aus der stationären Wärmestrombilanz (Gl. 5-3) ergibt sich folgende Bedingung für die dem Gebäude über die Zuluft zuzuführende Heizleistung:

$$\text{Gl. 5-16} \quad -\dot{Q}_{Zu} = \dot{Q}_{Lüft,Geb} + \dot{Q}_{Trans} + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{int}.$$

Wird die Heizlast des Gebäudes definiert zu

$$\text{Gl. 5-17} \quad \dot{Q}_{Geb} = \dot{Q}_{Lüft,Geb} + \dot{Q}_{Trans} + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{int}$$

mit

\dot{Q}_{Geb} Gebäudeheizlast,

vereinfacht sich Gl. 5-16 zu

$$\text{Gl. 5-18} \quad -\dot{Q}_{Zu} = \dot{Q}_{Geb}.$$

Im praktischen Betrieb muss Gl. 5-18 nicht zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein. Die thermische Trägheit der Gebäude erlaubt die Mittelung über ein Zeitintervall Δt . Die Wärmestrombilanz wandelt sich damit in eine Energiebilanz.

$$\text{Gl. 5-19} \quad -\int_{\Delta t} \dot{Q}_{zu} dt = \int_{\Delta t} \dot{Q}_{Geb} dt.$$

In der DIN 4701 wird die thermische Trägheit der Gebäude über die Klimarandbedingungen in die Berechnung eingebracht. Als Außentemperatur-Randbedingung wird ein Zweitagesmittelwert angesetzt, der abhängig von der Speicherkapazität - d. h. der thermischen Zeitkonstante (siehe auch Anhang A-12.1) - korrigiert werden kann. Dabei wird ein Absinken der Temperatur um 1 Kelvin als zumutbar angesehen. Bei den in der DIN 4701 bilanzierten Wärmeströmen handelt es sich also um Mittelwerte. Der Mittelungszeitraum beträgt 2 Tage.

Auch für den vorliegenden Fall muss ein Mittelungszeitraum angenommen werden, für den Gl. 5-19 erfüllt sein muss. Der Mittelungszeitraum muss der kleinsten periodischen Wiederholung der Betriebszeit der Lüftungsanlage entsprechen. Da die Beheizung entsprechend der Winter-Bedingung nur über den hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom erfolgt und dieser nur bei der Anwesenheit von Personen gegeben ist, ist die Betriebszeit der Lüftungsanlage auf die Nutzungszeit des Gebäudes begrenzt. Die Winter-Bedingung geht somit von einer Nacht- und Wochenendabschaltung der Lüftungsanlage aus. Wegen der Wochenendabschaltung beträgt der im vorliegenden Fall anzusetzende Mittelungszeitraum eine Woche. Ferienzeiten werden dabei nicht berücksichtigt.

Zudem werden im Weiteren Maximalbetrachtungen unter Auslegungsbedingungen angestellt. Die Beheizbarkeit über die Zuluft ist gegeben, wenn die maximale Gebäudeheizlast unter Auslegungsbedingungen kleiner oder gleich der maximal über die Zuluft transportierbaren Heizleistung ist. Gl. 5-18 wandelt sich damit in eine Ungleichung.

Um diese speziellen Randbedingungen deutlich zu machen, werden im Folgenden Größen durch einen Querbalken gekennzeichnet, die

- über einen Zeitraum von einer Woche gemittelt sind und
- unter Auslegungsbedingungen berechnet werden.

Gl. 5-16 schreibt sich somit

$$\text{Gl. 5-20} \quad -\bar{\dot{Q}}_{Zu} \geq \bar{\dot{Q}}_{Sol} + \bar{\dot{Q}}_{int} + \bar{\dot{Q}}_{Lüf, Geb} + \bar{\dot{Q}}_{Trans}$$

und Gl. 5-18

$$\text{Gl. 5-21} \quad -\bar{\dot{Q}}_{Zu} \geq \bar{\dot{Q}}_{Geb} .$$

Der hier angenommene Mittelungszeitraum von 7 Tagen liegt über den Annahmen der DIN 4701. Wegen der speziellen Nutzungszeit (Wochenende) ist ein solcher Zeitraum jedoch erforderlich, um die Winter-Bedingung konsequent zu erfüllen. Trotz des längeren Mittelungszeitraumes herrschen ähnliche Bedingungen wie bei der DIN 4701, da die Zeitkonstanten der hier betrachteten energieeffizienten Gebäude bei gleicher Speicherkapazität wegen des hohen Wärmeschutzes um den Faktor 3 bis 5 über denen eines üblichen Altbaus (Beispiel für Büro-Altbau siehe [Knissel 1999]) liegen. Die stationäre Heizlast wird entsprechend in vergleichbarer Größenordnung liegen. Die DIN 4701 geht dabei jedoch von einer kontinuierlichen Beheizung aus, während hier ein intermittierender Heizbetrieb angenommen wird. Kritisch könnte im vorliegenden Fall insbesondere das Aufheizen des ausgekühlten Gebäudes nach einer Wochenabschaltung sein. Entsprechende Untersuchungen werden in Abschnitt 5.7 und Anhang A-12 durchgeführt.

5.2.2 Über die Zuluft transportierbare Heizleistung

Die maximale über die Zuluft transportierbare mittlere Heizleistung \bar{Q}_{Zu} berechnet sich für die hier untersuchte Fragestellung aus dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom und der Temperaturdifferenz von Zu- und Raumlufte, wobei für beide Größen die Wochenmittelwerte bei Auslegungsbedingungen angesetzt werden.

Das Luftvolumen und damit auch der Volumenstrom verändert sich in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Alle im Folgenden angegebenen Werte für Volumen und Volumenstrom beziehen sich auf Raumtemperatur und Umgebungsdruck.

$$\text{Gl. 5-22} \quad \bar{Q}_{Zu} = \bar{V}_{hyg} \cdot c_L \cdot \Delta\bar{T}_{Zu}$$

mit

\bar{V}_{hyg} hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom unter Auslegungsbedingungen als Wochenmittelwert

$\Delta\bar{T}_{Zu}$ maximale Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Raumlufte unter Auslegungsbedingungen als Wochenmittelwert unter Auslegungsbedingungen.

Die maximale Zulufttemperaturdifferenz $\Delta\bar{T}_{Zu}$ ergibt sich aus der maximalen Temperatur, mit der die Zuluft in das beheizte Gebäudevolumen eintritt T_{Zu} , vermindert um die Raumtemperatur \bar{T}_R . Da T_{Zu} durch die bei 55°C bis 60°C einsetzende Staubverschmelzung begrenzt und damit im Zeitverlauf konstant ist, entspricht der Wochenmittelwert dem Maximalwert. Die Angabe eines Wochenmittelwertes ist daher nicht erforderlich.

$$\text{Gl. 5-23} \quad \Delta\bar{T}_{Zu} = T_{Zu,max} - \bar{T}_R$$

mit

$T_{Zu,max}$ maximale Zulufttemperatur beim Eintritt in die beheizte Gebäudehülle.

Der hygienisch erforderliche mittlere Außenluftvolumenstrom setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen (siehe Abb. 5-10):

1. dem während der Nutzungszeit erforderlichen Außenluftbedarf
2. dem Außenluftbedarf in der morgendlichen Spülphase zum Weglüften der Verunreinigungen, die sich in der Abschaltzeit der Lüftungsanlage in der Raumlufte angereichert haben.

$$\text{Gl. 5-24} \quad \bar{V}_{hyg} = \bar{V}_{hyg,Nutz} + \bar{V}_{hyg,Spül}$$

mit folgenden Größen als Wochenmittelwerte unter Auslegungsbedingungen

$\bar{V}_{hyg,Nutz}$ hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom während der Nutzungszeit

$\bar{V}_{hyg,Spül}$ hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom in der Spülphase.

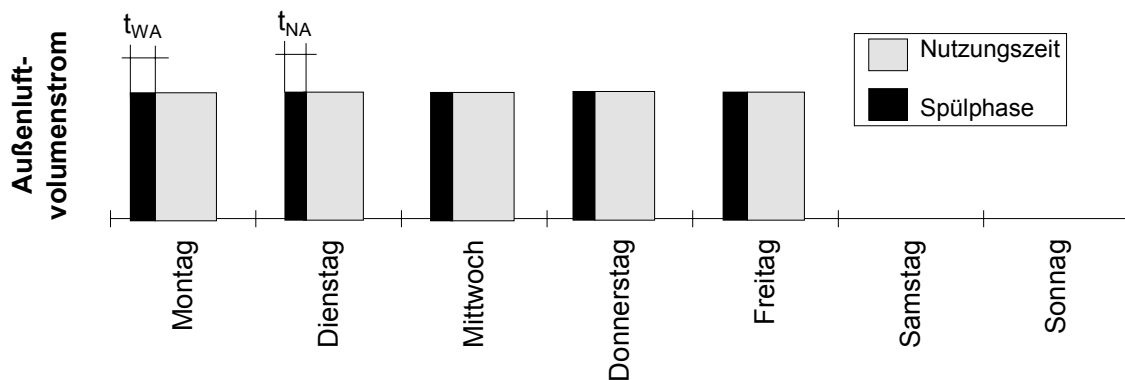


Abb. 5-10: Wöchentliche Laufzeit der Lüftungsanlage zum Fördern des aus hygienischen Gründen erforderlichen Mindestluftwechsels

Im Folgenden wird die Definition und die Quantifizierung von $\bar{V}_{hyg,Nutz}$ und $\bar{V}_{hyg,Spül}$ näher erläutert.

Außenluftbedarf während der Nutzungszeit $\dot{V}_{hyg,Nutz}$

Die während der Nutzungszeit in den Büros mindestens erforderliche Außenluftmenge ist in DIN 1946 Teil 2 festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verunreinigungslasten in dem Gebäude durch eine entsprechende Produktwahl so weit reduziert sind, dass mit dem hygienischen Mindestaußenluftbedarf der DIN 1946 eine ausreichende Luftqualität erzielt werden kann.

In der DIN 1946 wird eine personen- oder eine flächenbezogene Mindestaußenluftmenge definiert, wobei der größere der beiden Werte einzuhalten ist. Da in Büros die maximale Personenbelegungsdichte üblicherweise auf 10 m² Hauptnutzfläche pro Person begrenzt ist, kommt in der Regel die flächenbezogene Außenluftmenge zum Tragen. Damit berechnet sich der hygienisch erforderliche Außenluftvolumenstrom für die Büros wie folgt:

$$\text{Gl. 5-25} \quad \dot{V}_{hyg,Nutz} = v_{hyg} \cdot A_{HNF}$$

mit

v_{hyg} flächenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom.

Auf den Verkehrs-, Funktions- und Nebennutzflächen wird - in Abweichung zu den Simulationsrechnungen aus Abschnitt 4 - kein hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom angenommen. Es wird von dem in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Passivhaus-Lüftungskonzept ausgegangen (siehe Abb. 5-2). Der hygienische Außenluftvolumenstrom während der Nutzungszeit ergibt sich also aus dem Mindest-Volumenstrom der Hauptnutzflächen.

Außenluftbedarf in der morgendlichen Spülphase $\dot{V}_{hyg.,Spül}$

Neben der Außenluftversorgung während der Nutzungszeit muss sichergestellt sein, dass zu Nutzungsbeginn eine ausreichende Raumlufthqualität in dem Gebäude herrscht. Wird die Lüftungsanlage z. B. am Wochenende abgeschaltet, reichern sich die von Einrichtungsgegenständen sowie Bauteiloberflächen abgegebenen Verunreinigungen in der Raumlufth an. Diese müssen von der Lüftungsanlage vor Beginn der Nutzungszeit abgeführt werden, damit die gewünschte Raumlufthqualität erreicht wird.

Zur erforderlichen Länge der morgendlichen Spülphase gibt es keine Aussagen in den DIN-Normen oder VDI-Richtlinien. Um dennoch eine Einschätzung zu ermöglichen, werden im Anhang A-10 Abschätzungen durchgeführt. Unter Einbeziehung der Arbeiten von Prof. Fanger [Fanger 1988] wird untersucht, welche Zeit und welcher Luftwechsel zum „Weglüften“ einer gewissen Anfangskonzentration erforderlich sind. Da es noch keine belastbaren Aussagen zu Verunreinigungslasten in hygienisch gut geplanten Gebäuden gibt, der Anreicherungsprozess sehr einfach modelliert wurde und die Länge der Spülphase natürlich von den jeweiligen Randbedingungen abhängt, sind die folgenden Angaben nur als Anhaltswerte zu verstehen.

Unter der Annahme, dass auch in der Spülphase nur der hygienisch erforderliche Außenluftwechsel nach DIN 1946 gefördert wird, lassen sich aus den Untersuchungen im Anhang A-10 unter Verwendung folgender Randbedingungen

- Verunreinigungslast außerhalb der Nutzungszeit $G = 0,1 \text{ olf/m}^2$
- empfundene Außenluftqualität $D_A = 0,2 \text{ decipol}$
- Maximal zulässige Differenz zwischen Raum- und Außenluftqualität zu Beginn der Nutzungszeit $\Delta D = 0,1 \text{ decipol}$
- flächenbezogene Mindestaußenluftmenge $v_{hyg} = 4 \text{ m}^3/\text{m}^2$
- mittlere lichte Raumhöhe $H_G = 3 \text{ m}$

die in Tab. 5-2 angegebenen Anhaltswerte für die morgendliche Spülphase nennen.

Abschaltzeitraum	Länge der Spülphase
Nachtabstaltung für 13 Stunden	$t_{NA} = 4 \text{ Stunden}$
Wochenendabstaltung für 61 Stunden	$t_{WA} = 5 \text{ Stunden}$

Tab. 5-2: Anhaltswerte für die erforderliche Länge der morgendlichen Spülphase (siehe auch Abb. 5-10)

mit

t_{NA} Länge der Spülphase nach einer Nachtabstaltung

t_{WA} Länge der Spülphase nach einer Wochenendabstaltung.

Die wöchentliche Laufzeit der Lüftungsanlage zum morgendlichen Abtransport der Luftverunreinigungen berechnet sich zu

$$\text{Gl. 5-26} \quad t_{\text{Spül}} = n_{NA} \cdot t_{NA} + n_{WA} \cdot t_{WA}$$

mit

$t_{\text{Spül}}$ wöchentliche Spülzeit zum Abtransport der Verunreinigungen

n_{NA} Anzahl der Wochentage, vor denen eine Nachtab senkung vorgenommen wird

n_{WA} Anzahl der Wochentage, vor denen eine Wochenendabsenkung vorgenommen wird.

Wochenmittelwert des erforderlichen Außenluftbedarfs

Der über die Woche gemittelte Außenluftvolumenstrom berechnet sich damit zu

$$\text{Gl. 5-27} \quad \bar{V}_{\text{hyg}} = \frac{v_{\text{hyg}} \cdot A_{\text{HNF}} \cdot t_{\text{Nutz}} + v_{\text{hyg}} \cdot A_{\text{HNF}} \cdot t_{\text{Spül}}}{t_{\text{Woche}}} = v_{\text{hyg}} \cdot A_{\text{HNF}} \cdot \frac{t_{\text{Nutz}} + t_{\text{Spül}}}{t_{\text{Woche}}}$$

mit

t_{Nutz} wöchentliche Nutzungszeit des Gebäudes in h

t_{Woche} Stunden pro Woche.

Wird ein Betriebszeitfaktor κ definiert mit

$$\text{Gl. 5-28} \quad \kappa = \frac{t_{\text{Nutz}} + t_{\text{Spül}}}{t_{\text{Woche}}},$$

lässt sich die Bestimmungsgleichung für den Außenluftvolumenstrom wie folgt schreiben:

$$\text{Gl. 5-29} \quad \bar{V}_{\text{hyg}} = v_{\text{hyg}} \cdot A_{\text{HNF}} \cdot \kappa.$$

Wird Gl. 5-29 in Gl. 5-22 eingesetzt, ergibt sich folgender Ausdruck für die unter Auslegungsbedingungen über die Zuluft transportierbare mittlere Heizleistung:

$$\text{Gl. 5-30} \quad \bar{Q}_{\text{Zu}} = v_{\text{hyg}} \cdot A_{\text{HNF}} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{\text{Zu}}.$$

5.2.3 Gebäudeheizlast

Aus Gl. 5-20 und Gl. 5-21 ergibt sich folgender Zusammenhang für die stationären Gebäudeheizlast \bar{Q}_{Geb} :

$$\text{Gl. 5-31} \quad \bar{Q}_{Geb} = \bar{Q}_{Lüft,Geb} + \bar{Q}_{Trans} + \bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}.$$

Die Lüftungswärmeverluste setzen sich nach Gl. 4-3 aus dem Anteil über geöffnete Fenster und dem Anteil über Fugen zusammen. In den hier durchgeführten Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Fenster nicht geöffnet werden, so dass

$$\dot{Q}_{Lüft,Fe} = 0.$$

Über die Zuluftheizung gedeckt werden muss nur der Luftwechsel über Fugen und Undichtheiten. Dieser berechnet sich wie folgt

$$\text{Gl. 5-32} \quad \dot{Q}_{Lüft,Fug} = n_{Fugen} \cdot V_{Geb} \cdot c_L \cdot (T_A - T_R) = n_{Fugen} \cdot V_{Geb} \cdot c \cdot \Delta T_U$$

mit

n_{Fugen} mittlerer Luftwechsel durch Fugen und Undichtheiten
 ΔT_U Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Raumtemperatur.

Da es sich bei $\dot{Q}_{Lüft,Fug}$ um einen Wärmeverlust, d. h. abgeführten Wärmestrom handelt, muss der Zahlenwert entsprechend der Vorzeichendefinition aus Abschnitt 4.1.4 negativ sein. Dies wird in der Berechnungsgleichung durch die Definition der Temperaturdifferenz $\Delta T_U = T_A - T_R$ erreicht. Da im Falle des Wärmeverlustes $T_A \leq T_R$ ist, wird ΔT_U und damit $\dot{Q}_{Lüft,Fug}$ negativ.

Bei Bürogebäuden werden die Lüftungsanlagen häufig mit einem gewissen Zuluftüberschuss betrieben, um Infiltration über Fugen zu vermeiden. Sofern mit einem geringen Zuluftüberschuss (ca. 10 %) Infiltration sicher vermieden wird, kann $n_{Fugen} = 0$ gesetzt und somit dieser Term vernachlässigt werden. In den hier durchgeführten Untersuchungen wird ein derartiger Zuluftüberschuss nicht realisiert. Es wird eine ausgeglichene Luftbilanz angenommen ($\dot{m}_{Zu} = \dot{m}_{Ab}$) und entsprechend der Luftwechsel über Fugen berücksichtigt.

Die über eine Woche gemittelten maximalen Lüftungsverluste durch Undichtheiten erhält man, indem für die Umgebungs- wie auch die Raumlufttemperatur der Wochenmittelwert bei Auslegungsbedingungen eingesetzt wird:

$$\text{Gl. 5-33} \quad \Delta \bar{T}_U = \bar{T}_A - \bar{T}_R.$$

Hinweise zum Ermitteln von $\bar{T}_{A,max}$ und \bar{T}_R werden in den Abschnitten 5.3.2 und 5.4.1 gegeben.

$$\text{Gl. 5-34} \quad \dot{\bar{Q}}_{\text{Lüft.,Fug}} = n_{\text{Fugen}} \cdot V_{\text{Geb}} \cdot c_L \cdot (\bar{T}_A - \bar{T}_R) = n_{\text{Fugen}} \cdot V_{\text{Geb}} \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U.$$

Die Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle \dot{Q}_{Trans} berechnen sich vereinfacht nach folgender Formel, wobei auch hier aufgrund der Vorzeichendefinition die oben definierte Temperaturdifferenz verwendet wird:

$$\text{Gl. 5-35} \quad \dot{Q}_{\text{Trans}} = A_{\text{Hülle}} \cdot U_{\text{ges}} \cdot \Delta T_U.$$

Die über eine Woche gemittelten maximalen Transmissionswärmeverluste werden durch Berücksichtigung der mittleren Temperaturdifferenz $\Delta \bar{T}_U$ nach Gl. 5-33 bestimmt. Fügt man diese in Gl. 5-35 ein ergibt sich

$$\text{Gl. 5-36} \quad \dot{\bar{Q}}_{\text{Trans}} = A_{\text{Hülle}} \cdot U_{\text{ges}} \cdot \Delta \bar{T}_U.$$

Setzt man die Gleichungen Gl. 5-34 und Gl. 5-36 in Gl. 5-31 ein, ergibt sich folgender Ausdruck für den Wochenmittelwert der stationären Gebäudeheizlast unter Auslegungsbedingungen:

$$\text{Gl. 5-37} \quad \dot{\bar{Q}}_{\text{Geb}} = (n_{\text{Fugen}} \cdot V_{\text{Geb}} \cdot c_L + A_{\text{Hülle}} \cdot U_{\text{ges}}) \cdot \Delta \bar{T}_U + \dot{\bar{Q}}_{\text{Sol}} + \dot{\bar{Q}}_{\text{int}}.$$

5.2.4 Bestimmungsgleichung

Ziel der Umformung ist es, die Anforderungen an den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{ges} zu beschreiben, die sich aus der Bedingung „Beheizbarkeit über die Zuluft“ ergeben. Setzt man Gl. 5-30 und Gl. 5-37 in Gl. 5-21 ein, ergibt sich nach Umformen

$$\text{Gl. 5-38} \quad U_{ges} \leq - \frac{(v_{hyg} \cdot A_{HNF} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu} + n_{Fugen} \cdot V_{Geb} \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + \bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int})}{A_{Hülle} \cdot \Delta \bar{T}_U}.$$

Der maximale mittlere Wärmedurchgangskoeffizient U_{max} berechnet sich, indem Gl. 5-21 auf die Grenzbedingung

$$\text{Gl. 5-39} \quad -\bar{Q}_{Zu} = \bar{Q}_{Geb}$$

reduziert wird. Analog Gl. 5-38 folgt für U_{max}

$$\text{Gl. 5-40} \quad U_{max} = - \frac{(v_{hyg} \cdot A_{HNF} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu} + n_{Fugen} \cdot V_{Geb} \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + \bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int})}{A_{Hülle} \cdot \Delta \bar{T}_U}.$$

Damit ist eine Berechnungsgleichung für das Winterkriterium U_{max} gegeben. Wie die Parameterstudie in Abschnitt 4.5.5 zeigt, hängt der Primärenergiekennwert Heizung und damit auch die Gebäudeheizlast vom A/V-Verhältnis ab. Gl. 5-40 wird deswegen so umgeformt, dass sich ein Zusammenhang zwischen U_{max} und dem A/V-Verhältnis ergibt.

Das A/V-Verhältnis ist nach Gl. 4-9 definiert als

$$\text{Gl. 5-41} \quad AV = \frac{A_{Hülle}}{V_{Geb,brutto}}.$$

Wird das beheizte Bruttovolumen über die Beziehung

$$\text{Gl. 5-42} \quad V_{Geb,brutto} = \frac{A_{HNF}}{\zeta} \cdot H_{G,brutto}$$

mit

ζ Anteil der Hauptnutzfläche an der Brutto-Grundfläche

$H_{G,brutto}$ mittlere Brutto-Geschosshöhe

in Gl. 5-30 eingefügt, ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\text{Gl. 5-43} \quad \bar{Q}_{Zu} = V_{Geb,brutto} \cdot \frac{\zeta}{H_{G,brutto}} \cdot v_{hyg} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu}.$$

Bei Definition einer Konstanten Y

$$\text{Gl. 5-44} \quad Y = \frac{\zeta}{H_{G,brutto}} v_{hyg} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu}$$

lässt sich Gl. 5-43 vereinfacht wie folgt schreiben:

$$\text{Gl. 5-45} \quad \bar{Q}_{Zu,max} = V_{Geb,brutto} \cdot Y.$$

Wird das Verhältnis von Netto- zu Brutto-Volumen des Gebäudes ψ eingeführt

$$\text{Gl. 5-46} \quad V_{Geb} = \psi \cdot V_{Geb,brutto},$$

kann Gl. 5-37 in folgender Form geschrieben werden:

$$\text{Gl. 5-47} \quad \bar{Q}_{Geb} = (n_{Fugen} \cdot \psi \cdot V_{Geb,brutto} \cdot c_L + A_{Hülle} \cdot U_{max}) \cdot \Delta \bar{T}_U + \bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}.$$

Durch Einführung einer Konstante W lässt sich schreiben

$$\text{Gl. 5-48} \quad \bar{Q}_{Geb} = A_{Hülle} \cdot W$$

mit

$$\text{Gl. 5-49} \quad W = n_{Fugen} \cdot \psi \cdot \frac{V_{Geb,brutto}}{A_{Hülle}} \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + U_{max} \cdot \Delta \bar{T}_U + \frac{\bar{Q}_{Sol}}{A_{Hülle}} + \frac{\bar{Q}_{int}}{A_{Hülle}}.$$

Durch Umformen der Gl. 5-45 und Gl. 5-48 kann das A/V -Verhältnis wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Gl. 5-50} \quad AV = \frac{A_{Hülle}}{V_{Geb,brutto}} = \frac{\bar{Q}_{Geb}}{W} \cdot \frac{Y}{\bar{Q}_{Zu}}.$$

Nach Umstellen ergibt sich

$$\text{Gl. 5-51} \quad \frac{\bar{Q}_{Geb}}{\bar{Q}_{Zu}} = \frac{AV \cdot W}{Y}.$$

Aus Gl. 5-39 folgt die Bedingung

$$\text{Gl. 5-52} \quad \frac{\bar{Q}_{Geb}}{\bar{Q}_{Zu}} = -1$$

und damit

$$\text{Gl. 5-53} \quad \frac{AV \cdot W}{Y} = -1$$

bzw.

$$\text{Gl. 5-54} \quad -W = \frac{Y}{AV}.$$

Werden die Konstanten W und Y wieder ausgeschrieben, stellt sich Gl. 5-54 wie folgt dar:

$$\text{Gl. 5-55} \quad - \left(n_{Fugen} \cdot \psi \cdot \frac{1}{AV} \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + U_{max} \cdot \Delta \bar{T}_U + \frac{\bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}}{A_{Hülle}} \right) = \frac{1}{AV} \cdot \frac{\zeta}{H_{G,brutto}} v_{hyg} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu}.$$

Die solaren und internen Gewinne werden wie folgt umgeformt:

$$\begin{aligned} \text{Gl. 5-56} \quad \frac{\bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}}{A_{Hülle}} &= \frac{\bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}}{A_{Hülle}} \cdot \frac{V_{Geb,brutto}}{V_{Geb,brutto}} = \frac{1}{AV} \cdot \frac{\bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int}}{V_{Geb,brutto}} \\ &= \frac{1}{AV} \cdot \frac{(\bar{Q}_{Sol} + \bar{Q}_{int})}{A_{BGF} \cdot H_{G,brutto}} = \frac{1}{AV} \cdot \frac{(\bar{q}_{Sol} + \bar{q}_{int})}{H_{G,brutto}}, \end{aligned}$$

wobei \bar{q}_{Sol} und \bar{q}_{int} die auf die Bruttogrundfläche A_{BGF} bezogenen Wärmegewinne bei Auslegungsbedingungen sind. Wird dieser Ausdruck in Gl. 5-55 eingesetzt, ergibt sich nach Umformung die gesuchte Abhängigkeit zwischen U_{max} und dem AV -Verhältnis AV wie folgt:

$$\text{Gl. 5-57} \quad U_{max} = - \frac{\left(\frac{\zeta}{H_{Geschoss}} v_{hyg} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu} + n_{Fugen} \cdot \psi \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + \frac{\bar{q}_{Sol} + \bar{q}_{int}}{H_{G,brutto}} \right)}{AV \cdot \Delta \bar{T}_U}.$$

Über diese Gleichung kann der maximale mittlere Wärmedurchgangskoeffizient U_{max} der Gebäudehülle bestimmt werden, der für eine Beheizung über die Zuluft und damit für die Erfüllung der Winter-Bedingung eingehalten bzw. unterschritten werden muss.

5.2.5 Berücksichtigung von Atrien

Um Gebäude mit Atrien berücksichtigen zu können, muss Gl. 5-42 entsprechend erweitert werden. Hierzu wird ein so genannter Atriumfaktor ξ definiert:

$$\text{Gl. 5-58} \quad \xi = \frac{V_{Atrium,brutto}}{V_{Geb,BGF}} = \frac{V_{Atrium,brutto}}{(V_{Geb,brutto} - V_{Atrium,brutto})}$$

mit

ξ Atriumfaktor

$V_{Atrium,brutto}$ Bruttovolumen des Atriums (ab $H_{G,brutto}$ gerechnet)

$V_{Geb,BGF}$ über die Bruttogrundfläche und die Geschosshöhe ermitteltes Gebäudevolumen ($V_{Geb,Brutto} = H_{G,brutto} \cdot A_{BGF}$).

Da der Fußboden des Atriums mit zur Brutto-Grundfläche des Gebäudes zählt, ist das Atriumvolumen $V_{Atrium,brutto}$ erst ab einer Höhe von $H_{G,brutto}$ definiert (siehe Abb. 5-11).

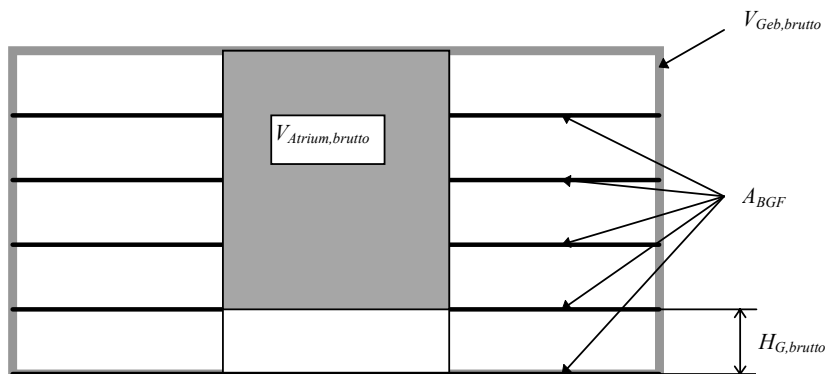


Abb. 5-11: Definition des Atriumvolumens $V_{Atrium,brutto}$

Der Atriumfaktor wird in Gl. 5-42 eingebunden, um das Brutto-Gebäudevolumen $V_{Geb,brutto}$ zu quantifizieren:

$$\text{Gl. 5-59} \quad V_{Geb,brutto} = \frac{A_{HNF}}{\xi} \cdot H_{G,brutto} \cdot (1 + \xi).$$

Wird dieser Faktor in den Umformungen aus Abschnitt 5.2.4 berücksichtigt, ergibt sich aus Gl. 5-57 folgende Form für die Berechnungsgleichung von U_{max} :

Gl. 5-60

$$U_{max} = - \frac{\left(\frac{\xi}{(1 + \xi) \cdot H_{Geschoss}} v_{hyg} \cdot \kappa \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_{Zu} + n_{Fugen} \cdot \psi \cdot c_L \cdot \Delta \bar{T}_U + \frac{\bar{q}_{Sol} + \bar{q}_{int}}{(1 + \xi) \cdot H_{G,brutto}} \right)}{AV \cdot \Delta \bar{T}_U}.$$

5.3 Klimarandbedingungen

Als Klimarandbedingungen müssen die Außentemperatur und die solaren Einträge für die Berechnung definiert werden. Grundlage sind die Auslegungsdaten der DIN 4701, die entsprechend modifiziert werden.

5.3.1 Solare Einträge

Der Beitrag der solaren Einträge wird in der DIN 4701 durch eine Reduktion des U-Wertes der transparenten Bauteile, im vorliegenden Fall der Fenster, berücksichtigt. Der Reduktionswert für die Sonnenkorrektur ΔU_s berechnet sich nach folgender Beziehung:

$$\text{Gl. 5-61} \quad \Delta U_s = -0,35 \cdot g_{\perp}$$

mit

ΔU_s Reduktionswert für die Sonnenkorrektur nach DIN 4701
 g_{\perp} g-Wert der Verglasung bei senkrechtem Strahlungseinfall.

Der Wärmestrom durch solare Einträge ergibt sich damit zu

$$\dot{q}_{sol} = \varphi \cdot (-\Delta U_s) \cdot \Delta T_U = \varphi \cdot 0,35 \cdot g_{\perp} \cdot \Delta T_U,$$

wobei φ dem Verhältnis von Fenster- zu Brutto-Grundfläche entspricht,

$$\text{Gl. 5-62} \quad \varphi = \frac{A_F}{A_{BGF}}$$

mit

A_F Fensterfläche (Rohbaumaß)

bzw. als Wochenmittelwert zu

$$\text{Gl. 5-63} \quad \bar{q}_{sol} = \varphi \cdot 0,35 \cdot g_{\perp} \cdot \Delta \bar{T}_U.$$

5.3.2 Außenlufttemperatur

Die Außenlufttemperaturen, die für die Bestimmung des Wärmebedarfs heranzuziehen sind, sind in der DIN 4701 Teil 2 für unterschiedliche Standorte definiert. Angegeben ist der niedrigste Zweitagesmittelwert (48 Stunden), der innerhalb von 20 Jahren 10 mal unterschritten wurde. Für Frankfurt am Main wie auch für Würzburg (entspricht mittlerem Klima für Deutschland) liegt diese Auslegungstemperatur beispielsweise bei -12°C .

Bei den hier angestellten Untersuchungen wird ein längerer Mittelungszeitraum von 7 Tagen angewandt. Entsprechend muss ein 7-Tagesmittelwert für die Außentemperatur angesetzt werden. Ein solcher Wert ist in den entsprechenden Normen nicht zu finden. Um dennoch eine Abschätzung zu ermöglichen, werden unterschiedliche Wetterdatensätze (Testreferenzjahre)

ausgewertet und untersucht, wie stark sich die Minimaltemperatur eines Jahres bei einer Mittelung über 2 Tage von der bei einer Mittelung über 7 Tage unterscheidet. Das Ergebnis zeigt Abb. 5-12.

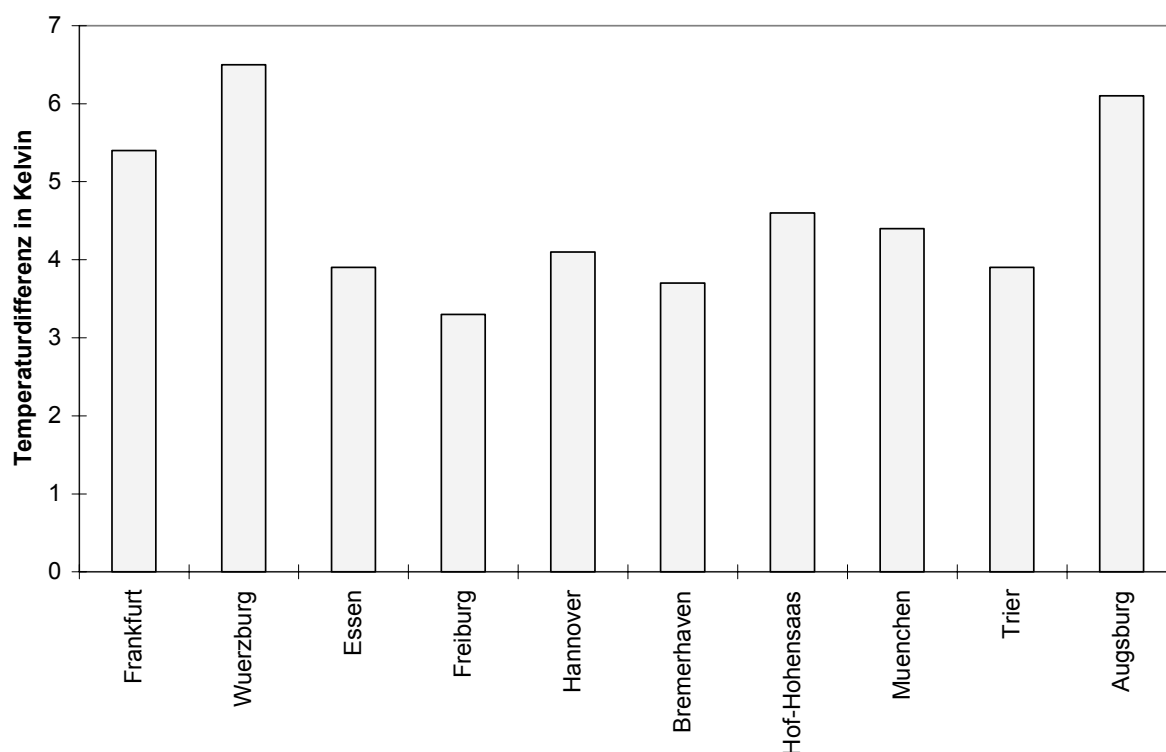


Abb. 5-12: Differenz zwischen den minimalen Außentemperaturen bei einer Mittelung über 2 und über 7 Tage für unterschiedliche Wetterdatensätze (Testreferenzjahre)

Der 7-Tagesmittelwert liegt bei den hier ausgewerteten Wetterdatensätzen um 3,3 bis 6,5 Kelvin über dem 2-Tagesmittelwert. Für die weiteren Berechnungen wird die Auslegungstemperatur nach DIN 4701 um 4 Kelvin angehoben:

Gl. 5-64
$$\bar{T}_A = T_{DIN4701} + 4 K \quad .$$

Die hier gefundene Abhängigkeit der Außenlufttemperatur vom Mittelungszeitraum kann als erste Abschätzung verwendet werden. Sie sollte aber durch die Auswertung des statistischen Materials der Wetterämter verifiziert werden. Bis dies erfolgt ist, sollte auf die nach DIN 4701 mögliche Außentemperaturkorrektur in Abhängigkeit von der Speicherfähigkeit (thermische Zeitkonstante) verzichtet werden. Die hohe Zeitkonstante der hier betrachteten Gebäude stellt somit eine zusätzliche Sicherheit dar.

5.4 Anwendung auf das Beispielgebäude

Im Folgenden wird die Berechnungsgleichung Gl. 5-57 auf das in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Beispielgebäude angewendet und aufgezeigt, welche Anforderungen sich für U_{max} in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis ergeben.

5.4.1 Randbedingungen

Die Randbedingungen der Berechnung leiten sich weitgehend aus dem Gebäudemodell der Simulationsrechnungen aus Abschnitt 4 ab, wobei die in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Änderungen berücksichtigt sind. Abweichungen davon werden vereinzelt getroffen, zum einen um die Randbedingungen der DIN 4701 und anderer Normen zu erfüllen. Zum anderen soll über die Definition der Randbedingungen eine Hierarchie im Ergebnis sichergestellt werden und zwar dahingehend, dass die Anforderungen an U_{max} mit zunehmender Genauigkeit bei der Berechnung immer geringer ausfallen. Bei der ersten Abschätzung werden somit tendenziell konservative Annahmen getroffen.

Differenz Umgebungs- und Raumtemperatur

Für die Ermittlung der Gebäudeheizlast ist die Differenz zwischen Raum- und Außentemperatur erforderlich. Da bei den Berechnungen Auslegungsbedingungen angenommen werden, wird als Raumtemperatur die in der DIN 4701 definierte Norminnentemperatur herangezogen.

Bei dieser Größe handelt es sich um eine empfundene Temperatur, die neben der Lufttemperatur auch die Oberflächentemperatur mit berücksichtigt. Geringe Oberflächentemperaturen aufgrund eines schlechten Wärmeschutzes werden in der DIN 4701 durch entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt. Bei den hier betrachteten hoch wärmegeämmten Gebäuden ist keine Außenflächenkorrektur erforderlich. Die Differenz zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur ist gering, wodurch sich vergleichsweise hohe empfundene Temperaturen ergeben.

Für die hier betrachteten Büro- und Verwaltungsgebäude liegen die Norminnentemperaturen zwischen 20°C für Büro, Ausstellungsräume und Haupttreppen sowie 15°C für Flur, WC und Lager.

In den Zeiträumen ohne Beheizung wird die Raumtemperatur absinken. Die Endtemperatur ist abhängig vom gesamten Wärmeleitwert des Gebäudes H_{ges} (Transmission+Lüftung), der wirksamen Speicherkapazität C , der Temperaturdifferenz innen und außen ΔT_U und der Auskühlzeit t_{AK} (siehe Anhang A-12.1). Da die Berechnung des Auskühlverhaltens umfangreich ist, wird für die Ermittlung von U_{max} vereinfachend die Norminnentemperatur der Hauptnutzflächen als Raumtemperatur für die gesamte Woche angesetzt, was einer konservativen Annahme entspricht:

$$\bar{T}_R = 20^\circ C .$$

Die über 7 Tage gemittelte Außentemperatur wird entsprechend Gl. 5-64 bestimmt, wobei als Standort Frankfurt bzw. Würzburg mit einer Normaußentemperatur von $T_A = -12^\circ\text{C}$ gewählt wird:

$$\bar{T}_A = T_{DIN4701} + 4K = -12^\circ\text{C} + 4K = -8^\circ\text{C} .$$

Die Temperaturdifferenz $\Delta\bar{T}_U$ berechnet sich über Gl. 5-33 zu

$$\Delta\bar{T}_U = \bar{T}_A - \bar{T}_R = -8^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = -28K .$$

maximale Zulufttemperaturdifferenz

Um Staubverschmelung im Nachheizregister und die damit einhergehende Geruchsbelästigung zu vermeiden, sollte die Luft im Zuluftheizregister auf maximal 55 bis 60 °C erwärmt werden. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Zuluft mit

$$T_{Zu,max} = 50^\circ\text{C}$$

in die beheizte Gebäudehülle eintritt. Die Differenz zu 55°C trägt Wärmeverlusten im kalten Bereich (Keller) Rechnung. Wärmeverluste im „warmen Bereich“ werden bei dieser gebäudebezogenen Betrachtung als dem Gebäude zugeführte Heizleistung gewertet.

Die maximale Zulufttemperaturdifferenz ergibt sich damit nach Gl. 5-23 zu

$$\Delta\bar{T}_{Zu} = T_{Zu,max} - \bar{T}_R = 50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 30K .$$

Betriebszeitfaktor der Lüftungsanlage

Der Betriebszeitfaktor der Lüftungsanlage berechnet sich nach Gl. 5-28. Als wöchentliche Nutzungszeit wird der Standardwert von [SIA 380/4] und [LEE 1995] gewählt. Hier wird von einer täglichen Nutzungszeit von 11 Stunden und fünf Werktagen pro Woche ausgegangen:

$$t_{Nutz} = 11 \frac{h}{d} \cdot 5 \frac{d}{w} = 55 \frac{h}{w} .$$

Die Anzahl der Stunden pro Woche belaufen sich auf

$$t_{Woche} = 7 \frac{d}{w} \cdot 24 \frac{h}{d} = 168 \frac{h}{w} .$$

Die Spülzeit beträgt entsprechend den Abschätzungen im Anhang A-10

- Spülphase nach einer Nachtabstaltung t_{NA} 4 h
- Spülphase nach einer Wochenendabstaltung t_{WA} 5 h .

Unter folgenden Annahmen

- Anzahl der Wochentage, vor denen eine Nachtabsenkung vorgenommen wird n_{NA} 4 Tage
- Anzahl der Wochentage, vor denen eine Wochenendabsenkung vorgenommen wird n_{WA} 1 Tag

berechnet sich die wöchentliche Spülzeit zu

$$t_{Spül} = 4h \cdot 4 + 5h \cdot 1 = 21h .$$

Der Betriebszeitfaktor der Lüftungsanlage beträgt somit

$$\kappa = \frac{55 \frac{h}{w} + 21 \frac{h}{w}}{168 \frac{h}{w}} = 0,45 .$$

Luftwechsel über Undichtheiten

Der Luftwechsel über Undichtheiten der Gebäudehülle ist von der Menge und der Verteilung der Undichtheiten im Gebäude abhängig. Er ist entsprechend nur schwer quantitativ zu erfassen. In der EN 832 ist eine Gleichung angegeben, über die der mittlere Luftwechsel während der Heizzeit in Abhängigkeit vom Drucktestergebnis (n_{50} -Wert), der Abschirmung durch die Umgebung und der Anzahl der windexponierten Fassaden abgeschätzt werden kann. Unter folgenden Annahmen

- Drucktestergebnis: $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$
- keine Abschirmung
- mehr als eine windexponierte Fassade

berechnet sich ein mittlerer Wert für die Heizzeit von

$$n_{Fugen,EN832} = 0,05 \text{ h}^{-1} .$$

Der thermische Auftrieb bezieht sich bei diesem Ansatz auf eine mittlere Außentemperatur während der Heizzeit von etwa 5°C . Im vorliegenden Fall wird aber eine Kälteperiode mit einer mittleren Außentemperatur von -8°C betrachtet. Der Anstieg des Luftwechsels aufgrund der kälteren Außentemperatur wird über einen Berechnungsansatz aus [IEA 1989] abgeschätzt. Für ein Schachttypgebäude ohne innere Widerstände ergibt sich ein zusätzlicher Wert von

$$\Delta n_{Fugen,Schacht} = 0,05 \text{ h}^{-1} ,$$

für ein Geschosstypgebäude ein Wert von

$$\Delta n_{Fugen,Geschoss} = 0,01 \text{ h}^{-1} .$$

In den weiteren Berechnungen wird als konservative Annahme der Wert des Schachttypgebäudes angesetzt:

$$n_{Fugen} = n_{Fugen,EN832} + \Delta n_{Fugen,Schacht} = 0,1 \text{ h}^{-1} .$$

Hygienischer Mindestluftwechsel

Es wird von einer reinen Büronutzung mit Einzelbüros ausgegangen. Als hygienischer Mindestluftwechsel auf der Hauptnutzfläche wird der flächenbezogene Mindestwert der DIN 1946 angenommen:

$$v_{hyg} = 4 \frac{m^3}{m^2 h} .$$

Interne Wärmequellen

Als Wochenmittelwert des Wärmestroms durch interne Wärmequellen wird nicht der Wert des in Abschnitt 4.1.3 definierten „Passiv-Bürogebäudes“ angesetzt, da dieser eine Extremvariante insbesondere im Bereich der Computer und der Beleuchtung darstellt. Zudem ist die Wärmeabgabe von zentralen Einrichtungen wie File-Server oder Fax-Server nicht berücksichtigt. Für die folgenden Berechnungen wird ein Mittelwert zwischen dem Niedrigenergie- und dem Passiv-Bürogebäude angenommen von

$$\bar{q}_{int} = 2,1 \frac{W}{m^2_{BGF}} .$$

Verhältnis von Netto- zu Bruttovolumen

Für das Verhältnis von Netto- zu Bruttovolumen wird folgender Wert angesetzt:

$$\psi = 0,78 .$$

Er ergibt sich aus dem Verhältnis von Netto- zu Bruttogrundfläche nach VDI 3807 Teil 1 von 0,87 und einem Konstruktionsflächenanteil im Bereich der horizontalen Bauteile (Kellerdecke, Geschossdecken, Dach) von 0,1.

Solare Einträge

Der Wärmestrom durch solare Einträge berechnet sich für das Beispielgebäude nach Gl. 5-63 mit

Fensterfläche	A_F	1056 m ²
Brutto-Grundfläche	A_{BGF}	4890 m ²
g-Wert bei senkrechtem Strahlungsdurchgang	g_{\perp}	0,49

zu

$$\bar{q}_{Sol} = - \frac{1056 m^2}{4890 m^2} \cdot 0,35 \cdot 0,49 \cdot (-28K) = 1,04 \frac{W}{m^2_{BGF}} .$$

Verhältnis von Hauptnutz- zu Brutto-Grundfläche ζ

Das Verhältnis von Hauptnutz- zu Brutto-Grundfläche wird entsprechend dem in der VDI 3807 Teil 1 angegebenen Mittelwert für Verwaltungsgebäude angesetzt:

$$\zeta = \frac{A_{HNF}}{A_{BGF}} = 0,48.$$

Brutto-Geschosshöhe

Die Brutto-Geschosshöhe beträgt, wie im Beispielgebäude angenommen

$$H_{G,brutto} = 3,3 \text{ m} .$$

Dies entspricht einer lichten Raumhöhe von 3 Metern und einer Dicke der Geschosdecken von 30 cm.

5.4.2 Berechnung

Für die so definierten Randbedingungen wird über Gl. 5-57 der Wert des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{max} berechnet, bis zu dem eine Beheizung des Gebäudes über den hygienischen Außenluftwechsel möglich ist und der somit zum Erfüllen der Winter-Bedingung eingehalten oder unterschritten werden muss. Die Anforderungen in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis sind in Abb. 5-13 darstellt.

Um die Interpretation des Kurvenverlaufes zu erleichtern, sind die A/V-Verhältnisse für ein großes Bürogebäude, ein kleines Bürogebäude und ein Einfamilienhaus eingezeichnet sowie die Werte von U_{ges} für die Ausführungsvarianten „Niedrigenergie-“ und „Passiv-Bürogebäude“ ([Knissel 1999] und Abschnitt 4.1.3). Die Vergleichswerte für U_{ges} können jedoch nur als erste Orientierung herangezogen werden, da sich mit dem A/V-Verhältnis auch die Flächenverhältnisse der Gebäudehülle ändern.

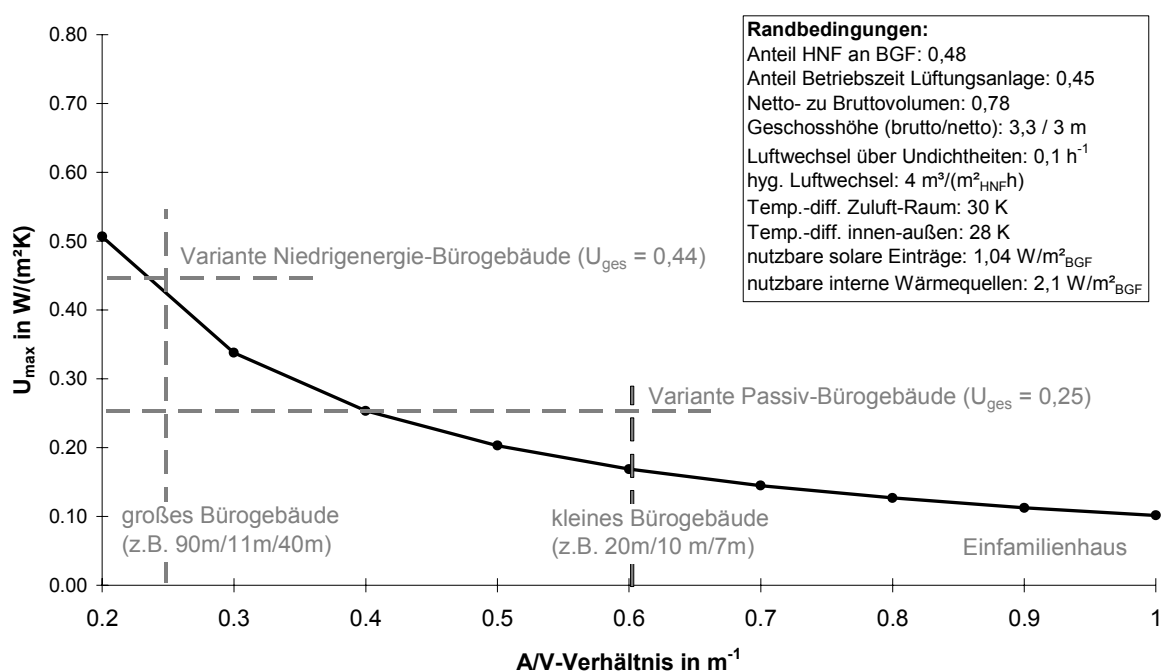


Abb. 5-13: Maximaler mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient U_{max} in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis

Es zeigt sich, dass der maximal zulässige Wert U_{max} deutlich von dem A/V-Verhältnis abhängt. Eine Beheizung über die Zuluft ist bei großen Bürogebäuden mit einem A/V-Verhältnis um 0,25 m⁻¹ bereits möglich, wenn der Wärmeschutz der Gebäudehülle dem des Niedrigenergie-Bürogebäudes entspricht. Mit dem Wärmeschutz des in Abschnitt 4.1.3 definierten „Passiv-Bürogebäude“ ist eine Beheizung über die Zuluft für Gebäude mit einem A/V-Verhältnis unter etwa 0,4 m⁻¹ möglich. Bei kleinen Gebäuden ergeben sich schärfere Anforderungen.

5.5 Sensitivitätsanalyse

Im Weiteren werden einige der U_{max} bestimmenden Randbedingungen (siehe Gl. 5-57) variiert und die Sensitivität dargestellt. Die Auswahl und die Veränderung der Parameter geht dabei über den Definitionsbereich der „Winterbedingung“ hinaus. Untersucht wird der Einfluss folgender Größen:

- Verhältnis von Hauptnutzfläche zu Brutto-Grundfläche durch Variation des Hauptnutzflächenfaktors ζ
- Brutto-Geschosshöhe $H_{G,brutto}$
- Verhältnis von Netto- zu Bruttovolumen ψ
- Betriebszeit der Lüftungsanlage, durch Variation des Betriebszeitfaktors κ
- solare Einträge \bar{q}_{Sol} und
- interne Wärmequellen \bar{q}_{int} .

Nicht weiter betrachtet werden

- der Luftwechsel über Undichtheiten n_{Fugen} , da die hohe Dichtheit der Gebäudehülle Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb der Lüftungsanlage ist und somit vorausgesetzt wird
- die Differenz zwischen Umgebung- und Raumtemperatur $\Delta\bar{T}_U$, da diese durch die DIN 4701 und die erfolgte Mittelungszeit-Korrektur für den jeweiligen Gebäudestandort festgelegt ist. Bei unterschiedlichen Standorten ändert sich natürlich auch $\Delta\bar{T}_U$.
- die Zulufttemperaturdifferenz $\Delta\bar{T}_{Zu}$, da die Maximaltemperatur der Zuluft durch die Staubverschmelzung, die minimale Raumtemperatur durch die Norminnentemperatur der DIN 4701 definiert sind und
- der hygienische Mindestluftwechsel v_{hyg} , da der Einfluss des Außenluftvolumenstroms durch ζ oder κ bereits dargestellt wird.

5.5.1 Hauptnutzflächenfaktor ζ

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die Variation des Hauptnutzflächenfaktors ζ auf die Anforderung an U_{max} auswirkt. ζ kann dabei auf unterschiedliche Weisen interpretiert werden:

1. als Verhältnis von Hauptnutzfläche (Zuluftzone) zu Brutto-Grundfläche
2. als Maß der Zuluftversorgung der Nebennutzflächen (Lüftungskonzept).

Die erste Interpretation ist selbsterklärend. Es sei nur darauf hingewiesen, dass das in Abb. 5-2 beschriebene Passivhaus-Lüftungskonzept mit Zuluft-, Überström- und Ablufträumen angenommen wird. Eine energetisch relevante Außenluftzufuhr findet hierbei nur in den Zulufträumen statt, die per Definition der Hauptnutzfläche entsprechen.

Die zweite Interpretationsmöglichkeit von ζ ermöglicht die Bewertung des Falles, dass neben den Hauptnutzflächen auch die Nebennutzflächen mit einer gewissen Außenluftmenge belüftet werden. Der den Nebennutzflächen zugeführte Außenluftvolumenstrom wird dabei in eine äquivalente belüftete Hauptnutzfläche $A_{HNF,\ddot{a}qu}$ umgerechnet, die bei der Berechnung des Hauptnutzflächenfaktors ζ mit berücksichtigt wird.

$$\text{Gl. 5-65} \quad \zeta = \frac{A_{HNF} + A_{HNF,\ddot{a}qu}}{A_{BGF}}.$$

Ein ansteigender Wert für ζ kann somit auch als eine Zuluftversorgung der Nebennutzflächen interpretiert werden.

Die Ermittlung der äquivalenten belüfteten Hauptnutzfläche erfolgt über folgenden Zusammenhang:

$$\text{Gl. 5-66} \quad A_{HNF,\ddot{a}qu} = \frac{n_{NNF}}{n_{HNF}} \cdot A_{NNF}$$

mit

A_{NNF} Nebennutzfläche nach DIN 277 Teil 1

n_{NNF} mittlerer Luftwechsel im Bereich der Nebennutzfläche

n_{HNF} mittlerer Luftwechsel im Bereich der Hauptnutzfläche.

Der mittlere Luftwechsel im Bereich der Hauptnutzfläche n_{HNF} ergibt sich über die Beziehung

$$n_{HNF} = \frac{v_{hyg}}{H_G}.$$

Im Folgenden werden die in Tab. 5-3 aufgeführten Varianten untersucht.

Hauptnutzflächenfaktor ζ = Variantenbezeichnung	alternative Interpretation Luftwechsel auf Nebennutzflächen bei $A_{HNF} / A_{BGF} = 0,48$
0,48	0 h ⁻¹
0,62	0,4 h ⁻¹
0,74	0,8 h ⁻¹
0,9	1,33 h ⁻¹

Tab. 5-3: Variantenausprägung

Abb. 5-14 zeigt den Einfluss von ζ auf den Wert von U_{max} .

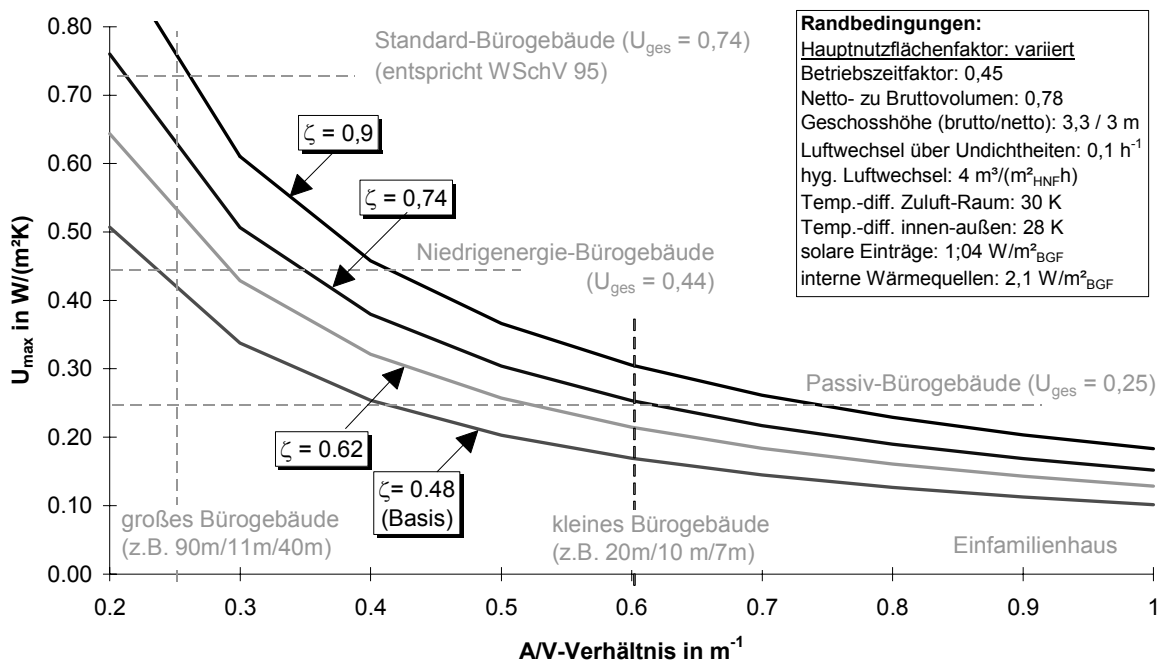


Abb. 5-14: Einfluss des Hauptnutzflächenfaktors ζ auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

Der Hauptnutzflächenfaktor hat einen deutlichen Einfluss auf U_{max} , wobei größere Werte von ζ die Anforderung an U_{max} hin zu höheren Werten verschieben. Begründung: Bei einer größeren Hauptnutzfläche oder der Außenluftversorgung von Nebennutzflächen wird dem Gebäude mehr

Außenluft innerhalb einer Woche zugeführt. Damit steigt die dem Gebäude im Wochenmittel über die Zuluft zugeführte Heizleistung und es ergeben sich geringere Anforderungen an U_{max} .

Bei einem Wert für ζ von 0,74 können auch kleine Bürogebäude mit dem Mindestaußenluftbedarf beheizt werden, sofern sie einen U-Wert entsprechend dem „Passiv-Bürogebäude“ aufweisen.

Liegt der Wert von ζ bei 0,9, müssen große Bürogebäude nur noch einen U_{max} auf dem Niveau der Wärmeschutzverordnung 1995 einhalten, damit sie über den Mindestaußenluftbedarf beheizt werden können. Selbst kleine Bürogebäude mit einem ungünstigen A/V-Verhältnis erreichen dies bei einem U_{max} von etwa 0,3 W/(m²K).

5.5.2 Brutto-Geschosshöhe $H_{G,brutto}$

Ein weiterer die Geometrie des Gebäudes beschreibender Faktor ist die Brutto-Geschosshöhe. Über diesen Wert werden die flächenspezifischen Größen in Gl. 5-57 in volumenspezifische Werte umgerechnet. Abb. 5-15 zeigt, wie sich die Anforderungen an U_{max} bei Variation der Geschosshöhe ändern.

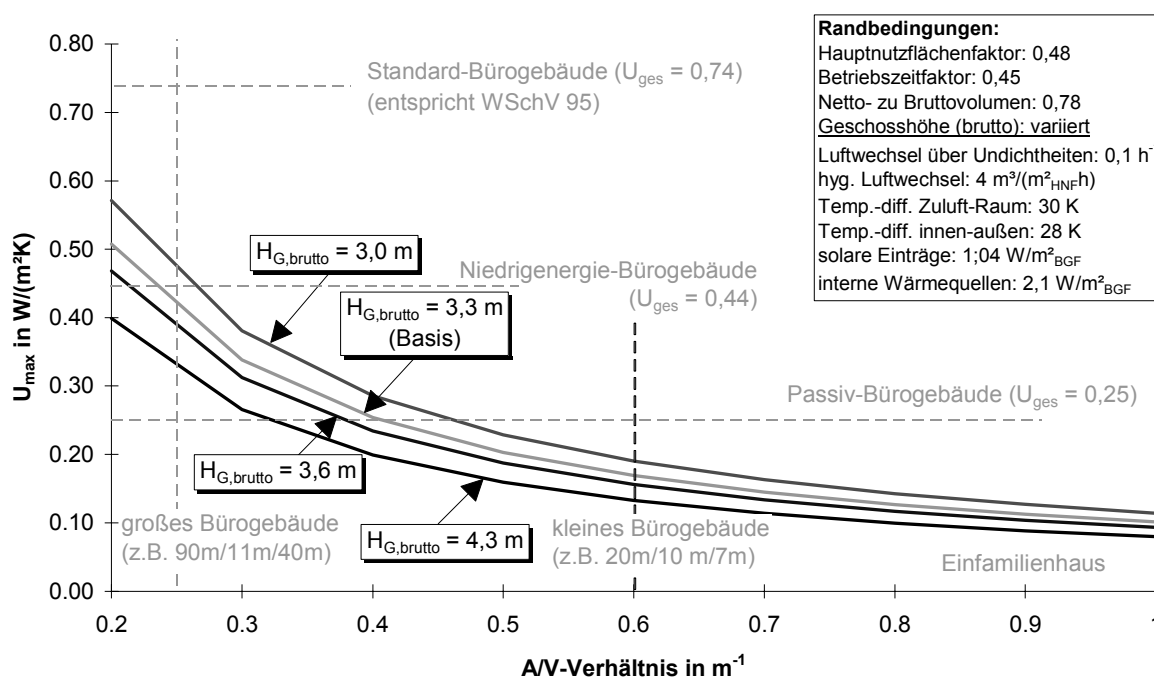


Abb. 5-15: Einfluss der Brutto-Geschosshöhe auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

Die Brutto-Geschosshöhe hat einen deutlichen Einfluss auf U_{max} , wobei eine Zunahme der Geschosshöhe zu geringeren Werten von U_{max} führt. Wird die Brutto-Geschosshöhe um einen Meter erhöht, sinkt U_{max} bei kleinen Bürogebäuden um 0,04 W/(m²K), bei großen um 0,09 W/(m²K). Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass hygienischer Außenluftbedarf und Wärmegewinne über die flächenspezifischen Größen v_{hyg} , \bar{q}_{sol} und \bar{q}_{int} quantifiziert werden und damit

bei zunehmender Geschosshöhe unverändert bleiben. Die Verluste steigen hingegen mit zunehmender Geschosshöhe an: die Transmissionsverluste wegen der sich vergrößernden Hüllfläche, die Lüftungsverluste über Undichtheiten wegen des sich vergrößernden Gebäudevolumens. Die größere Hüllfläche und das größere Gebäudevolumen müssen durch einen besseren Wert von U_{ges} ausgeglichen werden, was sich in einem geringeren U_{max} widerspiegelt.

5.5.3 Verhältnis Netto- zu Bruttovolumen des Gebäudes ψ

Die dritte geometrische Randbedingung ist das Verhältnis von Netto- zu Bruttovolumen des Gebäudes. Es wird durch die Stärke der Bauteile Dach, Kellerdecke, Geschosdecken, Außen- und Innenwände bestimmt. In den bisherigen Berechnungen wurde der für das Beispielgebäude abgeschätzte Wert von $\psi=0,78$ angenommen. Im Folgenden wird ψ variiert und die Auswirkungen auf U_{max} bestimmt.

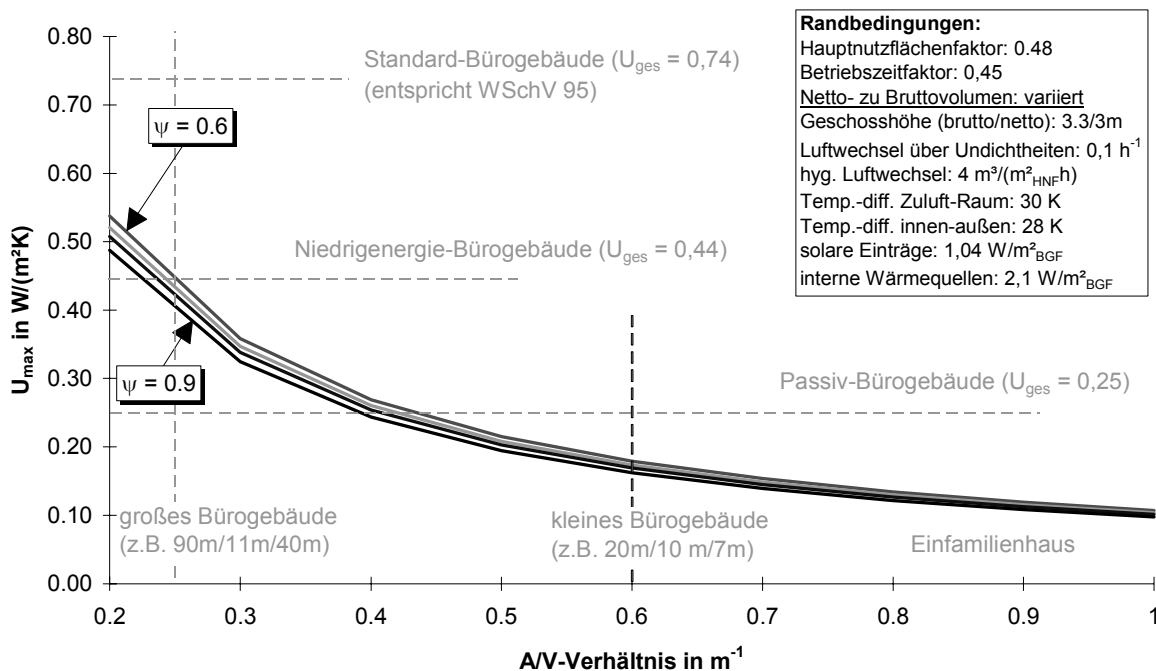


Abb. 5-16: Einfluss der Verhältnisse von Netto- zu Bruttovolumen auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

U_{max} ist nur schwach abhängig von dem Verhältnis von Netto- zu Brutto-Volumen. Beeinflusst wird durch diesen Wert das Netto-Gebäudevolumen und damit die Lüftungsverluste durch Undichtheiten. Da diese im Vergleich zu den Transmissionsverlusten eine untergeordnete Rolle spielen, ergibt sich eine geringe Sensitivität. Es ist daher denkbar, den Wert für ψ in den ersten Berechnungen zunächst pauschal anzunehmen.

5.5.4 Betriebszeitfaktor κ

In den bisherigen Berechnungen wurde die Laufzeit der Lüftungsanlage auf die Nutzungszeit zuzüglich der erforderlichen morgendlichen Spülzeiten begrenzt. Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie sich die Anforderungen an den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{max} verändern, wenn von dieser Bedingung abgewichen wird. Dargestellt werden die folgende Fälle.

Bezeichnung	Betrieb der Lüftungsanlage	wöchentliche Betriebszeit der Lüftungsanlage	Betriebszeitfaktor κ
5 Tage	Werktags unterbrochen	76 h	0,45
6 Tage	Werktags und Samstags unterbrochen	91	0,54
7 Tage	7 Tage unterbrochen	105	0,63
kontinuierlich	7 Tage kontinuierlich	168	1

Tab. 5-4: Variantenausprägung

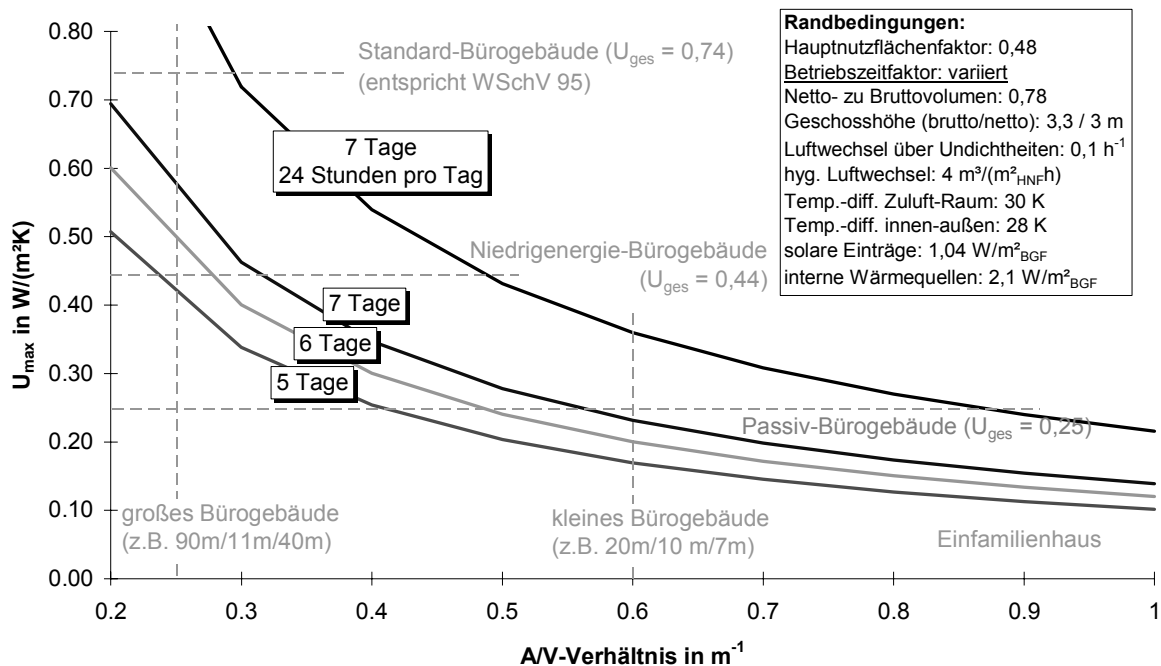


Abb. 5-17: Einfluss der Betriebszeit der Lüftungsanlage auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

Die Laufzeit der Lüftungsanlage hat einen deutlichen Einfluss auf U_{max} . Mit zunehmender Laufzeit steigt der mittlere Luftvolumenstrom und damit die Heizleistung, die dem Gebäude im Wochenmittel zugeführt werden kann. Dies erlaubt höhere Werte für die Gebäudeheizlast und damit auch der Wärmeverluste. Bei sonst konstanten Bedingungen ergeben sich damit geringere Anforderungen an U_{max} .

Wird die Lüftungsanlage an 6 Tagen betrieben, muss bei großen Bürogebäuden mit einem A/V-Verhältnis von $0,25 \text{ m}^{-1}$ lediglich ein Wert für U_{max} von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ realisiert werden. Ein Betrieb der Lüftungsanlage an 7 Tagen pro Woche ermöglicht es, auch kleinere Bürogebäude mit einem A/V-Verhältnis von etwa $0,6 \text{ m}^{-1}$ mit der Zuluft zu beheizen, sofern U_{max} einem Wert knapp unter $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ entspricht. Wird die Lüftungsanlage kontinuierlich betrieben (7 Tage, 24 Stunden), müssen große Bürogebäude nicht einmal den Standard der derzeit geltenden Wärmeschutzverordnung erfüllen. Für kleine Bürogebäude reicht ein Wärmeschutz knapp unter dem des Niedrigenergie-Bürogebäudes.

5.5.5 Solare Einträge

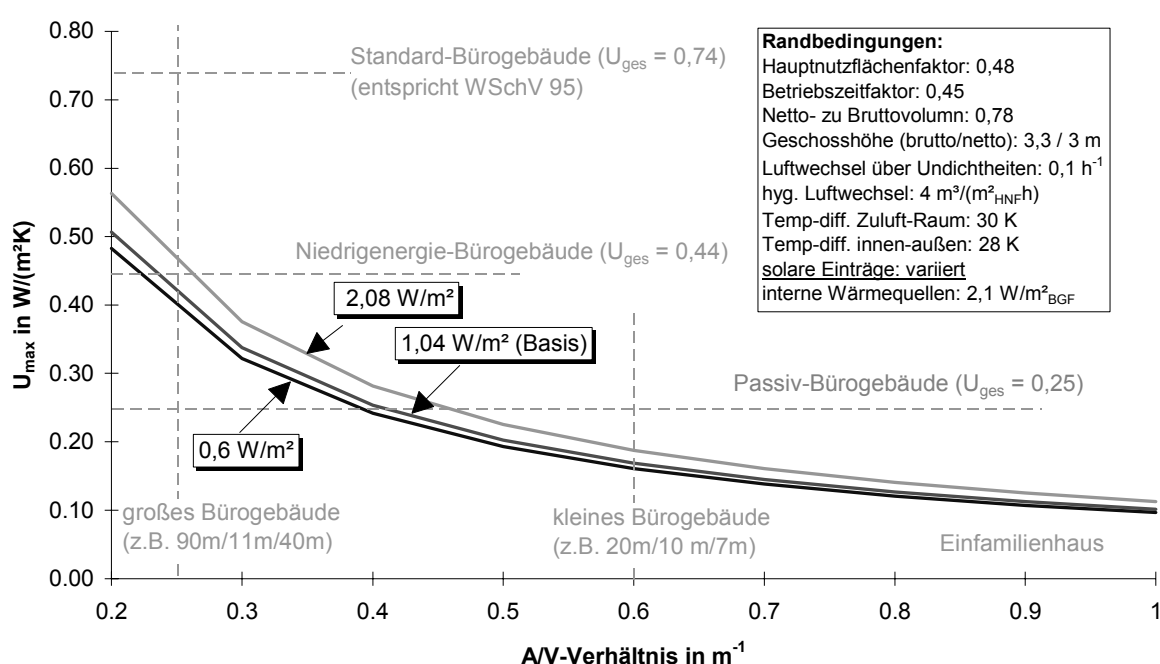
Ein Anstieg des Wärmestroms durch solare Einträge ermöglicht höhere zulässige Wärmeverluste bei konstantem Wert für die über die Zuluft zuführbare Heizleistung. Der Wärmestrom durch solare Einträge wird über einen einfachen Ansatz der DIN 4701 bestimmt (Gl. 5-63). Für den vorliegenden Fall berechnet sich ein Wert von $1,04 \text{ W}/\text{m}^2_{BGF}$. Aus Simulationsrechnungen ergibt sich bei Annahme des Testreferenzjahres Frankfurt am Main ein Wärmestrom durch solare Einträge an einem trübem Tag von $0,6 \text{ W}/\text{m}^2_{BGF}$ und an einem sonnigen Tag von $3,3 \text{ W}/\text{m}^2_{BGF}$. Der nach DIN 4701 berechnete Wert liegt zwischen den beiden Werten und damit in einem plausiblen Bereich. Er entspricht zumindest im vorliegenden Fall einem weitgehend trübem Tag.

Ob die Annahme eines trübem Tages gerechtfertigt ist, ist nicht abschließend zu beurteilen. So treten die hier angenommenen tiefen Außentemperaturen in der Regel nur bei Hochdruckwetterlagen mit klarem Himmel auf. Unter dem Gesichtspunkt erscheint der angenommene Wert relativ gering. Andererseits können insbesondere bei sehr gut gedämmten Gebäuden die Summe der Wärmeströme durch solare Einträge und interne Wärmequellen an einem sonnigen Tag über den Wärmeverlusten liegen. Ein Teil der Gewinne kann damit nicht als Substitution für die Heizleistung genutzt werden, sondern führt zu einem Anstieg der Raumtemperatur. Dies spricht dafür, dass nicht 100 % der solaren Einträge eines sonnigen Tages in der Berechnung angesetzt werden dürfen. Zudem ergibt sich wegen der im Winter tief stehenden Sonne in vielen Fällen eine deutliche Verschattung durch die Nachbargebäude. Diese Diskussion zeigt, dass eine genauere Quantifizierung des Wärmestroms durch solare Einträge nur mit umfangreichen Berechnungen möglich ist. Deswegen werden in den bisherigen Berechnungen die Annahmen der DIN 4701 herangezogen.

Um dennoch einen Eindruck von der Sensitivität von U_{max} auf unterschiedliche Werte der solaren Einträge zu bekommen, wird dieser Parameter variiert. Untersucht werden die folgenden drei Fälle.

Beschreibung	Variantenbezeichnung = Wert der solaren Einträge
Trüber Tag entsprechend Simulation	0,6 W/m ² _{BGF}
Nach DIN 4701	1,04 W/m ² _{BGF}
Verdoppelung des Werts der DIN 4701	2,08 W/m ² _{BGF}

Tab. 5-5: Variantenausprägung

Abb. 5-18: Einfluss der solaren Einträge auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

Der Einfluss der solaren Einträge auf U_{max} ist vergleichsweise gering. Selbst eine Verdoppelung des Wertes der DIN 4701 führt nur zu einem Anstieg von U_{max} um 0,02 W/(m²K) für kleine bzw. 0,05 W/(m²K) für große Bürogebäude.

Erwähnt werden soll noch, dass in den bisherigen Berechnungen das Verhältnis von Fenster- zu Brutto-Grundfläche ϕ konstant angenommen wurde. Dies ist eine Vereinfachung. Wegen des sich verschiebenden Verhältnisses von Hüll- zu Grundfläche steigt ϕ bei zunehmendem A/V-Verhältnis an. Da die Sensitivität der solaren Einträge gering ist, kann diese Vereinfachung akzeptiert werden.

5.5.6 Interne Wärmequellen

Als Wochenmittelwert für den Wärmestrom durch interne Wärmequellen wurde bisher $2,1 \text{ W/m}^2_{\text{BGF}}$ angenommen. In Abb. 5-19 ist dargestellt, wie sich die Anforderungen an U_{max} in Abhängigkeit von der Höhe der internen Wärmequellen verändern. Als weitere Varianten werden dabei die Annahmen für die internen Wärmequellen des in [Knissel 1999] definierten „Niedrigenergie-Bürogebäudes“ und des „Passiv-Bürogebäudes“ betrachtet. Die wesentlichen quantitativen Annahmen sind in Tab. 5-6 und Tab. 5-7 zusammengefasst.

Variante: Passiv-Bürogebäude					
		max. Leistung W	Vollbetriebszeitfaktor -	mittlere Leistung W	Flächenanteil an BGF -
Beleuchtung	Büro	6,2	0,27	1,7	0,47
	Flur	1,7	1	1,7	0,12
	Nebenräume	1,7	0,27	0,5	0,28
EDV	Büro	2,9	0,4	1,2	0,47
Personen	Büro	5,6	0,8	4,5	0,47
Wärmestrom je m ² BGF während der Nutzungszeit				4,3 W/m ² _{BGF}	
Nutzungszeitfaktor				0,33 -	
Wärmestrom je m² BGF im Wochenmittel				1,4 W/m²_{BGF}	

Tab. 5-6: Mittlerer Wärmestrom durch interne Wärmequellen bei der Variante „Passiv-Bürogebäude

Variante: Niedrigenergie-Bürogebäude					
		max. Leistung W	Vollbetriebszeitfaktor -	mittlere Leistung W	Flächenanteil an BGF -
Beleuchtung	Büro	12,4	0,5	6,2	0,47
	Flur	3	1	3,0	0,12
	Nebenräume	3	0,5	1,5	0,28
EDV	Büro	8,8	0,42	3,7	0,47
Personen	Büro	5,6	0,8	4,5	0,47
Wärmestrom je m ² BGF während der Nutzungszeit				8,7 W/m ² _{BGF}	
Nutzungszeitfaktor				0,33 -	
Wärmestrom je m² BGF im Wochenmittel				2,8 W/m²_{BGF}	

Tab. 5-7: Mittlerer Wärmestrom durch interne Wärmequellen bei der Variante Niedrigenergie-Bürogebäude nach [Knissel 1999]

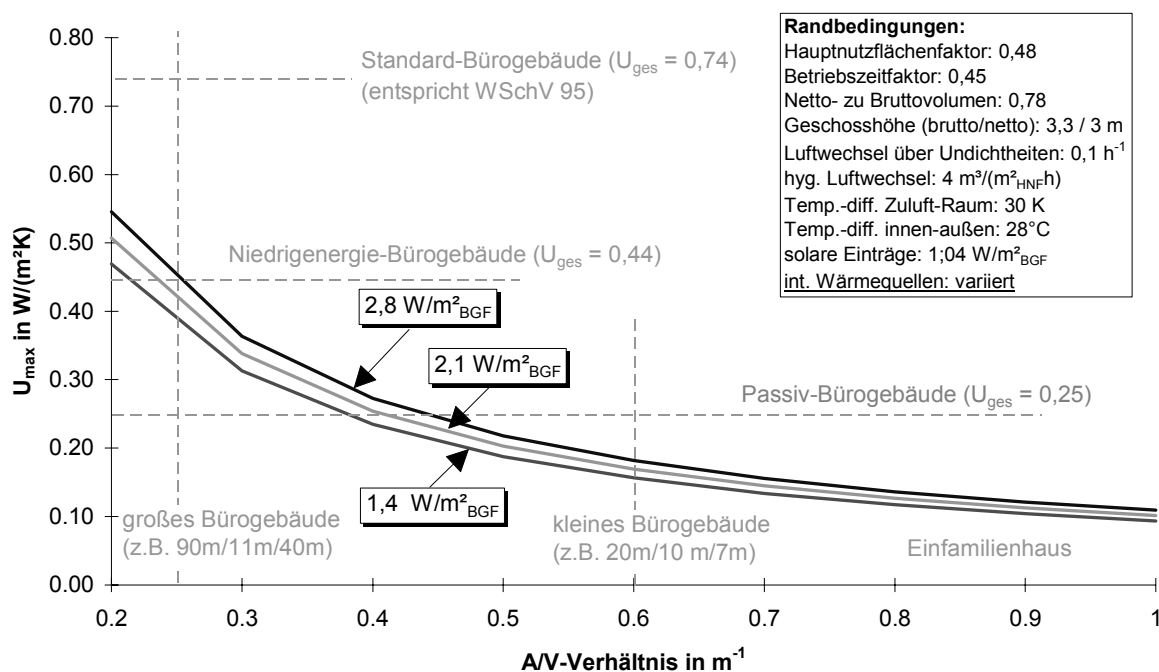


Abb. 5-19: Einfluss der internen Wärmequellen auf den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_{max}

Der Wärmestrom durch die Wärmeabgabe von Beleuchtung und EDV-Arbeitshilfen hat ähnlich wie die solaren Gewinne einen relativ geringen Einfluss auf den einzuhaltenden Maximalwert von U_{max} . Bei einer Verdoppelung des Wertes von 1,4 W/m² auf 2,8 W/m² steigt U_{max} bei großen Gebäuden um 0,06 W/(m²K), bei kleinen Gebäuden um 0,02 W/(m²K) an.

Dies macht deutlich, dass ein großer Wärmestrom durch interne Wärmequellen kein geeignetes Mittel ist, um zu geringe Werte von U_{max} , d. h. Unzulänglichkeiten im Wärmeschutz der Gebäudehülle, auszugleichen.

5.6 Vorschlag für Effizienzrandbedingungen

Die Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 5.5 zeigt, dass der zum Verzicht auf ein konventionelles Wärmeverteilsystem erforderliche Wärmeschutz der Gebäudehülle entscheidend von den Randbedingungen abhängt. So liegen die Anforderungen für große Gebäude mit einem Hauptnutzflächenfaktor von $\zeta = 0,9$ noch nicht einmal auf dem Niveau der Wärmeschutzverordnung 1995.

Ziel dieser Untersuchung ist es jedoch, einen Wärmeschutzniveau vorzugeben, das neben ökonomischen Aspekten auch eine hohe energetische Effizienz der Gebäudehülle garantiert. Um dies bei der Anwendung von Gl. 5-57 sicherzustellen, werden so genannte Effizienzrandbedingungen vorgeschlagen. Werden diese bei der Berechnung angesetzt, ergibt sich neben der Beheizbarkeit über die Zuluft ein hohes energetisches Niveau.

Die Effizienzrandbedingungen sind in Tab. 5-8 aufgeführt. Sie entsprechen quantitativ und in der Begründung den in Abschnitt 5.4.1 definierten Werten. Die Effizienzrandbedingungen sind dabei als erster Vorschlag zu verstehen. Sie müssen in der Praxis getestet und gegebenenfalls überarbeitet werden. Zudem werden sie voraussichtlich im Zuge der Ausarbeitung der „Sommer-Bedingung“ (siehe Abschnitt 7) ergänzt.

Da der Einfluss der einzelnen Größen auf U_{max} unterschiedlich ist, sind je nach Parameter Maximal- oder Minimalwerte definiert. Ergeben sich für das zu beurteilende Gebäude Planungskennwerte innerhalb des zulässigen Wertebereichs, z. B. $\zeta = 0,4$, so sind diese für die Berechnung anzusetzen.

Größe	Wert	Bemerkung
Hauptnutzflächenfaktor	$\zeta \leq 0,48$	Mittelwert nach VDI 3807, Teil 1 für Verwaltungsgebäude
Betriebszeitfaktor	$\kappa \leq 0,45$	nach SIA 380/4: 11 Stunden pro Werktag zuzüglich Vorspülzeit
mittlerer Luftwechsel über Undichtheiten	$n_{Fugen} \geq 0,1 \text{ h}^{-1}$	sehr dichtes Gebäude
Temperaturdifferenz Zuluft zu Raum	$\Delta \bar{T}_{Zu} \leq 30 \text{ K}$	begrenzt durch Staubverschmelzung
interne Wärmequellen	$\bar{q}_{int} \leq 2,1 \text{ W/m}^2_{BGF}$	Annahme für sehr effiziente Beleuchtung und Arbeitshilfen (genauere Quantifizierung durch Sommerbedingung)

Tab. 5-8: Effizienzrandbedingungen für die Ermittlung von U_{max}

Die weiteren Größen sind entsprechend der aktuellen Planung anzusetzen, wobei selbstverständlich die Werte aus Abschnitt 5.4.1 als erste Annahmen verwendet werden können.

Selbst unter Verwendung dieser Effizienzrandbedingungen variieren die Anforderungen an den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle abhängig vom A/V-Verhältnis in einem weiten Bereich. Um hier den Zielkorridor noch genauer zu definieren, werden die zulässigen Werte für U_{max} auf

$$\text{Gl. 5-67} \quad 0,20 \text{ W / (m}^2\text{K)} \leq U_{max} \leq 0,45 \text{ W / (m}^2\text{K)}$$

begrenzt. Damit wird ein zu geringer Wärmeschutz für große Gebäude mit geringem A/V-Verhältnis vermieden und kleinen Gebäuden mit hohem A/V-Verhältnis ein Erfüllen der Anforderungen ermöglicht. Um die Beheizbarkeit von Gebäuden mit hohem A/V-Verhältnis und einem U_{max} unter $0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ zu sichern, kann die Laufzeit der Lüftungsanlage im praktischen Betrieb entsprechend angepasst werden.

5.6.1 Beispielrechnungen

Die Anwendung des hier vorgestellten Dimensionierungsvorschlags wird unter Berücksichtigung der Effizienzrandbedingungen für drei Beispielgebäude aufgezeigt:

- Rechteckgrundriss mit 2 Geschossen
- Rechteckgrundriss mit 5 Geschossen
- Quadratischer Grundriss mit Zentralatrium und 12 Geschossen.

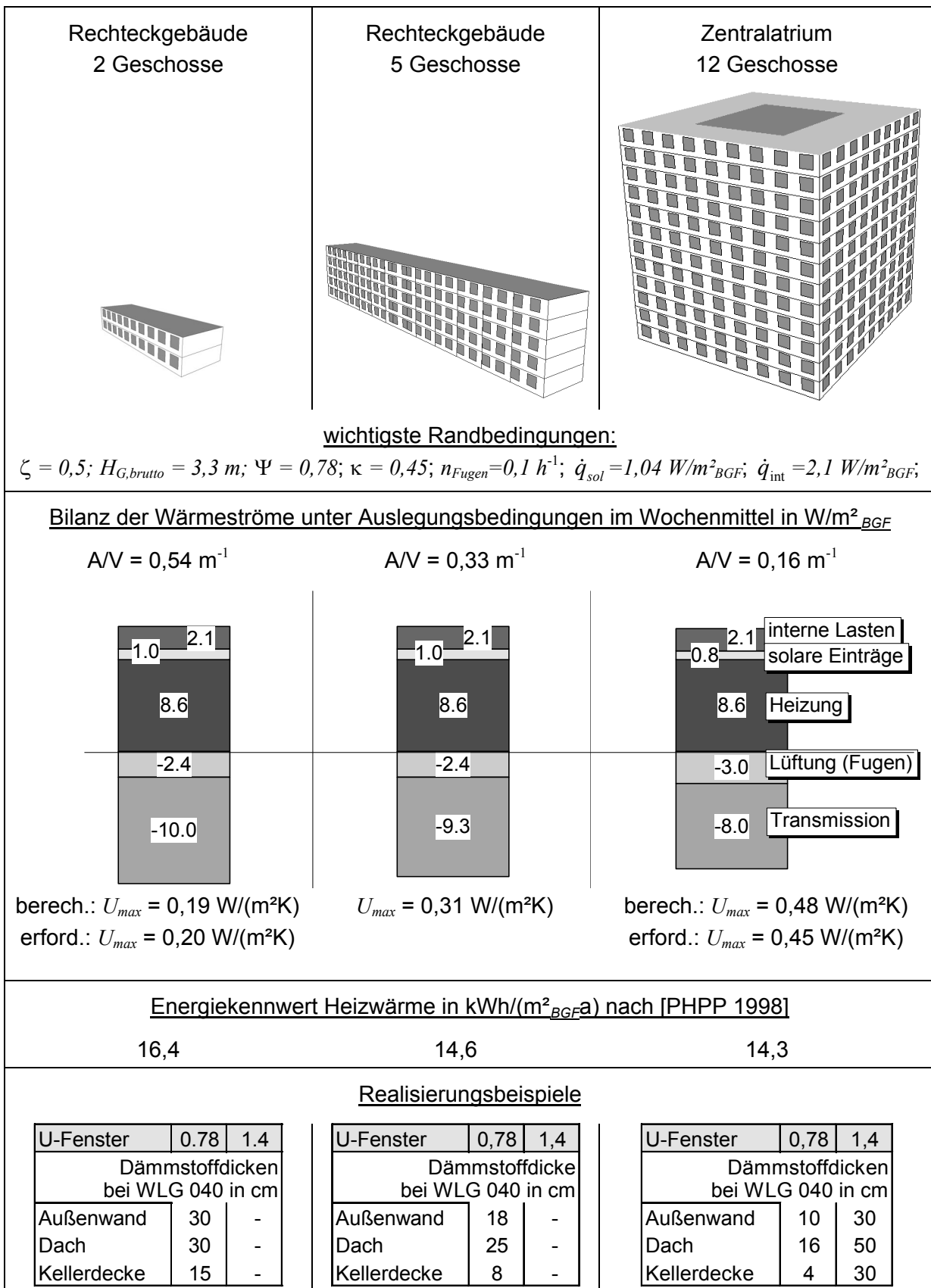
In Tab. 5-9 sind Skizzen der Gebäude, die wichtigsten Randbedingungen, die Bilanz der Wärmeströme, der Energiekennwert Heizwärme und jeweils zwei Realisierungsbeispiele für den erforderlichen Wärmeschutz der Gebäudehülle dargestellt. Bei den Realisierungsbeispielen ist unterstellt, dass Wärmebrücken weitgehend reduziert wurden und ihr Einfluss auf die Energiebilanz durch den Außenmaßbezug bei der Hüllflächenermittlung angenähert wird.

Zur Ermittlung des Energiekennwertes Heizwärme müssen Annahmen für die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung und des Erdreichwärmetauschers gemacht werden. Es wird angenommen, dass der Wärmebereitstellungsgrad $\Phi_{WRG,EWT}$ des Systems Erdreichwärmetauscher und Wärmerückgewinnung

$$\Phi_{WRG,EWT} = 0,87$$

beträgt. Dies entspricht dem in [PHPP 1998] für Passiv-Wohngebäude definierten Wert. Als Luftwechsel über Undichtheiten in der Gebäudehülle wird der in Abschnitt 5.4.1 ausgewiesene Wert der EN 832 angesetzt

$$n_{Fugen} = 0,05 \text{ h}^{-1}.$$



Tab. 5-9: Beispielhafte Anwendung des vorgestellten Dimensionierungsvorschlags

Die Bilanz der auf die Brutto-Grundfläche bezogenen Wärmeströme zeigt für alle drei Gebäude eine ähnliche Struktur. Der Wärmestrom durch interne Quellen und die maximale Heizleistung (Mindestvolumenstrom) werden bezogen auf die Grundfläche definiert und sind somit für alle drei Varianten gleich. Der Wärmestrom durch solare Einträge ist abhängig vom Verhältnis Fensterfläche zu Brutto-Grundfläche (siehe Abschnitt 5.3.1). Da dieses Verhältnis für das Gebäude mit Zentralatrium geringer ist, ergibt sich hier ein niedriger Beitrag der solaren Einträge. Die Lüftungsverluste durch Undichtheiten werden bezogen auf das Luftvolumen des Gebäudes definiert. Bei gleicher Geschosshöhe weisen deswegen die beiden Gebäude mit Rechteckgrundrissen identische Wert auf. Das Atrium erhöht das Gebäudevolumen, jedoch nicht die Grundfläche. Deswegen steigt der spezifische Wert für die Lüftungswärmeverluste hier an. Der Wärmestrom über Transmission ergibt sich über Gl. 5-57. Hierzu wird U_{max} so dimensioniert, dass die Bilanz ausgeglichen ist. Dies gilt allerdings nur, sofern U_{max} nicht zusätzlich durch die Bedingung aus

$$0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)} \leq U_{max} \leq 0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

begrenzt wird. Eine Begrenzung erfolgt bei dem großen und dem kleinen Gebäude. So ist der Wärmestrom über Transmission bei dem großen Gebäude mit 12 Geschossen geringer, als die Bilanz (Gl. 5-57) zulassen würde ($U_{max}: 0,48 \text{ W/(m}^2\text{K)} \Rightarrow 0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$). Das kleine Gebäude mit 2 Geschossen weist hingegen einen Transmissionswärmestrom auf, der höher ist, als es die Bilanz (Gl. 5-57) zulässt ($U_{max}: 0,19 \text{ W/(m}^2\text{K)} \Rightarrow 0,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$).

Die Energiekennwerte Heizwärme (Nutzenergie) liegen zwischen $14,3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $16,4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$, jeweils bezogen auf die Brutto-Grundfläche des Gebäudes. Der etwas höhere Wert für das kleine Gebäude ist auf den angehobenen Wert von U_{max} und den daraus resultierenden höheren Transmissionswärmestrom zurückzuführen. Das große Gebäude hat zwar einen geringeren Fensterflächenanteil, dafür aber - wegen der Begrenzung $U_{max} \leq 0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ - einen im Vergleich besseren Wärmeschutz. Dies bedingt einen geringeren Energiekennwert Heizwärme. Unter Anwendung der Effizienzrandbedingungen und eines Wärmebereitstellungsgrades der Lüftungsanlage von $\Phi_{WRG} = 0,87$ stimmen der Heizwärmebedarf für die hier betrachteten Beispiele weitgehend überein mit dem für Passiv-Wohngebäude geforderten Wert von $15 \text{ kWh/(m}^2_{NGFa})$ bzw. $13 \text{ kWh/(m}^2_{BGFa})$ [Feist 1996-2]. Beide Ansätze beschreiben damit ein ähnliches Niveau für den Wärmeschutz.

Für jedes Gebäude wird dargestellt, mit welchen Dämmstoffdicken (Wärmeleitgruppe: WLG 040) die Anforderungen an U_{ges} eingehalten werden können. Der erste Realisierungsvorschlag geht dabei von Passivhausfenstern mit einem Fenster-U-Wert von $U_F = 0,78 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, der zweite von einer 2-fach-Wärmeschutzverglasung und Rahmengruppe 1 mit einem $U_F = 1,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ aus.

Bei dem kleinen Gebäude mit Rechteckgrundriss ergeben sich bei dem Einsatz von Passivhausfenstern Dämmstoffdicken von 15 cm bei der Kellerdecke und 30 cm bei Dach und Außenwand. Diese entsprechen in etwa den von Passiv-Wohngebäuden bekannten Werten. Beim Einsatz konventioneller Fenster kann der erforderliche Wert U_{max} bei diesem Gebäude nicht erreicht werden.

Wegen des günstigeren A/V-Verhältnisses erfüllt das mittlere Gebäude die Anforderungen mit Dämmstoffdicken zwischen 8 cm und 25 cm. Auch hier ist zum Erreichen des erforderlichen Wertes U_{max} der Einsatz von Passivhausfenstern erforderlich.

Mit noch geringeren Dämmstoffdicken werden die Anforderungen bei den Gebäuden mit Zentralatrium erreicht. Sie liegen bei 10 cm für die Außenwand, 16 cm für das Dach und 4 cm für die Kellerdecke. Beachtet werden muss dabei die Korrektur auf $U_{max} \leq 0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Hierdurch wird der Einfluss des A/V-Verhältnisses auf die erforderlichen Dämmstoffdicken begrenzt und ein noch geringerer Wärmeschutz vermieden. Bei dieser Ausführungsvariante kann U_{max} auch mit konventionellen Fenstern erreicht werden. Die erforderlichen Dämmstoffdicken liegen dabei jedoch zwischen 30 cm bis 50 cm.

Nicht berücksichtigt ist bei der Berechnung, dass bei dem Gebäude mit Zentralatrium der Strombedarf für Beleuchtung wegen der schlechteren Tageslichtausleuchtung der an das Atrium grenzenden Büros höher ist [Grimm 2000]. In der Berechnung müsste ein höherer Wert für den Wärmestrom durch interne Wärmequellen \bar{q}_{int} angesetzt werden. Da die Sensitivität dieses Parameters jedoch gering ist, wird auf eine entsprechende Differenzierung bei den Effizienzrandbedingungen verzichtet.

5.7 Hinweise zur Luftheizung bei Bürogebäuden

Bei der Ausgestaltung der Winter-Bedingung werden eine Reihe von Vereinfachungen getroffen (siehe Einleitung Abschnitt 5) mit dem Ziel, die Berechnungsvorschrift einfach zu gestalten, so dass sie bereits in einem frühen Planungsstadium angewandt werden kann.

Die Vereinfachungen machen bei fortschreitender Konkretisierung der Planung zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Diese betreffen insbesondere die Frage, welche Konsequenzen sich bei Luftheizung für das Betriebs- bzw. Regelkonzept ergeben. Auch wenn die Fragen nur im konkreten Einzelfall entschieden werden können, sollen im Folgenden systematische Überlegungen hierzu angestellt werden. Diese erlauben es, die wesentlichen Einflussparameter zu identifizieren und grundlegende Zusammenhänge darzustellen.

Da die folgenden Untersuchungen auf einem höheren Konkretisierungsniveau angesiedelt sind als die bisherigen Arbeiten zur Winter-Kenngröße, werden sie in diesem Abschnitt nur zusammenfassend dargestellt. Die ausführlichen Berechnungen sind im Anhang dokumentiert.

5.7.1 Beheizbarkeit von kritischen Einzelräumen

In den bisherigen Untersuchungen wurde eine integrale Bilanz über das gesamte Gebäude aufgestellt. Natürlich muss die Beheizbarkeit aber auch für kritische Einzelräume gegeben sein. Kritisch sind hier insbesondere Eckräume im obersten Geschoss, da diese ein deutlich ungünstigeres A/V-Verhältnis aufweisen als das gesamte Gebäude.

Im Anhang A-11 wird die Beheizbarkeit von Einzelräumen untersucht. Es zeigt sich, dass die Anforderungen aus der gebäudebezogenen Betrachtung nicht automatisch zur Beheizbarkeit aller kritischen Einzelräume führen. Die Beheizbarkeit von kritischen Einzelräumen muss deswegen individuell überprüft werden. In der Regel sind zwei wesentliche Punkte im Rahmen der Grundrissgestaltung sicherzustellen:

1. Kritische Eckräume müssen als Zulufräume ausgestaltet werden.
2. Das A/V-Verhältnis der Eckräume darf nicht zu groß werden, d. h. keine kleinen, schmalen Räume an den Gebäudeecken.

Günstig wirken sich weiterhin aus:

- keine angrenzenden Nebenräume (Ablufträume) mit geringerer Temperatur
- keine hoher Fensterflächenanteil.

Auch wenn sich im Einzelfall höhere Anforderungen aus der raumweisen Bilanz ergeben, wird der Wärmeschutz der Gebäudehülle weiterhin aus der gebäudebezogenen Betrachtung abgeleitet, da diese den zukünftigen Heizenergieverbrauch bestimmt. Die Beheizbarkeit der kritischen Räume muss über die Grundrissgestaltung sichergestellt werden.

5.7.2 Realisierung des intermittierenden Betriebs der Lüftungsanlage

Die Umsetzung der intermittierenden Betriebsweise der Lüftungs- und damit auch der Heizungsanlage ist nur möglich, wenn das Gebäude zu Beginn der Nutzungszeit auf die Raumsolltemperatur aufgeheizt werden kann. Ein Aufheizen ist erforderlich, da das Gebäude in der Nacht und am Wochenende bei abgeschalteter Lüftungsanlage auskühlt. Um die erforderliche Aufheizleistung zu beurteilen, wird in Anhang A-12 das Auskühlen des Gebäudes und die am Morgen erforderliche dynamische Aufheizlast berechnet.

Es zeigt sich, dass ein Aufheizen des Gebäudes nach einer Nachtabsenkung (9 Stunden) mit dem aus hygienischen Gründen erforderlichen morgendlichen Vorlauf der Lüftungsanlage von 4 Stunden (Spülphase) möglich ist. Eine Nachtabschaltung kann damit in der Regel problemlos umgesetzt werden. Die Energieeinsparung ergibt sich dabei primär durch den vermiedenen Stromverbrauch der Ventilatoren. Selbst bei einer Außentemperatur von -12 °C entsprechen die vermiedenen Wärmeverluste des Beispielgebäudes, primärenergetisch bewertet, nur etwa einer Laufzeit der Ventilatoren von 20 Minuten.

Nach einer Wochenendabsenkung ergibt sich in den Berechnungen ein erforderlicher Aufheizzeitraum von 30 Stunden ($T_A = -12\text{ °C}$). In diesem Zeitraum kann das Gebäude unabhängig von der vorhandenen Speicherkapazität auf die gewünschte Solltemperatur aufgeheizt werden. Da dieser Aufheizzeitraum deutlich über der hygienisch erforderlichen Spülphase liegt, stellt sich für den praktischen Gebäudebetrieb die Frage,

- ob am Wochenende die Lüftungsanlage abgeschaltet
- oder die Gebäudetemperatur durch Einbringen eines geringen Grundluftwechsels auf 20 °C gehalten und damit ein Aufheizen vermieden werden sollte.

Wie oben bereits erwähnt, ist die Primärenergieeinsparung beim Abschalten der Lüftungsanlage im Bereich der Heizung im Vergleich zum Stromverbrauch der Ventilatoren gering. Die Bewertung der primärenergetischen Vorteilhaftigkeit kann somit auf den Stromverbrauch der Ventilatoren reduziert werden. Bezogen auf einen m^3 geförderte Luft ist der Stromverbrauch beim Fördern eines geringen Grundluftwechsels geringer als beim Fördern des hygienischen Luftwechsels (Auslegungsluftwechsel). Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die elektrische Leistung zum Lufttransport mit der dritten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit ansteigt bzw. abnimmt. Ob ein Abschalten der Lüftungsanlage unter primärenergetischen Gesichtspunkten sinnvoll ist, hängt dabei entscheidend von den Arbeitspunkten der Lüftungsanlage ab. Diese ergeben sich wiederum aus der Kennlinie der Ventilatoren und des Kanalnetzes und sind somit individuell zu ermitteln. Prinzipiell ist eine Wochenendabschaltung günstig bei höheren Außentemperaturen und damit kürzeren Aufheizzeiten. Je tiefer die Außentemperaturen liegen, desto sinnvoller wird ein „Durchheizen“ am Wochenende.

Neben den energetischen Aspekten sprechen weitere Punkte für eine kontinuierliche Beheizung am Wochenende:

1. Regelungstechnisch ist das Einhalten eines Sollwertes der Raumtemperatur durch Variation des Luftwechsels einfacher zu realisieren als eine variable Aufheizzeit in Abhängigkeit von der Außentemperatur bzw. von der Auskühltemperatur des Gebäudes.
2. Das Aufheizen der Nebenräume kann bei dem hier angenommenen Lüftungskonzept (ausschließliche Zuluftversorgung der Hauptnutzflächen und Überströmen der Luft in Flur und Nebenräume; siehe Abb. 5-2) zu einem Überheizen der Büros (Zulufräume) führen. Die Gefahr besteht beim kontinuierlichen Heizbetrieb nicht.
3. Ein Arbeiten am Wochenende ist möglich, wenn auch mit eingeschränkter Luftqualität.

Es kann also durchaus erforderlich oder sinnvoll sein, die reale Betriebszeit der Lüftungsanlage über das in der Winter-Bedingung genannte Mindestmaß anzuheben.

5.7.3 Luftheizung bei Räumen mit unterschiedlich hohen internen Wärmequellen

Ein systematisches Problem bei der Luftheizung besteht darin, dass Außenluftvolumenstrom und Heizleistung miteinander gekoppelt sind. Weisen Räume unterschiedliche Anforderungen an die Höhe des Außenluftvolumenstroms und die Heizleistung auf, ist eine Einzelraumregelung für den Volumenstrom oder die Zulufttemperatur erforderlich. Wird dieses kostenintensive Regelkonzept nicht realisiert, sondern die Zulufttemperatur zonenweise geregelt, ergeben sich zwangsläufig Abweichungen vom idealen Betriebsverhalten. Verdeutlicht werden soll dies an einem Beispiel. Betrachtet werden die in Abb. 5-20 skizzierten zwei Räume. Die geometrischen Abmessungen entsprechen den Angaben aus Abschnitt 4.1.1.

1. Chef-Büro: 1 Person auf 30 m²; 1 PC-Arbeitsplatz, der selten genutzt wird
2. CAD-Büro: 3 Personen auf 30 m² mit jeweils einem CAD-Arbeitsplatz (großer Bildschirm, leistungsstarker Rechner, hohe Beleuchtungsstärke).

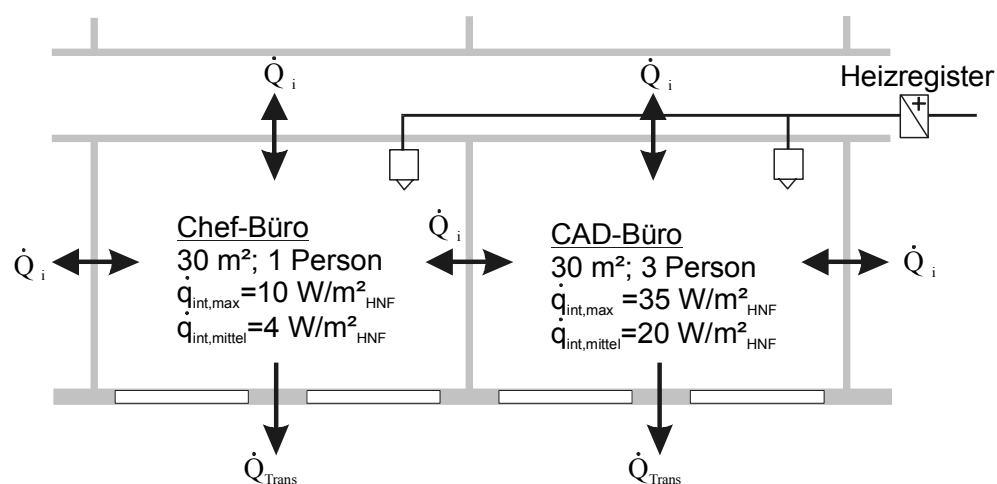


Abb. 5-20: Skizze der untersuchten Räume

Das Chef-Büro benötigt wegen der geringen Personenbelegungsdichte nur einen geringen Außenluftvolumenstrom. Gleichzeitig ist in diesem Raum aber eine vergleichsweise hohe Heizleistung erforderlich, da nur ein geringer Abwärmestrom \dot{Q}_{int} von den elektrischen Geräten (Beleuchtung, PC) und Personen abgegeben wird. Das CAD-Büro benötigt hingegen wegen der größeren Personenbelegungsdichte einen höheren Außenluftvolumenstrom, wegen des höheren internen Abwärmestroms \dot{Q}_{int} aber nur eine geringere Heizleistung. Die Zulufttemperatur wird jedoch bei der hier unterstellten Zonenregelung für beide Räume einheitlich über ein Heizregister geregelt.

Es stellt sich die Frage, welche Zulufttemperatur im Zonenheizregister eingestellt werden soll. Für das aufgezeigte Beispiel sind zwei unterschiedliche Regelstrategien denkbar:

1. Die Zulufttemperatur wird entsprechend der maximalen Heizleistung (Chef-Büro) gewählt. Die dem CAD-Büro zugeführte Heizleistung ist in dem Fall zu groß, so dass sich ein Anstieg der Raumtemperatur ergibt. Dieser kann jedoch durch das Öffnen der Fenster begrenzt werden (z. B. auf 24°C).
2. Die Zulufttemperatur wird entsprechend der minimalen Heizleistung gewählt (CAD-Büro). Die erforderliche Heizleistung im Chef-Büro wird durch ein Anheben des Zuluftvolumenstroms erreicht.

Welche der beiden Strategien günstiger ist, hängt von der Anzahl von Chef- und CAD-Büros ab. Denkbar ist auch eine Kombination aus beiden Strategien. In allen Fällen wird sich jedoch der Primärenergiebedarf des Gebäudes gegenüber der idealisierten Betrachtung erhöhen. Die gemessenen Verbrauchsdaten der in Abschnitt 4.6 vorgestellten realen Modellgebäude, die beide eine Luftheizung aufweisen, zeigen jedoch, dass der Anstieg des Primärenergiebedarfs voraussichtlich nur von untergeordneter Bedeutung sein wird.

Einflussparameter

Das Beispiel verdeutlicht, dass die Fragen des geeigneten Regelkonzeptes und der optimalen Betriebsführung in weiteren Studien untersucht werden müssen. Nach ersten Vorüberlegungen sollten u. a. folgende Einflussparameter in die Betrachtung mit einbezogen werden:

- U-Wert der Gebäudehülle
- Lage des Raumes im Gebäude (z. B. Mittelraum, Eckraum, ...) und Orientierung
- Anlagenkonzept (z. B. konstanter oder variabler Volumenstrom)
- Maximale Differenzen in den internen Wärmequellen, $\Delta\dot{Q}_{\text{int,max}}$
- Regelkonzept (z. B. Einzelraumregelung, Zonenregelung, Führungsraum, ...)
- Wirksame Speicherkapazität der Räume
- Betriebsweise der Anlage (z. B. kontinuierlich, intermittierend, ...).

Die Vielzahl der Parameter deutet darauf hin, dass es auch hier keine einfache verallgemeinerbare Aussage geben kann, sondern die optimale Lösung im Einzelfall gefunden werden muss.

U-Wert der Gebäudehülle

Ohne späteren Untersuchungen vorgreifen zu wollen, soll ein für gut gedämmte Gebäude wichtiger Aspekt der Luftheizung kurz beleuchtet werden. Untersucht wird die These, dass die Temperaturdifferenzen im Winter innerhalb eines Gebäudes umso geringer werden, je besser der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist.

Der Grund für den verstärkten Temperatursausgleich in gut gedämmten Gebäuden liegt darin, dass der Transmissionswärmestrom \dot{Q}_{Trans} an die Umgebung mit sinkendem U-Wert der Gebäudehülle geringer wird. Damit wächst der Einfluss der internen Wärmeströme \dot{Q}_i auf die Energiebilanz der Räume. Dies soll an einem einfachen Beispiel aufgezeigt werden.

Berechnet wird die maximale Temperaturdifferenz, um die ein nicht beheizter Raum gegenüber den umgebenden Räumen auskühlt. Für eine erste einfache Abschätzung wird das Chef-Büro aus Abb. 5-20 betrachtet. Es wird angenommen, dass

- kein Luftaustausch zwischen dem Chef-Büro und der Umgebung über Fugen erfolgt
- keine Luftaustausch zwischen dem Chef-Büro und den Nachbarräumen oder dem Flur auftritt
- alle Nachbarräume (seitlich, oben, unten) die gleiche Temperatur aufweisen
- die Zuluft im Chef-Büro mit Raumtemperatur eingeblasen, dem Raum also keine Heizleistung zugeführt wird
- die Innen- und Außenbauteile entsprechend den Ausführungsvarianten aus Abschnitt 4 aufgebaut sind
- die Temperaturdifferenz „Raumtemperatur - Außentemperatur“ 20 Kelvin beträgt.

Im eingeschwungenen Zustand (stationäre Wärmestrombilanz) ergeben sich folgende maximale Temperaturdifferenzen in Abhängigkeit vom Wärmeschutz:

Wärmeschutz entsprechend Abschnitt 4	maximaler Temperaturabfall eines unbeheizten Raumes
„Standard-Bürogebäude“, $U_{ges} = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	ca. 9 Kelvin
„Passiv-Bürogebäude“, $U_{ges} = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	ca. 3 Kelvin

Tab. 5-10: Einfluss des Wärmeschutzes der Gebäudehülle auf den maximalen Temperaturabfall eines unbeheizten Raumes

Die Ergebnisse bestätigen die oben aufgestellte These. Die maximale Temperaturdifferenz ist in gut gedämmten Gebäuden geringer. Damit fallen auch die Nachteile der Luftheizung weniger schwer ins Gewicht. Es ist also durchaus denkbar, dass die Luftheizung ausschließlich ein Konzept für sehr gut gedämmte Gebäude ist. Um dies zu beantworten, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

6 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG

Am Schluss der Arbeit werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst und die wesentlichen Aussagen hervorgehoben. Dabei werden diese vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen diskutiert. Analog zum bisherigen Vorgehen wird bei der zusammenfassenden Bewertung zwischen den zwei inhaltlichen Teilen unterschieden.

Erster Teil: Beispielhafte Darstellung der Möglichkeiten und Konsequenzen einer hohen energetischen Effizienz (Abschnitt 4)

Um die Möglichkeiten und Konsequenzen einer weit reichenden Steigerung der energetischen Effizienz bei Büro- und Verwaltungsgebäuden zu untersuchen, werden in Abschnitt 4 mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen zwei Ausführungsvarianten eines Beispielgebäudes verglichen. Die Variante „Standard-Bürogebäude“ repräsentiert eine Ausführung, bei der keine Energiesparmaßnahmen über das gesetzliche Mindestmaß (Wärmeschutzverordnung 1995) hinaus ergriffen wurden. Bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ werden im Gegensatz sehr weitgehend die zu vertretbaren Kosten derzeit auf dem Markt verfügbaren Energiesparmaßnahmen umgesetzt. Aus dem Vergleich lassen sich in Bezug auf die Variante „Passiv-Bürogebäude“ folgende Aussagen treffen:

- Aufgrund des hohen Effizienzstandards wird eine Primärenergieeinsparung von 71 % erzielt
- Es kann auf eine aktive Kühlung im Sommer verzichtet werden
- Die energieeffiziente Ausführung „Passiv-Bürogebäude“ ist dem „Standard-Bürogebäude“ wirtschaftlich überlegen.

Diese drei durch Beispielrechnungen gewonnenen Ergebnisse werden kurz in Bezug auf folgende Punkte diskutiert:

- a) Belastbarkeit des Berechnungsverfahrens
- b) Realitätsnähe des verwendeten Berechnungsmodells / Gebäudemodells
- c) Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude.

Primärenergiebedarf und Raumkomfort

- a) Primärenergiebedarf und Raumkomfort werden im Wesentlichen über dynamische Simulationsrechnungen ermittelt. Diese sind derzeit die genaueste Methode, die Temperaturentwicklung und den Energiebedarf von Gebäuden zu berechnen. Die Validität des verwendeten dynamischen Gebäudesimulationsprogramms TAS ist in [Knissel 1998] nachgewiesen. Von der Richtigkeit der Simulationsergebnisse kann unter den angegebenen Randbedingungen also ausgegangen werden.

Verfeinert werden können die Simulationen durch die Integration von Lichtsimulationsrechnungen zur Bestimmung des Kunstlichtbedarfs. In der verwendeten Version 8.0 des Pro-

gramms TAS ist dies jedoch nicht möglich. Entsprechend wird der Kunstlichtbedarf über den Tageslichtquotient und die in [LEE 1995] ausgewiesenen Tabellen bestimmt. Der so berechnete Jahresstrombedarf wird in Tagesprofile umgesetzt und in die Simulationsrechnungen integriert (Anhang A-8.2.4). Das Verfahren zur Bestimmung des Jahresstrombedarfs der Beleuchtung wird seit Jahren in der Schweiz (SIA 380/4) und in Deutschland (LEE) in der integralen Planung angewandt. Die so berechneten Stromverbräuche können damit als realistisch eingeschätzt werden.

Ergänzend zu den Simulationen werden einfache Ansätze aus der SIA 380 verwendet, um die Positionen „Warmwasser“ und „diverse Technik“ sowie den Aufwand an Hilfsenergie zu quantifizieren (siehe Tab. 4-7). Da diese Punkte in beiden Ausführungsvarianten konstant sind oder nur einen geringen Beitrag zum gesamten Primärenergiebedarf liefern, wird die Belastbarkeit der Ergebnisse hierdurch nicht wesentlich eingeschränkt.

- b) Von entscheidender Bedeutung für eine realitätsnahe Einschätzung des energetischen Verhaltens ist das vom Benutzer definierte Gebäudemodell. In der vorliegenden Untersuchung wird das Gebäudemodell sehr sorgfältig definiert. So werden u. a. eine übersichtliche Beleuchtungs- und Lüftungsplanung für das betrachtete Beispielgebäude durchgeführt und auf dieser Grundlage die entsprechenden Simulationsparameter definiert. Das Gebäudemodell weist somit im Bereich der technischen Komponenten einen hohen Realitätsbezug auf.

Eine Vereinfachung wird im Bereich der Nutzung getroffen. Es werden vier thermische Zonen abgebildet: Flur, Nebenräumen, Nord-Büro und Süd-Büro. Das tatsächliche Nutzungsprofil von Bürogebäuden ist jedoch differenzierter. Es umfasst u. a. niedrig-, mittel und hochinstallierte Büros, Besprechungsräume, Eingangsbereich, Kantine usw. Da in der vorliegenden Untersuchung systematische Aussagen u. a. bezüglich unterschiedlicher Einflussparametern gewonnen werden sollen, wird auf eine weitere Differenzierung verzichtet. Für die energetischen Aussagen ist dies ohne Bedeutung, solange die angenommenen internen Wärmequellen dem Mittelwert des zu bewertenden Gebäudes / Gebäudebereichs entsprechen. Der Raumkomfort muss jedoch raumweise ermittelt werden. Für Gebäudebereiche oder Räume mit deutlich höheren internen Wärmequellen wie z. B. Versammlungsräume oder Serverräume müssen deswegen gesonderte Untersuchungen angestellt werden.

Die Aussagen zur Primärenergieeinsparung und zur Wirtschaftlichkeit werden durch Vergleich der zwei Ausführungsvarianten gewonnen und entsprechend von der Variantendefinition beeinflusst. In der vorliegenden Arbeit sind die verglichenen Gebäudevarianten so gewählt, dass die eine im Bereich des „Minimums“, die andere im Bereich des „Maximums“ der heute bei Neubauten erzielbaren energetischen Effizienz liegt. Damit wird der in der Realität existierende Bereich „eingerahmt“. Bei dieser Variantendefinition ergibt sich die maximal erreichbare Primärenergieeinsparung. Wird das gesamte Effizienzniveau des „Standard-Bürogebäudes“ auf das Niveau des „Niedrigenergie-Bürogebäudes“ aus [Knissel 1999] angehoben und damit der Ausgangszustand für den energetischen Vergleich deutlich verbessert, ist mit der Variante „Passiv-Bürogebäude“ trotzdem noch eine Primärenergieeinsparung von etwa 50 % zu erzielen.

Vor diesem Hintergrund lässt sich festhalten:

Durch die Umsetzung einer hohen energetischen Effizienz lässt sich eine wesentliche Einsparung beim Primärenergiebedarf erzielen. Gleichzeitig beeinflusst der hohe Effizienzstandard das sommerliche Temperaturverhalten positiv. In Verbindung mit einem guten Sonnenschutz und der Möglichkeit zur freien Kühlung kann so ohne Komfortverlust auf eine aktive Kühlung verzichtet werden.

c) Die Primärenergieeinsparung und der Raumkomfort sind quantitativ nicht einfach auf andere Gebäude übertragbar, sondern müssen jeweils individuell berechnet werden. Aussagen darüber, wie sich der Primärenergiebedarf und der Raumkomfort bei anderen Randbedingungen darstellen, werden durch eine Parameterstudie erarbeitet. Es werden wichtige Gebäudeparameter variiert und die Auswirkungen auf Primärenergiekennwert und Raumkomfort dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Geometrische Größen wie Fensterflächenanteil der Hauptfassaden, Orientierung der Hauptfassaden oder A/V-Verhältnis haben keinen wesentlichen Einfluss auf den Primärenergiekennwert. An die Kubatur des Gebäudes werden also aus energetischer Sicht keine zwingenden Anforderungen gestellt.
- Der Luftwechsel kann deutlich über den nach DIN 1946 erforderlichen Mindestaußenvolumenstrom erhöht werden. Wird eine effektive Wärmerückgewinnung und ein Kanalnetz mit geringem Strömungswiderstand eingesetzt, bleibt auch bei einer Erhöhung des Luftwechsels in den Büros von $1,3 \text{ h}^{-1}$ auf 3 h^{-1} der Strom- und der Heizenergiebedarf auf einem niedrigen Niveau.
- Die Reduktion der internen Wärmequellen ist von zentraler Bedeutung zur Umsetzung von energieeffizienten Gebäudekonzepten. Sie ermöglicht den Verzicht auf eine aktive Kühlung sowie die Umsetzung eines hohen Wärmeschutzes ohne die Gefahr von sommerlichen Überhitzungen. Zudem tragen energieeffiziente Geräte durch den geringen Stromverbrauch direkt zur Reduktion des Primärenergiebedarfs bei.

Für den Bau von energieeffizienten Gebäuden lässt sich damit schlussfolgern:

Bei der Realisierung energieeffizienter Gebäude besteht ein großer Gestaltungsspielraum. Geometrische Größen haben nur eine untergeordnete Bedeutung für das energetische Verhalten. Wesentlich ist eine hohe Effizienz der internen Wärmequellen (z. B. Beleuchtung, Arbeitshilfen), ergänzt um einen hohen Wärmeschutz der Gebäudehülle, eine effiziente Wärmerückgewinnung und einen geringen Stromverbrauch der Lüftungsanlage.

Betätigt werden die Aussagen zum Primärenergiebedarf und Raumkomfort durch die ersten realisierten Bürogebäude mit ähnlich hoher energetischer Effizienz. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Verbrauchswerten zeigt eine gute Übereinstimmung. Wesentliche Differenzen treten nur beim Stromverbrauch der Arbeitshilfen auf.

Wirtschaftlichkeit

- a) Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird mit der Kapitalwertmethode ein übliches Verfahren der Investitionsrechnung verwendet. Bei der Kapitalwertmethode werden die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Ein- und Auszahlungen auf den Anfangszeitpunkt abgezinst (dynamisches Verfahren). Dadurch wird u. a. die Veränderung des Geldwertes im Zeitverlauf berücksichtigt.
- b) Nicht berücksichtigt bei der ökonomischen Bewertung werden steuerliche Aspekte. Diese hängen stark von der individuellen Situation des Investors ab. In der Regel werden sich steuerliche Aspekte jedoch positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.
- c) Auch die hier gemachten Aussagen zum Kapitalwert sind zunächst auf die getroffenen Randbedingungen und Annahmen beschränkt und müssen individuell überprüft werden. So hängt die Wirtschaftlichkeit neben der Definition der beiden Ausführungsvarianten von den getroffenen Kostenannahmen sowie weiteren Randbedingungen ab: Energiepreis, Energiepreissteigerung, Inflationsrate, Kalkulationszins, Betrachtungszeitraum. Es lässt sich jedoch die Schlussfolgerung ziehen:

Bei energieeffizienten Bürogebäuden können durch Einsparungen bei den Investitionskosten für die Haustechnik Mehrinvestitionen z. B. im Bereich des Baukörpers und der Arbeitshilfen kompensiert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus. In Verbindung mit den geringeren Energie- und Wartungskosten kann deswegen ein hoher Effizienzstandard wirtschaftlich sein.

Fazit

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass bei Büro- und Verwaltungsgebäuden eine hohe Energieeffizienz möglich ist und sogar wirtschaftlich sein kann. Dies wird von den ersten Modellprojekten bestätigt. Sofern die Umsetzung in der Breite gelingt, kann mit derart energieeffizienten Gebäuden ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes geleistet werden.

Zweiter Teil: Vorschlag für ein sinnvolles Wärmeschutzniveau bei energieeffizienten Bürogebäuden (Abschnitt 5)

Die Wirtschaftlichkeit wird bei der Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ neben den Einsparungen bei Energie- und Wartungskosten durch eine Reduktion der Investitionskosten für die Haustechnik erreicht. Um diese Investitionskosteneinsparungen zu realisieren, müssen bestimmte Effizienzniveaus im Bereich der internen Wärmequellen (Beleuchtung und Arbeitshilfen) und beim Wärmeschutz der Gebäudehülle eingehalten werden. Die erforderlichen Effizienzniveaus können nicht pauschal angegeben werden, sondern müssen individuell in Abhängigkeit von den jeweiligen Gebäudeparametern ermittelt werden. Eine Möglichkeit die Effizienzstandards zu ermitteln sind dynamische Simulationsrechnungen. Da diese heute aber nur bei wenigen Objekten durchgeführt werden, ist die Entwicklung einfacher Planungskenngrößen - so genannter Effizienzkenngößen - zur individuellen Bestimmung der Effizienz-

niveaus notwendig. Sinnvoll erscheint die Definition einer Winter- und einer Sommer-Kenngröße. Im Abschnitt 5 wird die Winter-Kenngröße ausgearbeitet, aus der sich Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle ableiten. Als Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen wird folgende Winter-Bedingung aufgestellt.

Winter-Bedingung

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist so zu dimensionieren, dass das Gebäude mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom über die Zuluft beheizt werden kann.

Quantifiziert wird die Winter-Bedingung über eine Winter-Kenngröße: den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle U_{ges} . Dieser muss einen gewissen Grenzwert einhalten. Der Grenzwert wird als Winter-Kriterium U_{max} bezeichnet. Anstelle der Trilogie „Bedingung - Kenngröße - Kriterium“ wird im Folgenden häufig vereinfachend von der Winter-Kenngröße gesprochen.

Vor einer mathematischen Beschreibung der Winter-Kenngröße wird untersucht, ob die Winter-Bedingung tatsächlich geeignet ist, ein energetisch wie ökonomisch sinnvolles Wärmeschutz-niveau zu beschreiben.

- Energetisch sinnvoll ist ein hoher Wärmeschutz nur, wenn dieser die sommerliche Temperaturentwicklung nicht wesentlich verschlechtert. Andernfalls könnte eine aktive Kühlung und damit ein zusätzlicher Strombedarf erforderlich werden. Eine Analyse der Energiebilanz zeigt, dass sich bei einer Erhöhung des Wärmeschutzes zwar ein geringer Anstieg der inneren Energie - und damit der Raumtemperatur - an heißen Sommertagen ergibt, dieser Anstieg aber z. B. durch effiziente elektrische Geräte (Beleuchtung, Arbeitshilfen) oder einen Erdreichwärmetauscher kompensiert werden kann. Bei der Variante „Passiv-Bürogebäude“ liegt die Reduktion der inneren Energie durch die effizienten elektrischen Geräte und den Erdreichwärmetauscher um den Faktor 7,5 über dem Wert, der für die Kompensation des erhöhten Wärmeschutzes erforderlich wäre. Ein hoher Wärmeschutz kann also eingebunden in ein energieeffizientes Gebäudekonzept ohne die Gefahr von Überhitzungen im Sommer realisiert werden.
- Dass die Winter-Kenngröße einen ökonomisch sinnvollen Standard beschreibt, zeigt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Der Verzicht auf Heizkörper beschreibt das Optimum der Wirtschaftlichkeitskurve, sofern der Einsatz von Fenstern mit 3-fach-Wärmeschutzverglasungen und gut gedämmten Rahmen vorausgesetzt wird. Da in dieser Arbeit energieeffiziente Gebäude untersucht werden, wird der Einsatz dieser Fenster unterstellt.

Nachdem die prinzipielle Eignung der Winter-Bedingung bestätigt ist, wird eine Berechnungsgleichung für die Winter-Kenngröße aufgestellt. Über diese Berechnungsgleichung kann das Wärmeschutzniveau bestimmt werden, das für eine Luftheizung erforderlich ist. Der sich berechnende Grenzwert U_{max} entspricht dem einzuhaltenden Winter-Kriterium.

Eine Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die Beheizbarkeit über die Zuluft je nach Randbedingungen mit sehr unterschiedlichen Werten von U_{max} erreicht wird. Bei großen Gebäuden mit einem hohen Hauptnutzflächenanteil kann das erforderliche Wärmeschutzniveau sogar unter dem der Wärmeschutzverordnung 1995 liegen. Da mit der Winter-Kenngröße

neben dem ökonomischen auch ein energetisch hochwertiger Standard beschrieben werden soll, wird der zulässige Bereich für U_{max} eingegrenzt und spezielle Randbedingungen vorgeschlagen (Effizienzrandbedingungen), die zur Berechnung herangezogen werden sollen.

Eine Ziel bestand darin, die Berechnungsgleichung einfach zu gestalten, damit diese bereits in einem frühen Planungsstadium angewandt werden kann. Hierzu wurden Vereinfachungen beim Berechnungsansatz getroffen. Zwei wesentliche Vereinfachungen sind:

- es wird eine stationäre Bilanz für das Gebäude erstellt, d. h. dynamische Vorgänge werden vernachlässigt
- es wird eine gebäudebezogene Betrachtung durchgeführt, d. h. raumspezifische Eigenschaften werden nicht berücksichtigt.

Soll das Konzept der Luftheizung bei einem Bauprojekt umgesetzt werden, sind weiterführende objektbezogene Untersuchungen erforderlich. Diese betreffen insbesondere die Temperaturentwicklung bei einer raumweisen Betrachtung und das sich daraus ergebende Betriebs- und Regelkonzept. In der vorliegenden Arbeit werden diesbezüglich bereits systematische Untersuchungen durchgeführt, aus denen folgende Aussagen getroffen werden können.

- Aus der raumbezogenen Betrachtung können sich schärfere Anforderungen an den Wärmeschutz ergeben. Diese lassen sich aber durch eine entsprechende Grundrissgestaltung reduzieren. Da der spätere Heizenergieverbrauch vom Wärmeschutz des gesamten Gebäudes abhängt, wird der Wärmeschutz weiterhin über die gebäudebezogene Betrachtung definiert.
- Das Aufheizen des Gebäudes nach einer Nachtabschaltung (9 Stunden) ist in der Regel mit dem aus hygienischen Gründen erforderlichen morgendlichen Vorlauf der Lüftungsanlage von 4 Stunden (Spülphase) möglich. Nach einer Wochenendabschaltung muss die Vorlaufzeit der Lüftungsanlage deutlich über die morgendliche Spülphase hinaus verlängert werden. Diese gebäudebezogenen Aussagen gelten auch für kritische Einzelräume.

Fazit

Mit der Winter-Kenngröße ist eine einfache Planungskenngröße entwickelt, die einen energetisch hochwertigen und wirtschaftlich sinnvollen Wärmeschutz beschreibt. Über eine Berechnungsgleichung lässt sich der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle U_{max} berechnen, der für eine Beheizung über die Lüftungsanlage und damit den Verzicht auf Heizkörper erreicht oder unterschritten werden muss. Dies ist ein Schritt hin zu Hilfsmitteln für die Planung von energieeffizienten Bürogebäuden. Die Winter-Kenngröße muss nun durch die Anwendung in der Planung überprüft und um die Sommer-Kenngröße ergänzt werden (siehe Abschnitt 7).

7 AUSBLICK

Im Verlauf der Arbeit wurde an den jeweiligen Stellen bereits auf den noch erforderlichen Untersuchungsbedarf hingewiesen. Dies soll an dieser Stelle nicht umfassend wiederholt werden, sondern nur die wichtigsten Linien aufgezeigt werden.

Um die Umsetzung von energieeffizienten Bürogebäuden auf dem Niveau des „Passiv-Bürogebäudes“ zu fördern, müssen die theoretischen Ergebnisse der hier durchgeführten Beispielrechnungen (Abschnitt 4) durch weitere Modellprojekte verifiziert und untermauert werden. Neben der erzielbaren Primärenergieeinsparung sind in den Modellprojekten auch die Mehr- bzw. Minderkosten zu dokumentieren, um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit machen zu können.

Die Erfahrungen aus den ersten realisierten Modellgebäuden zeigen einen hohen Primärenergieverbrauch der Arbeitshilfen. Die in den Simulationsrechnungen ausgewiesene weitgehende Primärenergieeinsparung muss in diesem Bereich noch durch konkrete Beispiele untermauert werden. Ein denkbarer Weg hierzu ist die Auflage eines Förderprogramms, z. B. entsprechend dem Programm „Solaroptimiertes Bauen“. Die Förderbedingungen sollten unter anderem Anforderungen an den Effizienzstandard der Arbeitshilfen enthalten.

Die Winter-Kenngröße muss in der Planung angewandt und gegebenenfalls auf der Grundlage der Praxistests modifiziert werden. Darüber hinaus sind die konkreten Möglichkeiten zur Umsetzung der Luftheizung in Bürogebäuden weiter zu untersuchen. Offen ist insbesondere die Frage, ob und mit welchen Betriebs- und Regelkonzepten die Temperatur- und Außenluftanforderungen bei Räumen mit unterschiedlich hohen internen Wärmequellen sichergestellt werden können.

Ergänzt werden muss die Winter-Kenngröße um eine Sommer-Kenngröße, die die Höhe der internen Wärmequellen beschreibt, bis zu der ohne nennenswerten Komfortverlust auf eine aktive Kühlung verzichtet werden kann (siehe Abb. 3-1). Zwar kann die Winter-Kenngröße bei Gebäuden mit reduzierten internen Wärmequellen und/oder Erdreichwärmetauscher auch alleine angewandt werden. Für die Optimierung von Gebäudeentwürfen ist jedoch die Kopplung beider Größen sinnvoll.

Liegen genügend Erfahrungen über den tatsächlichen Energieverbrauch von energieeffizienten Gebäuden vor, sollte auf dieser Grundlage ein maximaler Primärenergiekennwert definiert werden, der zusammen mit der Winter- und der Sommer-Kenngröße einen energetisch hochwertigen Standard bei Bürogebäuden beschreibt (siehe Abb. 5-1).

Mit der vorliegenden Untersuchung ist ein Weg aufgezeigt, die Umwelt von CO₂-Emissionen zu entlasten bei gleichzeitigen wirtschaftlichen Vorteilen für die Investoren. Aufgrund dieser positiven Potenziale sollten die weiterführenden Fragen bald untersucht und so die Grundlagen für die Umsetzung in der Breite geschaffen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Ebel 1996] Ebel, W.; Eicke-Hennig, W.; Feist, W.; Groscurth, H.-M.: Der zukünftige Heizwärmebedarf der Haushalte; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1996
- [Eicke-Hennig et al. 1995] Eicke-Hennig et al.: Empirische Überprüfung der Möglichkeiten und Kosten, im Gebäudebestand und bei Neubauten Energie einzusparen und die Energieeffizienz zu steigern; Endbericht für die „Deutsche Bundesstiftung Umwelt“ in Kooperation mit der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1995
- [Eicke-Hennig 1997] Eicke-Hennig, W. (IWU); M. Jäkel (IWU); J. Zeller (ebök): Endbericht zum Förderprogramm 30 Niedrigenergiehäuser in Hessen; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1997
- [EJO] EJO - Engels und Jung Ingenieurgesellschaft mbH, Lochermühle 1 - 5, 51465 Bergisch Gladbach
- [Elsner 93] Elsner, N., S. Fischer, J. Huhn: „Grundlagen der Technischen Thermodynamik; Band 2 Wärmeübertragung“; Akademie Verlag; Berlin 1993
- [Energierferat Frankfurt 2002] Energiecontrolling in Bürogebäuden; Presseinformation zum Abschlussworkshop am 12.03.2002; www.energiereferat@stadt-frankfurt.de
- [EnergieAgentur NRG 1998] Auf dem Weg zum energieeffizienten Bürogebäude; Energieagentur NRG, Morianstr. 32, 42103 Wuppertal; 1998
- [Enquete Kommission 1995] Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages: Mehr Zukunft für die Erde; Bonn, 1995
- [EPHW 1997] Loga, T., U. Imkeller-Benjes: Energie-Paß, Heizung/Warmwasser; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1997
- [Erlangen 2001] Energiekosten sparen - in die Zukunft investieren durch energieeffiziente Bauweise bei Büro-, Labor- und Industriegebäuden; Stadt Erlangen / Amt für Umweltschutz und Energiefragen, EnergieAgentur Mittelfranken, Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken, Stadt Nürnberg; Schuhstr. 40; 91052 Erlangen; 2001
- [Fanger 1988] Fanger, P.O.: Introduction of the olf and decipol units to quantify air pollutions perceived by humans indoors and outdoors, Energy and Buildings 12 (1988), S. 1-6
- [Feist 1986] Feist, W.: Primärenergie- und Emissionsbilanz von Dämmstoffen; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1986
- [Feist 1996-1] Feist, W.: Grundlagen der Gestaltung von Passivhäusern; Verlag das Beispiel; Darmstadt, 1996

- [Feist 1996-2] Feist, W.: Passivhäuser – Behaglichkeit ohne Heizung; Tagungsband 1. Passivhaustagung; Passivhaus Institut, Darmstadt 1996
- [Feist 1996-3] Feist, W.: Lebenszyklusbilanzen im Vergleich: Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Energieautarkes Haus; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1996
- [Feist 1999] Feist, W.: Kostengünstige Passivhäuser in Mitteleuropa; Passivhaus Institut; Darmstadt 1999
- [Finke 1996] Finke, Ulrich: Ein Beitrag zu Fragen der Empfundene Luftqualität in Gebäuden; Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Fachbereich 6; Berlin, 1996
- [Fuchs 1999] Fuchs, W. E.: Gibt es heute intelligente Gebäude? Bauphysik 21 (1999); Seiten 138 bis 144
- [GED 1998] Liste stromsparender Geräte 4/98; Gemeinschaft Energielabel Deutschland (GED), c/o IMPULS-Programm Hessen; Annastr. 16; 64285 Darmstadt
- [Gemis] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit/Öko-Institut: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (Version 3.01); Wiesbaden, 1997
- [Grimm 2000] Grimm, S.: Einfluss unterschiedlicher Gebäudeparameter auf den Energiebedarf von Passiv-Bürogebäuden; Diplomarbeit ab der TU Darmstadt; Darmstadt 2000
- [Gröber 1933] Grober, H.; S. Erk: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 2. Auflage; Berlin 1933
- [Hennings/Knissel 2001]; Hennings, D.; J. Knissel: „Energieeffiziente Bürogebäude“ ; BINE Profinfo II/01; Fachinformationsdienst Karlsruhe; Bonn, 2001
- [Hofmann 1998] Hofmann, H.: Energieverbrauch drosseln - Akzeptanz erhöhen, Tendenzen einer zukunftsorientierten Beleuchtungsplanung; Tagungsbeitrag "Impuls + VDI Kongreß 98"; Impulsprogramm Hessen, Annastr. 16, 64285 Darmstadt, 1998
- [IEA 1989] Internationale Energie Agentur, Programm: Energieeinsparung in Gebäuden und im kommunalen Bereich: „Luftaustausch in Gebäuden, Handbuch für die praktische Anwendung von Berechnungsmethoden“; Übersetzung und Überarbeitung des englischen Originals /"Air Infiltration Calculation Techniques, An Applications Guide" by Martin W. Liddament; AIVC; Juni 1986/ von: Thomas Baumgartner, Herbert Bley, Daniel Brühwiler, Peter Hartmann, Hans Moor, Willigert Raatschen, Urs Steinemann, Lutz Trepte; 1986
- [IPH] Impulsprogramm Hessen (Hrsg.): Stromsparcheck für Gebäude; Annastraße 16, 64285 Darmstadt
- [IPH 1998] Impulsprogramm Hessen (Hrsg.): Besseres Licht mit weniger Strom; Annastraße 16, 64285 Darmstadt, 1998

-
- [Kamps 1996] Kamps, O.: Beschreibung und Bewertung der im integrierten Simulationsprogramm TAS verwendeten mathematischen und physikalischen Berechnungsmodelle; Diplomarbeit am Institut für Energietechnik, TU Berlin, 1996
- [KE 1996] Kommunalen Energiepreisvergleich 1996; Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz; Postfach 10 60 34, 70049 Stuttgart
- [Keller 1998] Keller, B.; E. Margyari: Grundsätze einer systematischen Normierung und Dimensionierung für den Heiz- und Kühlbedarf; in HLH Heizung-Lüftung/Klima-Haustechnik; Bd 49; Springer VDI Verlag; September, 1998
- [Klingele 1994] Klingele, M.: Architektur und Energie - Planungsgrundlagen für Büro- und Verwaltungsbauten; Verlag C. F. Müller; Heidelberg, 1994
- [Knissel 1998] Knissel, J.: Validierung des Simulationsprogramms TAS - Vergleich mit Meßergebnissen aus dem Passivhaus Darmstadt-Kranichstein; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1998
- [Knissel 1999] Knissel, J.: Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude - Hinweise zur primärenergetischen und wirtschaftlichen Optimierung; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 1999
- [Knissel 1999-2] Knissel, J.: Modellieren von Erdreichwärmetauschern mit der Konzentrationsfaktor-Methode; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1999
- [Knissel/Loga 1996] Knissel, J.; T. Loga: Mehrkosten des Niedrigenergiestandards gegenüber der Wärmeschutzverordnung 1995; IWU, Darmstadt 1996
- [LEE 1995] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit/Institut Wohnen und Umwelt: Leitfaden Elektrische Energie; 1. Auflage, Wiesbaden, 1995
- [LEG 1995] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit/Institut Wohnen und Umwelt: Leitfaden Heizenergie im Hochbau - Energiebewußte Gebäudeplanung; 5. Auflage; Wiesbaden, 1995
- [Loga 2002] Loga, T: Die EnEV und das Niedrigenergiehaus; Tagungsbeitrag für das IKU Seminar: Die neue Energieeinsparverordnung in Beispielen; Wiesbaden, 2002
- [Loga, Feist 1996] Loga, Tobias; Wolfgang Feist: Verglasungsqualität - Einfluss auf Wärmebilanz und thermische Behaglichkeit in Niedrigenergie- und Passivhäusern; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1996
- [Müller, Fitzner 2001] Müller B., K. Fitzner: Übertragung von flüchtigen organischen Verbindungen bei Rotatinoswärmetauschern; Tagungsband der Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins DKV; Ulm; 2001
- [Osram 1998] Lichtprogramm 1998/1999: Osram GmbH; Hellabrunner Straße 1; 81543 München

- [Otto 1995] Otto, F.: Einfluß von Sorptionsvorgängen auf die Raumfeuchte; Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel; Kassel, 1995
- [Pfafferot 1998] Pfafferot, J.; A. Gerber; S. Herkel: Erdwärmetauscher zur Luftkonditionierung, Anwendungsgebiete, Simulation und Auslegung; Gesundheits-Ingenieur 119; Heft 4 1998
- [PHPP 1998] Passivhaus Projektierungs Paket - Anforderung an qualitätsgeprüfte Passivhäuser; Passivhaus Institut; Darmstadt 1998
- [Ravel: Interne Wärmelasten von Büroräumen] Ravel: Interne Wärmelasten von Büroräumen; Bundesamt für Konjunkturfragen; Bern, 1994
- [Ravel: Grundlagen der Beleuchtung] Ravel: Grundlagen der Beleuchtung; Bundesamt für Konjunkturfragen; Bern, 1994
- [Recknagel 94/95] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik; Oldenbourg Verlag, München, 1994/1995
- [Recknagel 2000] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik; Oldenbourg Verlag, München, 2000/2001
- [Reske 2001] Reske, M; I. Gores; K. Fitzner: Einfluss der Raumluftströmung auf die lokale Feuchtigkeitsabgabe am Auge; Gesundheits-Ingenieur 122, Heft 6 2001
- [Römmling 1999] Römmling, U.: Der Bund - ein ökologisch anspruchsvoller Bauherr - die neuen Regierungsbauten in Berlin; Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz; Heft 43; Zeittechnik-Verlag GmbH; Ludwigshafen am Rhein; 1999
- [Schlünder 1981] Schlünder, E. U.: Einführung in die Wärmeübertragung; Vieweg Verlag; Braunschweig, 1981
- [Schweizer 1999] Schweizer, K.: "Neubau eines Verwaltungsgebäudes mit Passivhaus-Standard"; Schlußbericht zum Förderprogramm Solaroptimiertes Bauen, Projekt: BEO43 / 0335006D; Wagner & Co Solartechnik; Cölbe b. Marburg, 1999
- [Schulz 1996] Schulz J.: Preisspiegel für Bauleistungen im Bereich Tiefbau - 49. Ausgabe, Baupreis Verlag; Oberhausen, 1996
- [Seeberger 2001] Seeberger, J.: Passiv-Bürohaus Lamparter - Projektpräsentation und erste Messergebnisse; Tagungsband 5. Passivhaus Tagung; Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [SIA 380/4] Elektrische Energie im Hochbau; Schweizerischer Ingenieur und Architekten-Verein, Postfach, 80 39 Zürich, 1995
- [SIA 380/4 1992] Elektrische Energie im Hochbau; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Postfach, 80 39 Zürich, Entwurf 1992
- [SIA 380/1] Energie im Hochbau; Schweizerischer Ingenieur und Architekten-Verein, Postfach, 80 39 Zürich, 1991

-
- [Siteco 1998] Bildpreisliste für Innen- und Außenleuchten 1998/1999: Siteco Beleuchtungstechnik GmbH, Ohmstraße 50; 83301 Traunreut
- [Siteco] Telefonische Auskunft der Firma Siteco Beleuchtungstechnik GmbH, Ohmstraße 50; 83301 Traunreut
- [SolarBau Monitor 2000] SolarBau Monitor Journal 2000: Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau; Informationsdienst BINE; Bonn, 2000
- [Spieler 2001] Spieler, A.: Telefonische Auskunft im August 2001
- [Statistisches Bundesamt 1998] Statistisches Bundesamt: Meßzahlen für Bauleistungspreise und Preisindizes für Bauwerke, Reihe 4; Metzler Poeschel; Stuttgart, 1998
- [TAS theory manual] Gough, M.: TAS theory manual; Environmental Design Solutions Limited; 13/14 Cofferridge Close; Stony Stratford; Milton Keynes; MK11 1By; England, 1996
- [VDI Wärmeatlas] VDI-Wärmeatlas; VDI-Verlag GmbH; Düsseldorf, 1984
- [Wagner et al. 2001] Wagner, R; A. Spieler; K. Vajen: Solare Raumheizungsunterstützung in einem Passiv-Solargebäude; in Erneuerbare Energien (Hrsg.: AEE); Vol. 00-4; Gleisdorf, 2001

LISTE DER VERWENDETEN SYMBOLE

A	m ²	Fläche
A_{BGF}	m ²	beheizte Bruttogrundfläche des Gebäudes nach DIN 277, Teil 1
A_{HNF}	m ²	Hauptnutzfläche des Gebäudes nach DIN 277, Teil 1
$A_{HNF,äqu}$	m ²	äquivalente belüftete Hauptnutzfläche
$A_{Hülle}$	m ²	Summe aller Flächen der thermischen Gebäudehülle (Außenmaßbezug)
A_{NGF}	m ²	beheizte Nettogrundfläche des Gebäudes nach DIN 277, Teil 1
A_{NNF}	m ²	Nebennutzfläche des Gebäudes nach DIN 277, Teil 1
AV	m ⁻¹	Oberflächen zu Volumenverhältnis / A/V-Verhältnis
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
B	EUR	Barwert
b	h	Nutzungszeit
b_v	-	Vollbetriebszeitfaktor
C	Wh/K	wirksame Speicherkapazität
C_U	Wh/K	Speicherkapazität der Umgebung
C_W	Wh/K	Speicherkapazität der Wand
c	J/(m ³ ·K)	volumenspezifische Wärmekapazität
c_L	J/(m ³ ·K)	volumenspezifische Wärmekapazität von Luft
c_P	J/(kg·K)	massenspezifische Wärmekapazität
D	decipol	empfundene Luftqualität
$D(t)$	decipol	empfundene Luftqualität zur Zeit t
D_A	decipol	empfundene Luftqualität der Außenluft
D_R	decipol	empfundene Luftqualität der Raumluft
D_0	decipol	empfundene Luftqualität zum Zeitpunkt t_0
D_T	-	Tageslichtquotient nach DIN 5034, Teil 3
ΔD	decipol	Differenz der empfundene Luftqualität zwischen Raum- und Außenluft zu Beginn der Nutzungszeit
d	m	Dicke
d_W	m	thermisch wirksame Dicke
E_0	EUR	Ersatzinvestition diskontiert auf den Anfangszeitpunkt t_0
e	%/a	Energiepreisssteigerung
F_0	-	Fourier-Zahl (dimensionslose Zeit)
f	-	Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums
G	olf	Verunreinigungslast
g_{\perp}	-	g-Wert einer Verglasung bei senkrechtem Strahlungseinfall
H_G	m	mittlere lichte Geschosshöhe
$H_{G,brutto}$	m	mittlere Brutto-Geschosshöhe
H_{ges}	W/K	spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes (Transmission + Lüftung)
$H_{Lüft}$	W/K	spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes durch Lüftung
H_{Trans}	W/K	spezifischer Wärmeverlust des Gebäudes durch Transmission
I_{Geb}	J	innere Energie des Gebäudes
I_0	EUR	Mehr- bzw. Minderinvestitionen bezogen auf den Anfangszeitpunkt t_0

K_{AH}	W/(m ² K)	über den Aufheizzeitraum gemittelter Speicherkoeffizient
K_P	EUR	Kapitalwert
\dot{K}	cm ³ /h	stündlich anfallende Stoffmenge
$k(t)$	cm ³ /m ³	Stoffkonzentration zur Zeit t
k_a	cm ³ /m ³	Stoffkonzentration der Außenluft
k_0	cm ³ /m ³	Stoffkonzentration zur Zeit t_0
L	W/(m ² K)	Wärmeleitkoeffizient
l	m	charakteristische Länge
l_U	m	Umfang des Bauteils
m	kg	Masse
n	h ⁻¹	Luftwechsel
n_{erf}	h ⁻¹	in der Aufheizzeit erforderlicher mittlerer Luftwechsel
n_{Fugen}	h ⁻¹	mittlerer Luftwechsel durch Fugen und Undichtigkeiten
$n_{Fugen,EN832}$	h ⁻¹	mittlerer Luftwechsel durch Fugen und Undichtigkeiten nach EN 832
n_{HNF}	h ⁻¹	mittlerer Luftwechsel im Bereich der Hauptnutzfläche
n_{NA}	-	Anzahl der Wochentage, vor denen eine Nachtabsenkung vorgenommen wird
n_{NNF}	h ⁻¹	mittlerer Luftwechsel im Bereich der Nebennutzfläche
n_{WA}	-	Anzahl der Wochentage, vor denen eine Wochenendabsenkung vorgenommen wird
n_{50}	h ⁻¹	Luftwechsel bei einer Druckdifferenz zwischen innen und außen von 50 Pascal (Ergebnis des Blower-door-Tests)
$\Delta n_{Fugen,Geschoss}$	h ⁻¹	zusätzlicher Luftwechsel durch Fugen und Undichtigkeiten bei Geschosstypgebäude
$\Delta n_{Fugen,Schacht}$	h ⁻¹	zusätzlicher Luftwechsel durch Fugen und Undichtigkeiten bei Schachttypgebäude
PD	%	Prozentsatz Unzufriedener
Pf_{Gas}	-	Primärenergiefaktor Gas
Pf_{Strom}	-	Primärenergiefaktor Strom
p	%/a	Kalkulationszins
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{Q}_{AH}	W	über die Aufheizzeit gemittelte dynamische Aufheizlast des Gebäudes; entspricht dem Wärmestrom (über Aufheizzeit gemittelt), der von den Raumumschließungsflächen aufgenommen wird
\dot{Q}_{Arb}	W	Wärmestrom durch Abwärme der Arbeitshilfen
\dot{Q}_{Bel}	W	Wärmestrom durch Abwärme der Beleuchtung
\dot{Q}_{Geb}	W	Gebäudeheizlast: vom Gebäude zum Einhalten der Solltemperatur benötigter Heizwärmestrom
\dot{Q}_{Heiz}	W	vom Luftheizregister abgegebener Wärmestrom
$\dot{Q}_{Heizkörper}$	W	von Heizkörpern abgegebener Wärmestrom
\dot{Q}_i	W	Wärmestrom zwischen Nachbarräumen innerhalb der thermischen Gebäudehülle
\dot{Q}_{int}	W	Wärmestrom durch interne Wärmequellen (z. B. Personen, Beleuchtung, Arbeitshilfen)
$\dot{Q}_{Lüft}$	W	Wärmestrom durch Luftwechsel über die mechanische Lüftungsanlage, Fenster, Fugen und Undichtheiten

$\dot{Q}_{\text{Lüft, Fug}}$	W	Wärmestrom durch Luftwechsel über Fugen und andere Undichtigkeiten
$\dot{Q}_{\text{Lüft, Fe}}$	W	Wärmestrom durch Luftwechsel über geöffnete Fenster
$\dot{Q}_{\text{Lüft, Geb}}$	W	Wärmestrom durch Luftwechsel über Fenster, Fugen sowie anderen Undichtigkeiten
$\dot{Q}_{\text{Lüft, mech}}$	W	Wärmestrom durch Luftwechsel über mechanische Lüftung
\dot{Q}_{Per}	W	Wärmestrom durch Abwärme der Personen
\dot{Q}_{Sol}	W	Wärmestrom durch solare Einträge über transparente Bauteile
$\dot{Q}_{\text{Speicher}}$	W	Wärmestrom durch Aus- oder Einspeichervorgänge
\dot{Q}_{Trans}	W	Wärmestrom durch Transmission über die Gebäudehülle
$\dot{Q}_{\text{Trans, Fe}}$	W	Wärmestrom durch Transmission über die Fenster
$\dot{Q}_{\text{Trans, op}}$	W	Wärmestrom durch Transmission über die opaken Außenbauteile
\dot{Q}_{Zu}	W	Wärmestrom durch die Zuluft in die beheizte Gebäudehülle
\dot{q}_{AH}	W/m ²	über den Aufheizzeitraum gemittelter Wärmestrom in das Bauteil bezogen auf die Bauteilfläche
\dot{q}_{int}	W/m ²	Wärmestrom durch interne Wärmequellen bezogen auf die Brutto-Grundfläche des Gebäudes
$\dot{q}_{\text{int, max}}$	W/m ²	maximaler Wärmestrom in den Büros durch interne Wärmequellen bezogen auf die Hauptnutzfläche
\dot{q}_{sol}	W/m ²	Wärmestrom durch solare Einträge bezogen auf die Brutto-Grundfläche des Gebäudes
S_X	m	Stärke der Bauteilschichten (Konzentrationsfaktormethode)
s	%/a	Inflationsrate
T	°C	Temperatur
T_A	°C	Außenlufttemperatur
T_{AK}	°C	Temperatur, auf die das Gebäude auskühlt
T_{Anf}	°C	Bauteiltemperatur vor Temperatursprung
T_C	K	Kondensationstemperatur (Kälteanlage)
T_{DIN4701}	°C	Normaußentemperatur nach DIN 4701
T_E	K	Verdampfungstemperatur (Kälteanlage)
T_{Geb}	°C	mittlere Gebäudetemperatur
T_M	°C	mittlere kalorische Bauteiltemperatur
$T_{M, \text{AH}}$	°C	mittlere kalorische Bauteiltemperatur am Ende des Aufheizzeitraums
T_O	°C	Oberflächentemperatur
T_{op}	°C	operative Temperatur
T_R	°C	Raumlufttemperatur
T_{Spr}	°C	Raumlufttemperatur nach Temperatursprung
T_W	°C	Wandtemperatur
T_{WA}	°C	Austrittstemperatur des Kältemittels aus dem Verdampfer
T_{Zu}	°C	Zulufttemperatur beim Eintritt in die beheizte Gebäudehülle
ΔT_{R-O}	K	Temperaturdifferenz ($T_R - T_O$)
ΔT_U	K	Temperaturdifferenz ($T_A - T_R$)
ΔT_{Zu}	K	Temperaturdifferenz ($T_{\text{Zu}} - T_R$)
t	s	Zeit
t_{AH}	h	Aufheizzeitraum
t_{AK}	h	Auskühlzeitraum

t_E	-	Jahr der Ersatzinvestition (Zählweise ab Null)
t_{NA}	h	Länge der Spülphase nach einer Nachtabschaltung
t_{Nutz}	h	wöchentliche Nutzungszeit
t_p	s	Periodendauer
$t_{Spül}$	h	wöchentliche Spülzeit zum Abtransport der Schadstoffe
t_{WA}	h	Länge der Spülphase nach einer Wochenendabschaltung
t_{Woche}	h	Stunden pro Woche
t_0	a	Investitionszeitpunkt
U	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient
U_{ges}	W/(m ² K)	mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle
U_{max}	W/(m ² K)	maximaler mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der thermischen Gebäudehülle, bis zu dem eine Beheizung über die Zuluft möglich ist
ΔU_S	W/(m ² K)	Reduktionswert für die Sonnenkorrektur nach DIN 4701
V	m ³	Volumen
$V_{Atrim,brutto}$	m ³	Brutto-Volumen des Atriums (ab $H_{G,brutto}$ gerechnet)
V_{Geb}	m ³	beheiztes Netto-Volumen des Gebäudes
$V_{Geb,BGF}$	m ³	über A_{BGF} und $H_{G,brutto}$ ermitteltes Gebäudevolumen
$V_{Geb,brutto}$	m ³	beheiztes Brutto-Volumen des Gebäudes
V_S	m ³	Volumen des Bauteils bis zum Temperatur-Symmetriezentrum
$V_{spül}$	m ³	erforderliches Luftvolumen zum „Weglüften“ einer Anfangskonzentration
\dot{V}_{hyg}	m ³ /h	hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom
$\dot{V}_{hyg,Nutz}$	m ³ /h	hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom während der Nutzungszeit
$\dot{V}_{hyg,Spül}$	m ³ /h	hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom während der Spülphase
v_{hyg}	m ³ /(m ² h)	flächenbezogener hygienischer Mindestaußenluftvolumenstrom
W	W/m ²	Konstante
X	m	Abstand des Temperatur-Symmetriezentrums eines Bauteils von der Oberfläche
x	m	Abstand von der Oberfläche
x_E	m	Eindringtiefe, bei der eine periodische Anregung der Oberflächentemperatur auf den Wert θ_{max} abgeklungen ist
Y	W/m ³	Konstante
$Z(t)$	EUR	Zahlungen im Jahr t
α_i	W/(m ² K)	innerer Wärmeübergangskoeffizient / Raumluft-Bauteiloberfläche
$\alpha_{i,ab}$	W/(m ² K)	innerer Wärmeübergangskoeffizient bei abwärts gerichtetem Wärmestrom
$\alpha_{i,auf}$	W/(m ² K)	innerer Wärmeübergangskoeffizient bei aufwärts gerichtetem Wärmestrom
$\alpha_{i,hor}$	W/(m ² K)	innerer Wärmeübergangskoeffizient bei horizontalem Wärmestrom
$\alpha_{int}(t)$	W/(m ² K)	interner Wärmeübergangskoeffizient (Oberflächentemperatur - mittlere kalorische Bauteiltemperatur)
$\alpha_{int,AH}$	W/(m ² K)	über den Aufheizzeitraum gemittelter interner Wärmeübergangskoeffizient (Oberflächentemperatur - mittlerer kalorischer Bauteiltemperatur)
ε	mm	Rauhigkeit der Lüftungskanäle

ε_{ideal}	-	unter idealen Bedingungen erzielbare Leistungszahl
ε_{real}	-	unter realen Bedingungen erzielbare Leistungszahl
$\varepsilon_{sp\ddot{u}l}$	-	Luftaustauschzahl
ε_V	-	Lüftungseffektivität
Φ_{WRG}	-	Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung
$\Phi_{WRG,EWT}$	-	Wärmebereitstellungsgrad des Systems Wärmerückgewinnung und Erdreichwärmetauscher
η_C	-	Carnot'scher Wirkungsgrad
η_{ex}	-	exergetischer Wirkungsgrad (Carnot'scher Gütegrad)
φ	-	Verhältnis Fensterfläche zu Brutto-Grundfläche
κ	-	Betriebszeitfaktor der Lüftungsanlage: Anteil der wöchentlichen Betriebszeit an den gesamten Wochenstunden
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
Θ	K	Temperaturdifferenz Bauteil-Umgebung
θ_A	K	Temperaturamplitude an der Oberfläche
θ_{max}	K	maximale Temperaturamplitude in Entfernung x von der Oberfläche
θ_N	-	normierte Temperatur
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	m	Eindringtiefe einer periodischen Anregung
τ	h	Zeitkonstante des Gebäudes
$\tau_{AH}(t_{AH})$	h	Zeitkonstante (zeitabhängige) zur Beschreibung des von den Speichermassen in der Aufheizphase aufgenommenen Wärmestroms
τ_{AK}	h	Zeitkonstante für den Auskühlvorgang
ω	s ⁻¹	Kreisfrequenz der äußeren Anregung
ξ	-	Atriumfaktor: Quotient aus $V_{Atrium,brutto}$ und $V_{Geb,brutto}$
ξ_{Sym}	-	normierter Abstand vom Symmetriezentrum
ψ		Verhältnis von Netto- zu Brutto-Volumen des Gebäudes
ζ	-	Hauptnutzflächenfaktor: Anteil der Hauptnutzfläche an der Brutto-Grundfläche

Tiefgestellte Indices

AW		Außenwand
BGF		Brutto-Grundfläche
BTF		Bauteilfläche
DA		Dach
F		Fenster
HNF		Hauptnutzfläche
KD		Kellerdecke
NGF		Netto-Grundfläche
a		außen
ges		Gesamtwert
i		innen
j		bezogen auf Bauteil j
max		Maximalwert
mittel		Mittelwert
r		bezogen auf Bauteilschicht r
t		zum Zeitpunkt t
0		zum Zeitpunkt t_0

Hochgestellte Indices

V, Q	Symbol	Volumen V , Wärme Q
\dot{V}, \dot{Q}	Punkt auf Symbol	Volumenstrom \dot{V} , Wärmestrom \dot{Q}
\bar{V}, \bar{Q}	Querbalken über Symbol	Wochenmittelwert unter Auslegungsbedingungen

ANHANG

- A-8 DEFINITION DER UNTERSUCHTEN AUSFÜHRUNGSVARIANTEN
- A-9 ABSCHÄTZEN DER MEHR- BZW. MINDERAUSGABEN FÜR DIE VARIANTE „PASSIV-BÜROGEBÄUDE“
- A-10 AUßENLUFTBEDARF IN DER MORGENDLICHEN SPÜLPHASE
- A-11 BEHEIZBARKEIT VON KRITISCHEN EINZELRÄUMEN
- A-12 DYNAMISCHE AUFHEIZLAST BEI INTERMITTIERENDEM HEIZBETRIEB

A-8 DEFINITION DER UNTERSUCHTEN AUSFÜHRUNGSVARIANTEN

In Abschnitt 4 werden dynamische Simulationsrechnungen vorgenommen, um die Möglichkeiten und Konsequenzen einer hohen energetischen Effizienz bei Bürogebäude an einem Beispielgebäude aufzuzeigen. Nachfolgend werden das den Simulationsrechnungen zugrunde liegende Gebäudemodell und die angenommenen Simulationsrandbedingungen ausführlich beschrieben. Um einen möglichst geschlossenen Überblick geben zu können, werden im Haupttext aufgeführte Angaben im Anhang erneut dargestellt. Die sich damit ergebenden Redundanzen werden zugunsten einer größeren Übersichtlichkeit in Kauf genommen.

Für jede Variante wird die Ausprägung des Baukörpers, der Nutzung und der Heizungs-, Lüftungs-, und Klimaanlage (HLK-Anlage) definiert. Um Wiederholungen innerhalb des Anhangs zu vermeiden, wird bei identischen Ausführungen auf die entsprechende Textpassage verwiesen.

A-8.1 Passiv-Bürogebäude / Baukörper

A-8.1.1 Geometrie

Die Parameterstudie wird an einem exemplarischen Verwaltungsgebäude mit zwei-bündigem Rechteckgrundriss durchgeführt. Bei dem Verwaltungsgebäude handelt es sich um ein 5-stöckiges Gebäude der Dimension 90 m x 11 m x 16,5 m (L x B x H) mit ca. 4.400 m² Netto-Grundfläche. Die Geschosshöhe beträgt 3,30 m. Das Gebäude ist in Massivbauweise mit Lochfenstern ausgeführt. Nebennutzflächen wie Garderobe, WC, Teeküchen usw. sind in einem zentralen Kernbereich und an den Stirnseiten angeordnet. Der Keller ist unbeheizt. Abb.

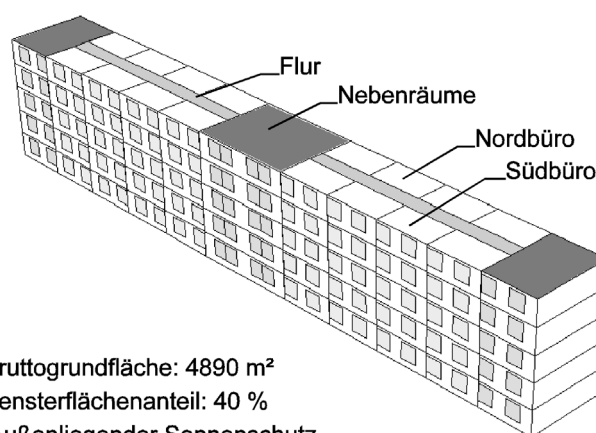


Abb. 8-1: Skizze des Beispielgebäudes

8-1 zeigt eine schematische Ansicht des Gebäudes sowie eine Skizze vom Grundriss.

Die Aufteilung der Flächen auf Büro- und Nebenflächen entspricht den in der VDI 3807 angegebenen mittleren Flächenverhältnissen für Verwaltungsgebäude. Die Brutto-Grundfläche des Gebäudes wird pauschal mit dem in der SIA 380/4 angegebenen Flächenverhältnis von 0,9 aus der Netto-Grundfläche berechnet. Sie beträgt 4 890 m². 50 % der Bruttogrundfläche werden als Hauptnutzfläche, d. h. als Büros, genutzt. Der Rest setzt sich aus Nebennutz-, Verkehrs-, Funktions- und Konstruktionsflächen zusammen. Die Größe der einzelnen Teilflächen zeigt Tab. 8-1.

Brutto-Grundfläche (BGF)	NGF+Konstruktionsfläche	4890 m ²	100 % _{BGF}
Netto-Grundfläche (NGF)	Büro, Flur, Nebenräume	4400 m ²	90 % _{BGF}
Nebennutzfläche (NNF) + Funktionsfläche (FF)	Nebenräume	1400 m ²	28 % _{BGF}
Verkehrsfläche (VF)	Flur	600 m ²	12 % _{BGF}
Hauptnutzfläche (HNF)	Büro	2400 m ²	50 % _{BGF}
Konstruktionsfläche (KF)		490 m ²	10 % _{BGF}

Tab. 8-1: Flächenaufteilung im Beispielgebäude

Die Büros haben lichte Abmaße von 7,5 m x 4 m x 3 m (L x B x H) und sind mit jeweils zwei Personen besetzt. Der Fensterflächenanteil beträgt 40 % bezogen auf die Innenfläche der Außenwand, bzw. 0,3 m² pro m² Hauptnutzfläche.

Das Gebäude weist eine gute Tageslichtausleuchtung auf. Erreicht wird dies durch sturzfremde Fenster, geringe Raumtiefen von 4 m und einen außen liegenden Sonnenschutz, der auch im geschlossenen Zustand ausreichend Tageslicht in die Büros lässt.

A-8.1.2 Materialaufbau der Bauteile

Nachfolgend sind die in der Simulation berücksichtigten Bauteile definiert. Es wird angenommen, dass die Innenwände als Leichtbauwände ausgeführt sind und weder eine abgehängte Decke noch ein Ständerfußboden vorgesehen ist. Die Fenster bestehen aus einer 3-fach-Wärmeschutzverglasung mit 30 % Rahmenanteil. Als Fensterrahmen kommt ein hochwärmegedämmter Passivhaus-Fensterrahmen zum Einsatz. Die Verschmutzung der Verglasung wird mit einem Reduktionsfaktor von 0,9 berücksichtigt. Die Verschattung durch Bäume, Nachbarbebauung und Fensterlaibung wird pauschal über einen Reduktionsfaktor von 0,84 berücksichtigt. Dies entspricht nach [EPHW 1997] einer unverschatteten Lage. Die Außenwand ist als Stahlbetonwand ausgeführt und mit einem Wärmedämmverbundsystem gedämmt. Die Gebäudehülle weist einen bei Passiv-Wohngebäuden üblichen Dämmstandard auf. Die angenommenen Dämmstoffdicken und U-Werte der einzelnen Außenbauteile sind in Tab. 8-2 zusammengefasst.

	Dämmstoffdicke cm	U-Wert W/(m ² K)
Außenwand	30	0,128
Dach	40	0,096
Kellerdecke	30	0,124
Fenster	g_{\perp} (Verglasung) = 0,49	0,78

Tab. 8-2: Dämmstoffdicke und U-Werte der thermischen Gebäudehülle beim Passiv-Bürogebäude

In der Simulation werden die Bauteile über ihren schichtweisen Aufbau berücksichtigt. Die Definition der verwendeten Konstruktionen zeigt Tab. 8-3.

Bauteilbezeichnung Außenwand					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Außenputz	0,020	1400	0,277	0,700	0,029
Wärmedämmung	0,300	120	0,222	0,040	7,500
Beton	0,250	2400	0,250	2,100	0,119
Innenputz	0,015	1400	0,277	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				0,128

Bauteilbezeichnung Dach					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Bitumendachbahn	0,020			0,170	0,118
Wärmedämmung	0,400	120	0,222	0,040	10,000
Beton	0,180	2400	0,250	2,100	0,086
Akustikputz	0,015	1400	0,277	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				0,096

Bauteilbezeichnung Innenwand					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Gipskarton	0,012	900	0,230	0,210	0,057
Wärmedämmung	0,060	120	0,222	0,040	1,500
Gipskarton	0,012	900	0,230	0,210	0,057
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				0,534

Bauteilbezeichnung Geschosdecke					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	0,378	0,060	0,083
Zementestrich	0,060	2000	0,277	1,400	0,043
Min.-w.-Trittschalldämmung	0,040	120	0,222	0,040	1,000
Normalbeton	0,180	2400	0,250	2,100	0,086
Akustikputz	0,015	1400	0,277	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert	W/(m²K)				0,636

Bauteilbezeichnung Kellerdecke					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	0,378	0,060	0,083
Zementestrich	0,060	2000	0,277	1,400	0,043
Trittschalldämmung	0,040	120	0,222	0,040	1,000
Normalbeton	0,180	2400	0,250	2,100	0,086
Wärmedämmung	0,260	120	0,222	0,040	6,500
Innenputz	0,015	1400	0,277	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert	W/(m²K)				0,124

Bauteilbezeichnung Fenster	
g-Wert der Verglasung bei senkrechtem Strahlungsdurchgang	0,490
U-Wert des Fensters bei 30% Holzrahmenanteil in W/(m²K)	0,780

Tab. 8-3: Schichtweiser Aufbau der wichtigsten Bauteile des Passiv-Bürogebäudes

A-8.1.3 Sonnenschutz

Die Fenster verfügen über einen beweglichen, außen liegenden Sonnenschutz, bestehend aus horizontalen Aluminiumlamellen. Bei einer Lamellenstellung von 45° beträgt die solare Transmission des Sonnenschutzes 20 %. Der Sonnenschutz wird geschlossen, wenn die Solareinstrahlungen über 300 Watt je Quadratmeter Fensterfläche und gleichzeitig die Außentemperaturen über 15°C liegt.

Die Tageslichtausleuchtung des Büroraumes ist auch bei geschlossenem Sonnenschutz gegeben. Bei einer Lichtausbeute des Tageslichts von 120 lm/Watt [Ravel: Grundlagen der Beleuchtung] und einem Tageslichtquotienten von $D_T=4,3$ (Abstand $1,25 \text{ m}$ vom Fenster, Höhe $0,85 \text{ m}$; siehe Kap. 8.2.4.2) ergibt sich im Falle eines geschlossenen Sonnenschutzes und 300 W/m^2 Solareinstrahlung eine Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von ca. 300 Lux .

Der Blendschutz wird durch den außen liegenden Sonnenschutz gewährleistet. Im Blendfall kann dieser vom Nutzer lokal heruntergefahren werden. Die gewünschten Belichtungsverhältnisse werden über eine Veränderung des Lamellenanstellwinkels erreicht.

A-8.1.4 Luftdichtheit der Gebäudehülle

Es wird angenommen, dass die Gebäudehülle des Passiv-Bürogebäudes sehr dicht ausgeführt wird, so dass der Luftwechsel über Fugen und Undichtigkeiten lediglich $0,05$ pro Stunde beträgt. Dieser Wert ergibt sich nach dem in der EN 832 angegebenen Berechnungsverfahren für ein Gebäude, das bei der Blower-Door-Messung (Unterdruck von 50 Pa) einen Luftwechsel von $n_{50} < 0,5 \text{ h}^{-1}$ aufweist. Ein derartig hohe Dichtheit setzt eine gute und durchdachte Planung sowie eine sorgfältige Bauausführung voraus.

A-8.2 Passiv-Bürogebäude / Nutzung

A-8.2.1 Nutzungszonen

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher interner Nutzungsbedingungen sowie zur Ermittlung energetischer Wechselwirkungen zwischen Gebäudeabschnitten, Wetter und Nutzer wird das Gebäude in unterschiedliche thermische Zonen eingeteilt. Zonen sind Bereiche des Gebäudes, die sich durch ähnliche Verläufe der äußeren wie inneren Wärmelasten auszeichnen und sich damit thermisch ähnlich verhalten. Für jede Zone wird im Rahmen der Simulation die Energie- und Feuchtebilanz für jede Stunde des Jahres berechnet. Das Beispielgebäude ist in die folgenden 4 Zonen unterteilt:

1. Büro Süd
2. Büro Nord
3. Flur
4. Nebenräume.

Für jede dieser Zonen werden nachfolgend die Nutzungsbedingungen definiert.

A-8.2.2 Nutzungszeit und Betriebszeit

Die Nutzungszeit der Büroräume entspricht der Standardnutzung des Leitfadens Elektrische Energie [LEE 1995] sowie [SIA 380/4]:

11 Stunden, 5 Tage pro Woche, 250 Tage im Jahr

von 7:30 bis 18:30 Uhr (Sommerzeit ist berücksichtigt).

Die Betriebszeit der Lüftungsanlage beginnt eine Stunde vor der Nutzungszeit und endet um 20:30 Uhr (Nachzügler, Reinigung):

14 Stunden, 5 Tage pro Woche, 250 Tage im Jahr

von 6:30 bis 20:30 Uhr (Sommerzeit ist berücksichtigt).

Die Nacht- und Wochenendabsenkung tritt damit täglich von 20:30 bis 7:30 Uhr sowie das gesamte Wochenende in Kraft.

A-8.2.3 Anforderungen an das Raumklima

Die Sollwerte der Raumtemperatur zeigt Tab. 8-4. Die Temperaturen entsprechen dabei nicht den Auslegungsbedingungen, sondern üblichen Raumtemperaturen während der Nutzung. Für die Büros orientieren sich die Sollwerte der Heizung an den Behaglichkeitsgrenzen der DIN 1946 Teil 2.

Am Wochenende und außerhalb der Betriebszeit wird eine Mindesttemperatur von 15°C sichergestellt.

Zonen	Wochentag während der Betriebszeit [°C]	Wochenende ausserhalb der Betriebszeit [°C]
Büros	22	15
Flur	20	15
Nebenräume	20	15

Tab. 8-4: Minimale Raumlufftemperaturen im Passiv-Bürogebäude

Die Raumlufftfeuchte in den Büros wird nicht begrenzt. Beeinflusst wird sie jedoch durch die Feuchterückgewinnung, die über den Rotationswärmetauscher realisiert wird.

A-8.2.4 Interne Wärmequellen

Die Energiebilanz des Gebäudes wird durch die Abwärme von Personen, Beleuchtung und Arbeitshilfen maßgeblich beeinflusst. Für die Simulation des thermischen Verhaltens muss deswegen die Höhe sowie das zeitliche Profil der internen Wärmequellen sinnvoll definiert werden. Die internen Wärmequellen schwanken in der Praxis stark. Dies ist zum einen in den unterschiedlichen Nutzungsanforderungen, zum anderen in der unterschiedlichen Effizienz der eingesetzten Technik begründet. Als Grundlage für die nachfolgende Definition der internen Wärmequellen wird ein Büroarbeitsplatz je 15 m² Bürofläche angenommen.

Die stündlichen Werte der internen Wärmequellen werden bestimmt, indem die maximalen Wärmeströme der einzelnen Verbrauchergruppen berechnet und in ein Tagesprofil umgesetzt werden. Die Tagesprofile berücksichtigen nutzungsspezifische Eigenschaften und die aus empirischen Untersuchungen gewonnenen Vollbetriebszeitfaktoren.

A-8.2.4.1 Maximaler Abwärmestrom von Personen, Beleuchtung und Arbeitshilfen

- **Personen**

Personen führen dem Gebäude, abhängig von ihrem Aktivitätsgrad und der Raumtemperatur, einen sensiblen und einen latenten Wärmestrom zu. Für die Wärmeabgabe der Personen wird nach VDI 2078 für den Aktivitätsgrad II und eine mittlere Raumlufthtemperatur von 23°C eine sensibler Wärmestrom von 85 W pro Person und ein latenter von 35 W pro Person angenommen. Die Personenbelegungsdichte beträgt 15 m² Bürofläche pro Person.

- **Beleuchtungsanlage**

Die Büros sind im Passiv-Bürogebäude mit einer effizienten Beleuchtungsanlage ausgerüstet, bestehend aus Leuchtstofflampen in Stabform in hochglanz-eloxierten Spiegelrasterleuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten.

Die Büros werden je nach Sehaufgabe mit unterschiedlichen Beleuchtungsstärken ausgeleuchtet. Die Deckenleuchten stellen dabei eine Grundausleuchtung des Raumes mit 220 Lux sicher. Die erforderliche Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 500 Lux wird durch individuell zu bedienende Arbeitsplatzleuchten erreicht (bezogen auf die gesamte Bürofläche entspricht dies einer zusätzlichen Beleuchtungsstärke von 30 Lux; siehe Tab. 8-6). Diese Art der Beleuchtung ist besonders für Bildschirmarbeitsplätze geeignet. Ein solches Beleuchtungskonzept geht konform mit den Vorgaben des europäischen Normentwurfs E-DIN 5035-2; 1996-06, der die Beleuchtungsstärke von 500 Lux (Büroarbeitsplätze) nur auf der Arbeitsfläche, nicht aber im gesamten Raum fordert.

Eine Steuerung schaltet die Beleuchtung aus, wenn die Nennbeleuchtungsstärke durch Tageslicht überschritten wird.

Zur Bestimmung des Strombedarfs der Beleuchtung muss neben dem Leuchtenwirkungsgrad der Raumwirkungsgrad bestimmt werden. Hierzu wird der Berechnungsansatz aus [LEE 1995]

verwendet. Angenommen werden dabei folgende Reflexionsgrade für die Raumumschließungsflächen [LEE 1995].

Decke	70 %
Wand	50 %
Boden	10 %

Tab. 8-5: Reflexionsgrade der Oberflächen in den Büros des Passiv-Bürogebäudes

Bei der angenommenen Raumgeometrie liegt der Raumindex bei 1,2. Im Fall einer rein direkten Beleuchtung berechnet sich der Raumwirkungsgrad zu 65 %. Bei Verwendung der oben genannten Leuchten ergibt sich unter diesen Randbedingungen eine maximale Wärmeabgabe der Beleuchtung von $6,2 \text{ W/m}^2_{\text{HNF}}$.

Der Vollbetriebszeitfaktor wird entsprechend [LEE 1995] mit 0,27 angenommen (siehe Abschnitte A-8.2.4.2). Unter der Annahme einer jährlichen Nutzungszeit von 2750 Stunden berechnen sich hieraus Volllaststunden (Einschaltzeiten) für die Beleuchtung von 740 Stunden pro Jahr.

Die wichtigsten Kenngrößen des Beleuchtungssystems sind in Tab. 8-6 zusammengestellt.

Passiv-Bürogebäude	
Beleuchtungsstärke in Lux	220 + 30 = 250
Raumindex	1,2
Raumwirkungsgrad	0,65
Leuchtenwirkungsgrad	0,9
Leistung Lampe/Vorschaltgerät in Watt	58 / 4,5
maximale Anschlussleistung in $\text{W/m}^2_{\text{HNF}}$	6,2
Beleuchtungssteuerung	automatisch aus
Vollbetriebszeitfaktor	0,27
Volllaststunden in h/a	740

Tab. 8-6: Kenndaten des Beleuchtungssystems im Passiv-Bürogebäude

- **Arbeitshilfen**

Büros sind je nach Nutzungsanforderung mit Arbeitshilfen ausgestattet. Für die Simulationsrechnungen wird angenommen, dass jeder Person

- 1 PC mit Bildschirm,
- 1/10 Laserdrucker,
- 1/10 Kopierer sowie
- 1/10 Fax

zur Verfügung stehen.

Die Einzelgeräte weisen eine sehr hohe energetische Effizienz auf. Die angenommenen Stromverbräuche von Laserdrucker, Kopierer und Fax betragen 75 % der für das Jahr 1998 definierten Grenzwerte der Gemeinschaft Energielabel Deutschland GED [GED 1998]. Die GED legt jedes Jahr Grenzwerte für stromsparende Geräte fest. Diese sind so definiert, dass sie von ca. 25 % aller auf dem Markt verfügbaren Geräte erfüllt werden. Die hier angenommene Unterschreitung des Grenzwertes kann entweder durch eine geringere Maximalleistung oder durch einen geringeren Wert der Volllaststunden erreicht werden.

Als Computer kommen Notebooks zum Einsatz. Diese haben aufgrund ihres LCD-Bildschirmes und der verwendeten Rechnerkomponenten einen geringen Stromverbrauch.

	Betrieb Watt	Standby Watt	Aus Watt
Computer: Notebooks	30	5	0
Kopierer (25 Seiten pro Min)		72	5
Drucker (Laser)		12	3
Fax		3	

Tab. 8-7: Maximale Leistungsaufnahme der Arbeitshilfen im Passiv-Bürogebäude

A-8.2.4.2 Vollbetriebszeitfaktoren der internen Wärmequellen

Die maximale Leistung wird nicht während der gesamten Nutzungszeit benötigt. Ein Maß zur Beschreibung der über die Nutzungszeit gemittelten Leistung ist der Vollbetriebszeitfaktor. Er wird empirisch ermittelt, indem der reale Stromverbrauch auf den maximal möglichen Stromverbrauch bezogen wird. Aus dem Vollbetriebszeitfaktor können bei gegebener jährlicher Nutzungszeit die Volllaststunden bestimmt werden. Die in der Simulation zugrunde gelegten Vollbetriebszeitfaktoren bzw. Volllaststunden lehnen sich an die in [Ravel: Interne Wärmelasten von Büroräumen] empirisch ermittelten Werte an.

Die maximale Leistung sowie die Vollbetriebszeitfaktoren und Volllaststunden sind für den Fall der Büronutzung in Tab. 8-8 aufgeführt.

	Maximaler Wärmestrom [W/m ² _{HNF}]	Vollbetriebszeitfaktor nach RAVEL	Vollbetriebszeitfaktor Passiv-Bürogeb.	Volllaststunden pro Jahr h/a	mittlerer Wärmestrom [W/m ² _{HNF}]
Personen	5,6	0,7 - 0,9	0,8	2200	4,5
Beleuchtung	6,2	0,1 - 0,7	0,27	740	1,7
Arbeitshilfen	2,6	0,25 - 0,85	0,4	1100	1,0
Summe	14,4				7,2

Tab. 8-8: Wärmestrom durch interne Wärmequellen in den Büros des Passiv-Bürogebäudes

Der Vollbetriebszeitfaktor der Beleuchtung ist u. a. abhängig von der Qualität der Tageslichtausleuchtung der Büros. Diese kann über den Tageslichtquotienten beschrieben werden. Für den untersuchten Standardbüroraum berechnet sich nach DIN 5034 Teil 3 der Tageslichtquotient in 1,25 m Abstand vom Fenster und einer Höhe von 0,85 m zu $D_T = 4,3$.

Der in Tab. 8-8 berücksichtigte Vollbetriebszeitfaktor der Beleuchtung entspricht dem in [LEE, 1995] angegebenen Wert für einen Tageslichtquotienten von $D_T = 4,3$ und einer tageslichtabhängig gesteuerten Beleuchtungsanlage. Die Steuerung schaltet die Beleuchtung ab, wenn am Kontrollpunkt die Normbeleuchtungsstärke überschritten wird. Zur Berechnung des Tageslichtangebots am Arbeitsplatz wird in [LEE, 1995] nur die diffuse Strahlung berücksichtigt.

Die saisonalen Unterschiede in den Einschaltzeiten der Beleuchtung werden bei der Definition der Tagesgänge berücksichtigt. Im Sommer wird ein Vollbetriebszeitfaktor von 0,09, im Winter von 0,48 angesetzt.

A-8.2.4.3 Tagesprofile der internen Wärmequellen

Der Abwärmestrom von Beleuchtung, Arbeitshilfen und Personen weist einen über den Tag schwankenden Verlauf auf. Die in der Simulation verwendeten Tagesprofile sind so gewählt, dass übliche Nutzungsbedingungen sowie die in Tab. 8-8 aufgeführten Vollbetriebszeitfaktoren abgebildet werden. Da die Einschaltdauer der Beleuchtung jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist, werden gesonderte Profile für Sommer, Übergangsjahreszeit und Winter erstellt. Die in der Simulation angenommenen Tagesprofile zeigen Abb. 8-2 bis Abb. 8-4.

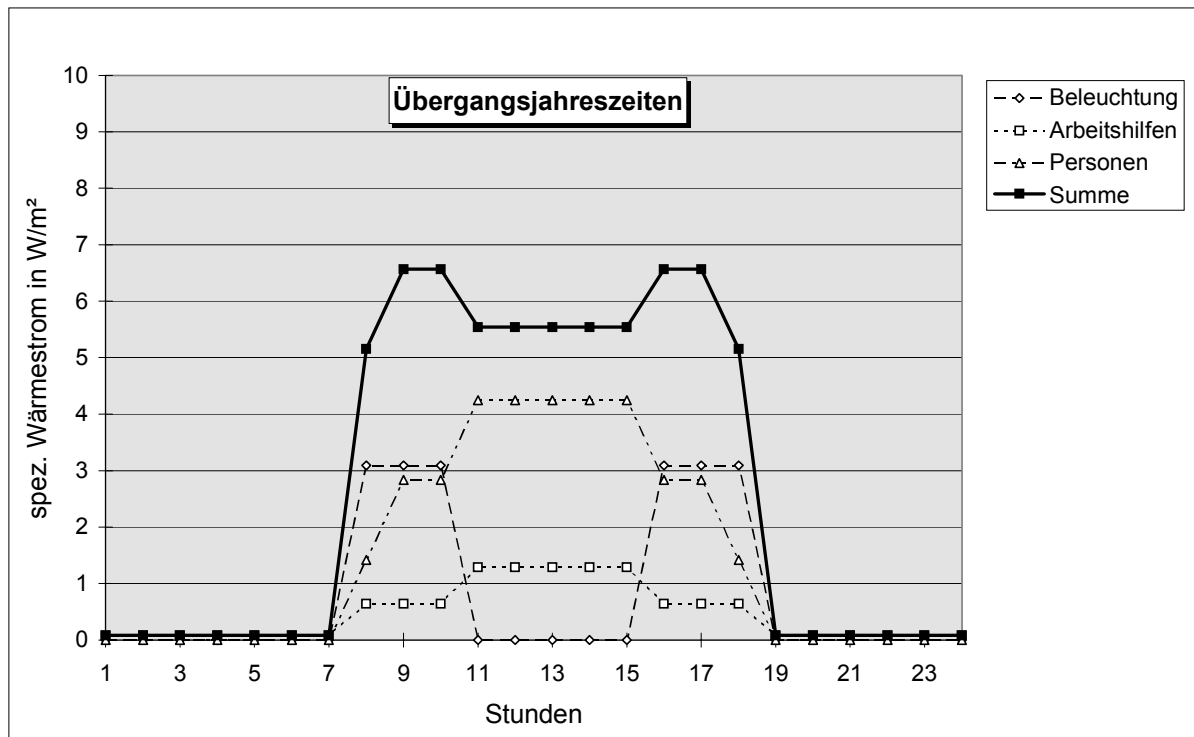


Abb. 8-2: Tagesprofil des Wärmestroms der internen Wärmequellen in den Büros des Passiv-Bürogebäudes während den Übergangsjahreszeiten

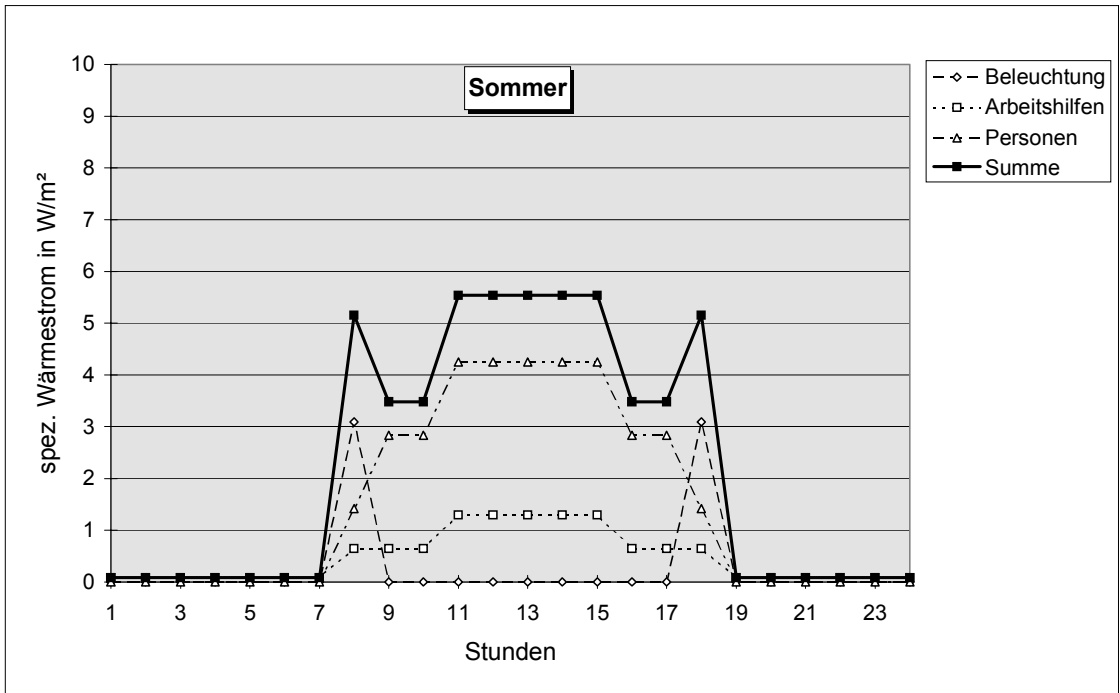


Abb. 8-3: Tagesprofil des Wärmestroms der internen Wärmequellen in den Büros des Passiv-Bürogebäudes im Sommer

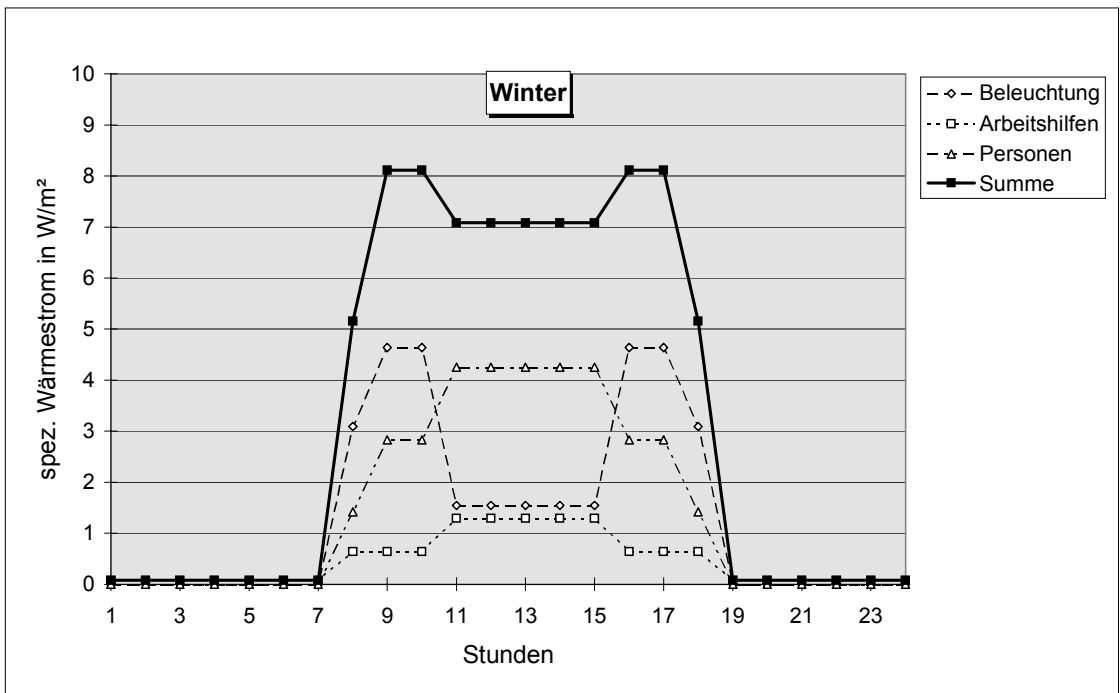


Abb. 8-4: Tagesprofil des Wärmestroms durch internen Wärmequellen in den Büros des Passiv-Bürogebäudes im Winter

Den Profilen liegt die folgende Argumentation zugrunde.

Beleuchtung

Im Sommer wird kein ausgeprägter Tagesgang bei der Beleuchtungsnutzung angenommen, da Sonnenauf- und -untergang weit außerhalb der Nutzungszeit liegen. Nur in der ersten und letzten Stunde der Nutzungszeit wird die Beleuchtung aufgrund der langsam abnehmenden Helligkeit vermehrt eingeschaltet. In den Übergangsjahreszeiten und im Winter wird die Morgen- und Abendspitze ausgeprägter und dauert länger an. Oft werden vor allem blendfreie Leuchten bei ausreichendem Tageslicht nicht ausgeschaltet, da sie unauffällig sind und so vergessen werden. Dieses Problem existiert hier nicht, da das Abschalten über die Beleuchtungssteuerung realisiert wird. Allerdings wird die Betriebszeit deutlich von dem Grenzwert beeinflusst, ab dem die Beleuchtung abgeschaltet wird.

Arbeitshilfen

Der maximale Abwärmestrom der Arbeitshilfen wird durch die in allen Geräten vorhandene Sparschaltung erheblich reduziert. Nicht alle Geräte sind von Tagesbeginn an eingeschaltet bzw. werden gegen Ende der Nutzungszeit, entsprechend der Abwesenheit der Personen, ausgeschaltet.

Es wird angenommen, dass die Arbeitshilfen über Nacht vollständig ausgeschaltet werden. Zum Teil weisen sie jedoch auch im ausgeschalteten Zustand noch einen geringen Stromverbrauch auf. Für den Stromverbrauch im ausgeschalteten Zustand werden bei Kopierer, Drucker und Fax die entsprechenden [GED]-Grenzwerte von 1998 angesetzt. Für die Computer (Notebooks) wird angenommen, dass sie im ausgeschalteten Zustand keinen Stromverbrauch haben. In Tab. 8-9 sind die entsprechenden Werte zusammengestellt. Ist ein Ausschalten außerhalb der Nutzungszeit aus Gründen der Vernetzung nicht möglich, ergeben sich entsprechend höhere Stromverbräuche, die dann in der Simulation zu berücksichtigen wären.

	max. Stromverbrauch im ausgeschalteten Zustand
PC (Notebooks)	0 Watt
Kopierer	5 Watt
Drucker	3 Watt
Faxgerät (läuft durch)	3 Watt

Tab. 8-9: Stromverbrauch der ausgeschalteten Arbeitshilfen im Passiv-Bürogebäude

Personen

Das Tagesprofil der Personenabwärme berücksichtigt, dass aufgrund der Gleitzeitmöglichkeit zu Beginn und am Ende der Nutzungszeit nicht alle Mitarbeiter anwesend sind. Der Gleichzeitigkeitsfaktor in der Kernarbeitszeit beträgt 75 %, d. h. einer der beiden Mitarbeiter ist im Mittel pro Stunde 30 Minuten nicht in dem Büro. In diesem Gleichzeitigkeitsfaktor ist auch die Mittagspause enthalten, die somit nicht extra modelliert wird.

A-8.2.4.4 Interne Wärmequellen auf Flur und Nebennutzflächen

Auf den Verkehrs- und Nebennutzflächen sind keine Arbeitshilfen wie Drucker oder Kopierer vorhanden. Die Aufenthaltszeit der Personen ist so gering, dass keine nennenswerter Abwärmestrom in der Simulation angesetzt wird. Berücksichtigt wird in diesem Bereich nur die Abwärme der Beleuchtungsanlage. Die maximale Beleuchtungsstärke beträgt 50 Lux. Dies entspricht bei dem für die Büros definierten energiesparenden Beleuchtungssystem einem maximalen Wärmestrom von $1,7 \text{ W/m}^2_{\text{HNF}}$.

Der Vollbetriebszeitfaktor des fensterlosen Flurs wird mit 1 angenommen. In den mit Fenstern versehenen Nebenräumen werden die stündlichen Werte der Beleuchtungsabwärme entsprechend den für die Büros definierten Tagesprofilen angenommen. Ausgehend von dem maximalen Wärmestrom von $1,7 \text{ W/m}^2$ berechnet sich der in Abb. 8-5 dargestellte stündliche Verlauf.

Außerhalb der Nutzungszeit treten in Flur, Treppenhaus und Keller keine interne Wärmeströme auf.

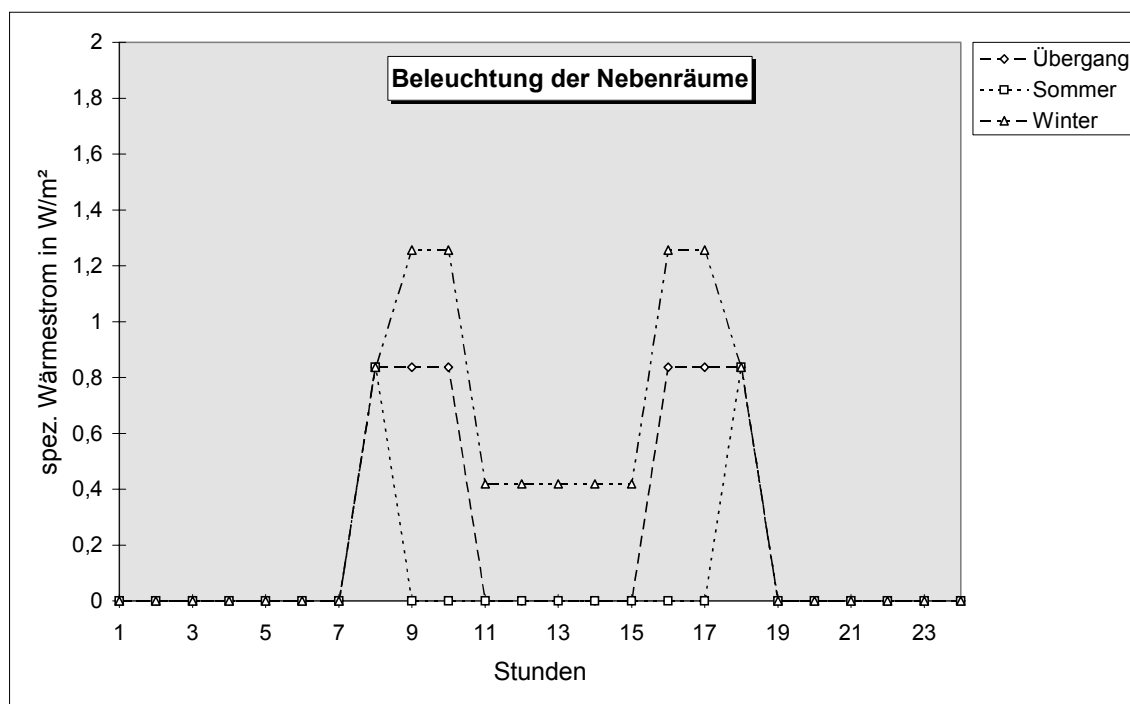


Abb. 8-5: Tagesprofil des Wärmestroms durch Beleuchtung in den Nebenräumen des Passiv-Bürogebäudes

A-8.2.5 Zuordnung der Tagesprofile zu den Tagen des Jahres

Die in den Abschnitten 8.2.4.3 und 8.2.4.4 definierten Tagesprofile werden in der Simulation über einen Jahreskalender den einzelnen Tagen des Jahres zugeordnet. Jedes Tagesprofil wird als Tagestyp bezeichnet. Wie oben beschrieben, sind die Tagestypen Sommer, Winter und Übergangsjahreszeit definiert. Da die Umstellung auf Sommerzeit in der Simulation berücksichtigt wird, müssen zwei Tagestypen für die Übergangsjahreszeit implementiert werden, die sich jedoch nur durch einen einstündigen Versatz unterscheiden. Im Einzelnen ergibt sich für die Tagestypen folgende zeitliche Zuordnung.

Winter	vom 1. November bis 31. Januar
Übergang_winter	vom 1. Februar bis 31. März
Übergang_sommer	vom 1. April bis 30. April
Sommer	vom 1. Mai bis 31. Juli
Übergang_sommer	vom 1. August bis 30. September
Übergang_winter	vom 1. Oktober bis 31. Oktober

Tab. 8-10: Zeitliche Zuordnung der Tagestypen

Wochenenden und Urlaubstage werden über einen gesonderten Tagestyp „Wochenende“ modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Arbeitshilfen in dieser Zeit vollständig abgeschaltet sind. In der Simulation wird entsprechend der Wärmestrom im abgeschalteten Zustand berücksichtigt (Tab. 8-9).

A-8.2.6 Klima

Die Simulationsrechnungen werden mit dem Testreferenzjahr TRY 6 (Frankfurt am Main) durchgeführt. Die Testreferenzjahre sind speziell für die Gebäude- und Anlagensimulation entwickelt. Sie bestehen aus stündlichen Werten, über die charakteristische Klimaverläufe für unterschiedliche Regionen in Deutschland beschrieben werden. Das Programm TAS verwendet für die Simulationsrechnungen folgende Größen:

- Lufttemperatur
- relative Feuchte
- Globalstrahlung
- Diffusstrahlung
- Bewölkungsgrad
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung.

A-8.3 Passiv-Bürogebäude / HLK-Anlage

A-8.3.1 Gesamtkonzept der HLK-Anlage

Das Passiv-Bürogebäude ist mit einer Lüftungsanlage ausgerüstet, über die ein variabler Volumenstrom gefördert werden kann. Bei Bedarf kann während der Betriebszeit eine freie Kühlung oder in der Nacht eine Nachtlüftung realisiert werden. Hierdurch wird versucht, die Raumluft in den in Abschnitt A-8.2.3 genannten Behaglichkeitsgrenzen der DIN 1946 zu halten.

Ergänzt wird die Lüftungsanlage durch einen hocheffizienten Rotationswärmetauscher zur Wärme- und Feuchterückgewinnung und einen Erdreichwärmetauscher (EWT). Die Räume werden über Plattenheizkörper beheizt.

Da die Kühllasten zwischen den Nord- und Südbüros stark schwanken, ist in den Simulationsrechnungen für jede Fassadenseite eine eigene Anlage vorgesehen. Aus systematischen Gründen werden die Flure und Nebenräume ebenfalls über eine gesonderte Anlage mit Außenluft versorgt.

Ein schematische Darstellung der Heizungs- und RLT-Anlage des Passiv-Bürogebäudes zeigt Abb. 8-6.

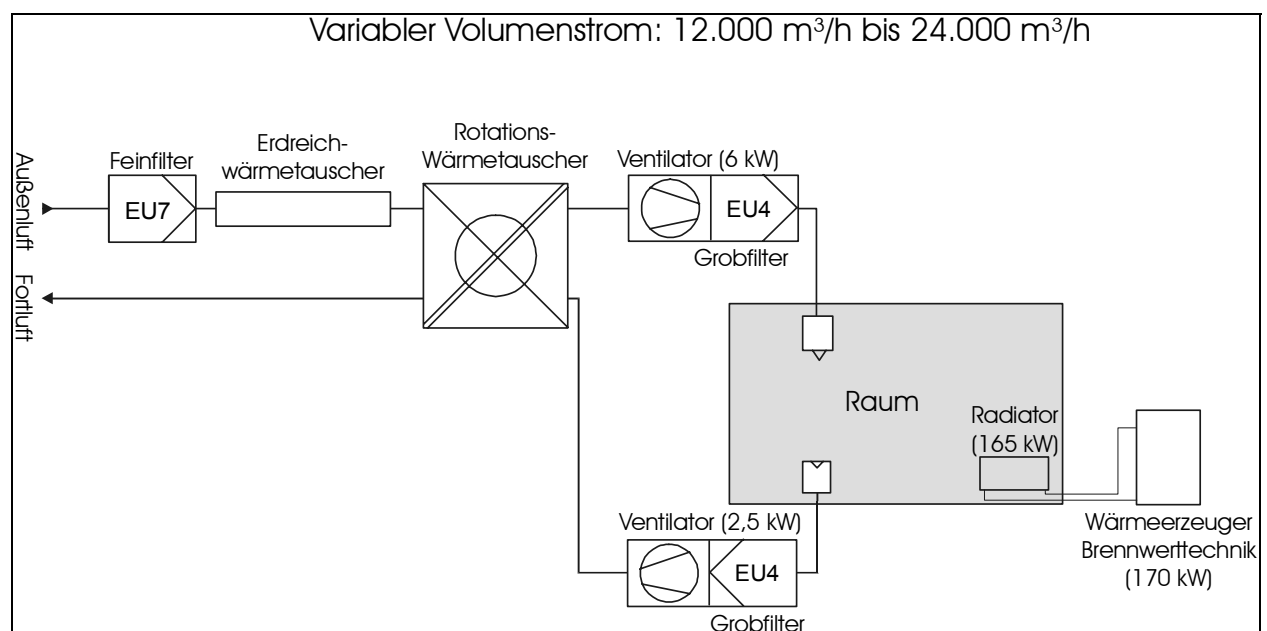


Abb. 8-6: Schematische Darstellung der Heizungs- und RLT-Anlage des Passiv-Bürogebäudes

A-8.3.2 Heizungsanlage

Die Beheizung des Gebäudes geschieht über statische Heizflächen (Plattenheizkörper) in den einzelnen Räumen. Die Sollwerte der Raumtemperatur sind in Tab. 8-4 dokumentiert. Es wird eine ideale Regelung angenommen, d. h. es tritt im Heizfall keine Sollwertabweichung auf.

Als Heizflächen kommen Plattenheizkörper mit innen liegendem Konvektionsblech zum Einsatz. Der Strahlungsanteil bei der Wärmeübertragung beträgt nach [Recknagel 94/95] 28 %. Dieser Wert wird in der thermischen Simulation berücksichtigt.

Als Wärmeerzeuger ist ein Gas-Brennwertkessel vorgesehen. Der Teillastnutzungsgrad (nach DIN 4702 Teil 8) unterschiedlicher Kesseltypen ist in Abb. 8-7 dargestellt. Für das Passiv-Bürogebäude wird in der Simulation das Teillastverhalten des Brennwertkessels angenommen. Die Stillstandsverluste sind analog zur VDI 2067 mit 0,5 % der maximalen Kesselleistung quantifiziert. Der Verteilungswirkungsgrad des Heizungs- und Warmwassernetzes beträgt entsprechend den Angaben aus [LEG 1995] 92 %. Eine Abschaltung des Kessels in dem Fall, dass keine Wärme vom Gebäude angefordert wird, geschieht nicht.

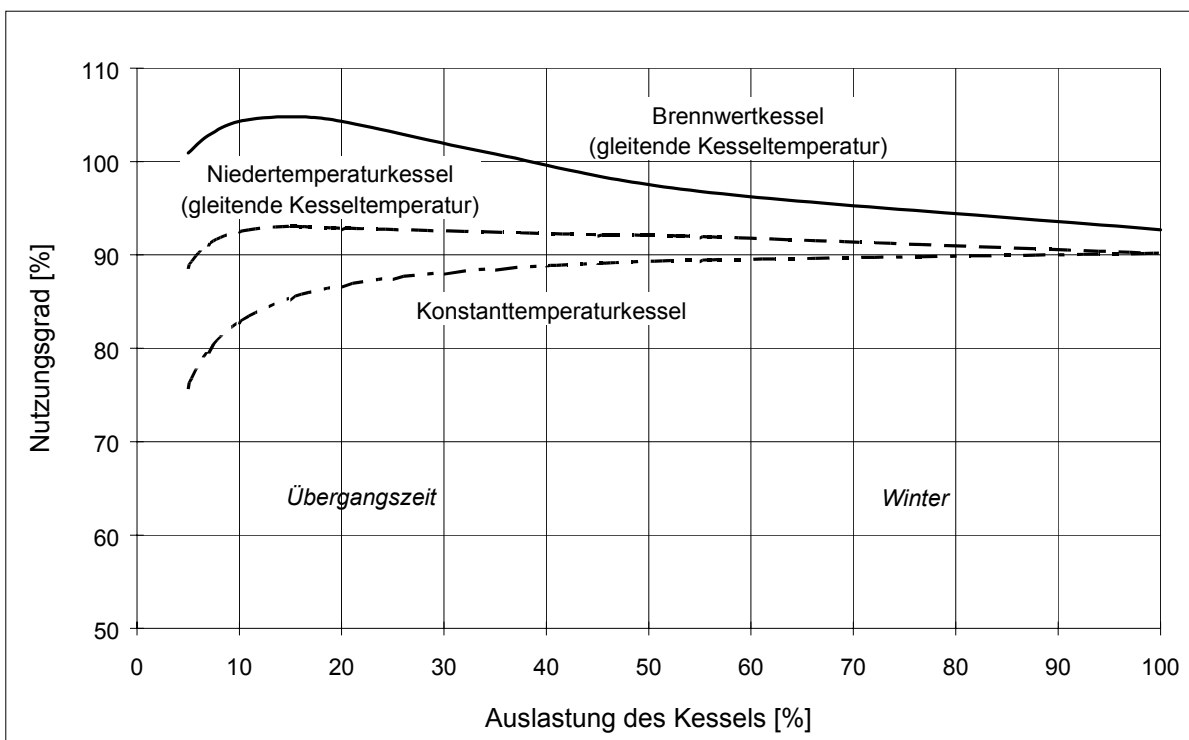


Abb. 8-7: Teillastnutzungsgrade unterschiedlicher Heizkessel

A-8.3.3 Lüftungsanlage

A-8.3.3.1 Luftwechsel

Die Lüftungsanlage fördert in der Regel den hygienisch erforderlichen Mindestaußenluftwechsel. Dieser entspricht im vorliegenden Fall dem flächenbezogenen Mindestaußenluftstrom nach der DIN 1946 Teil 2 von $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Unter Berücksichtigung der lichten Geschosshöhe von 3 Metern berechnet sich damit ein Luftwechsel in den Büros von $1,3 \text{ h}^{-1}$. Bezogen auf die 1200 m^2 Bürofläche je Fassadenseite ergibt sich eine zu fördernde Mindestaußenluftmenge je Fassadenseite von $4.800 \text{ m}^3/\text{h}$.

Um Zugerscheinungen zu vermeiden, liegt die Zulufttemperatur in den Büros im Winter aber auch im Kühlfall um nicht mehr als 8 Kelvin unter der Raumlufthtemperatur. Müssen höhere Kühllasten im Sommer abgeführt werden, kann der Volumenstrom bis zu einem 3-fachen Luftwechsel angehoben werden ($12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ je Fassadenseite). Bei vorgegebener maximaler Luftgeschwindigkeit in den Kanälen macht dies im Vergleich zu den Konstantvolumenstromanlagen des Standard-Bürogebäudes eine größere Dimensionierung der Lüftungstechnischen Komponenten erforderlich.

In der Zeit vom 1. April bis zum 30. September kann in allen Räumen eine Nachtlüftung realisiert werden. Durch die Nachtlüftung werden die Speichermassen außerhalb der Nutzungszeit abgekühlt. So können Temperaturspitzen in der Nutzungszeit abgepuffert werden. Der mögliche Volumenstrom für die Nachtlüftung entspricht dem Maximalvolumenstrom. Gelüftet werden kann an vier Stunden in der Nacht von 1:30 bis 5:30 Uhr. Um den Stromverbrauch der Ventilatoren für die Nachtlüftung gering zu halten, wird die Nachtlüftung von der Regelung nur freigegeben, wenn die Außenlufttemperatur um mindestens 5 K unter der Raumtemperatur liegt. Beendet wird die Nachtlüftung, wenn die Raumlufthtemperatur auf $22,5^\circ\text{C}$ gesunken ist. Die Definition des Sollwertes über 22°C gewährleistet, dass kein zusätzlicher Heizwärmebedarf über die Nachtlüftung erzeugt wird.

In Fluren und Nebenräumen wird ein konstanter Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ realisiert.

In allen Zonen addiert sich zu dem mechanisch erzeugten Luftwechsel ein Luftwechsel über Fugenundichtigkeiten, der sich nach dem Standard des Baukörper richtet. Für das Passiv-Bürogebäude beträgt er $0,05 \text{ h}^{-1}$. In Tab. 8-11 sind die in der Simulation realisierten Luftwechsel für das Passiv-Bürogebäude zusammengefasst.

Nutzungszone	Lüftungsanlage h^{-1}	Undichtigkeiten h^{-1}	Luftwechsel gesamt h^{-1}
Büro	1,33	0,05	1,38
Flur	0,4	0,05	0,45
Nebenräume	0,4	0,05	0,45

Tab. 8-11: Luftwechsel während der Betriebszeit im Passiv-Bürogebäude

A-8.3.3.2 Wärme- und Feuchterückgewinnung

Die Wärme- und Feuchterückgewinnung wird über einen Rotationswärmetauscher realisiert. Der Wärmebereitstellungsgrad beträgt 75 %, der Feuchtwirkungsgrad wird mit 70 % angenommen.

Die Temperaturerhöhung des Luftstroms durch die Zu- und Abluftventilatoren wird in dem Simulationsprogramm gesondert gerechnet, ist also im Wärmebereitstellungsgrad nicht enthalten. Die Wärmerückgewinnung ist so geregelt, dass auf der Zuluftseite eine Austrittstemperatur von 18°C gehalten wird. Im Sommer wird über die Wärmerückgewinnung eine Kälterückgewinnung realisiert.

A-8.3.3.3 Ventilatoren und Druckverlust

Als Ventilatoren kommen Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln zum Einsatz. Die Elektromotoren der Ventilatoren befinden sich nicht im Luftstrom. Die Abwärme wird somit nicht zum Heizen verwendet, erhöht aber auch nicht die Raumlufttemperaturen im Sommer.

Für den Ventilator wird ein Wirkungsgrad von 82 % [Recknagel 94/95], für den Elektromotor ein Wirkungsgrad von 80 % angenommen. Der Elektromotor wird von der Regelung abgeschaltet, wenn keine Luft gefördert werden muss.

Zur Bestimmung der Gesamtdruckdifferenzen der Ventilatoren werden die Druckverluste des Zu- und Abluftkanalnetzes abgeschätzt. Hierzu wird eine Skizze der Lüftungsanlage entworfen und für den längsten Strang der maximale Druckverlust ermittelt. Berücksichtigt sind die Reibungsverluste an den Rohrwänden und der Druckverlust durch Einbauten sowie Apparate.

Das Druckgefälle der Lüftungskanäle ist [Recknagel 94/95] entnommen. Hierbei wurden Blechkanäle mit einer Rauigkeit $\varepsilon = 0,15$ mm unterstellt. Die Einbauten werden mit folgenden Strömungswiderständen berücksichtigt:

Ventilator	50 Pa	Erfahrungswert [EJO]
Wärmerückgewinnung	100 Pa je Seite	[SIA 380/4, 1992]
Grobstaubfilter (Zuluft, Abluft)	130 Pa	[SIA 380/4, 1992]
Feinstaubfilter (Zuluft)	150 Pa	[SIA 380/4, 1992]
Drall-Deckenauslass:	100 Pa	[SIA 380/4, 1992]
Wetterschutz	$\zeta = 1$	[Recknagel 94/95]
Erdreichwärmetauscher	400 Pa	3-facher Luftwechsel.

Für die Druckdifferenzen der Ventilatoren errechnen sich unter diesen Randbedingungen damit folgende Größen:

- Gesamtdruckdifferenz bei 3-fachem Luftwechsel (Zuluft): 1 170 Pa
- Gesamtdruckdifferenz bei 3-fachem Luftwechsel (Abluft): 440 Pa.

A-8.3.4 Modell des Erdreichwärmetauschers

Die Außenluft wird über ein in der Erde verlegtes Rohr, einen so genannten Erdreichwärmetauscher (EWT), angesaugt. Auf diese Weise kann die Luft im Winter durch das Erdreich vorerwärmt, im Sommer vorgekühlt werden. Eine Skizze des eingesetzten EWT zeigt Abb. 8-8.

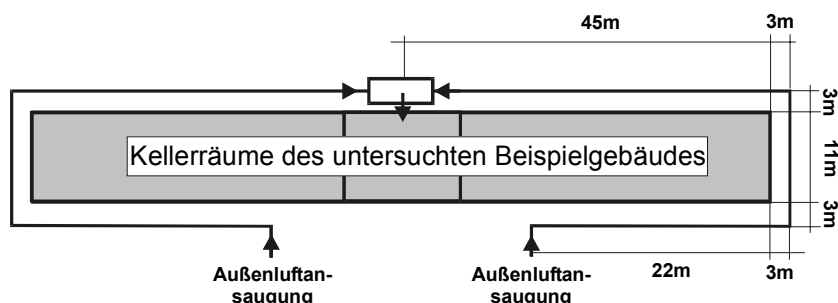


Abb. 8-8: Skizze des Erdreichwärmetauschers

Es wird angenommen, dass der EWT aus 2 Rohren mit einer Länge von je 90 Metern und einem Durchmesser von 0,8 Meter besteht. Die Erdrohre werden in der Baugrube in 3 Metern Tiefe und einem Abstand zur Kelleraußenwand von ebenfalls 3 Metern verlegt. Die Rauigkeit der Rohroberfläche ist mit 3 mm angenommen.

Die beiden Rohre sind parallel geschaltet, so dass im üblichen Betriebsfall durch jedes Rohr ein Volumenstrom von 4.800 m³/h (hygienischer Außenluftwechsel) strömt.

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient an der Rohroberfläche wird für diesen Volumenstrom mit den in [Knissel 1999-2] dargestellten Ansätzen zu 19,6 W/(m²K) berechnet. In diesem Wert ist die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund der Rohrrauigkeit bereits berücksichtigt.

Zur Abbildung des EWT im Simulationsmodell wird die Konzentrationsfaktor-Methode verwendet. In [Knissel 1999-2] wird gezeigt, dass diese das Betriebsverhalten von EWT recht gut abbildet. Der um das Erdrohr herum genauer modellierte Nahbereich hat im vorliegenden Fall Abmaße von 6 m x 6 m. Bezogen auf die geförderte Luftmenge steht eine Erdreichmasse von ca. 1500 kg pro m³ pro h im so genannten Nahbereich zur Verfügung. Dies entspricht in etwa der Hälfte des in [Knissel 1999-2] abgebildeten Systems.

Als Erdreich wird ein sandiger Boden angenommen. Wie die Sensitivitätsanalyse in [Knissel 1999-2] zeigt, stellt dies bezüglich des Betriebsverhaltens des Erdreichwärmetauschers im Vergleich zu einem feuchten, tonigen Boden die ungünstigere Randbedingung dar. Die Stoffwerte werden für einen mittleren Feuchtegehalt von 10 Vol. % bestimmt. Entsprechend den Angaben in [VDI-Wärmeatlas] gilt für sandigen Boden:

- Wärmeleitfähigkeit: 1,1 W/(mK)
- Dichte: 1700 kg/m³
- spezifische Wärmekapazität: 1000 J/(kgK).

A-8.4 Standard-Bürogebäude / Baukörper

A-8.4.1 Geometrie

Wie in Abschnitt A-8.1.1 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.4.2 Materialaufbau der Bauteile

Der thermische Standard der Außenbauteile entspricht den Anforderungen der seit 1995 gültigen Wärmeschutzverordnung. Die Dämmstoffdicken und U-Werte der einzelnen Bauteile sind in Tab. 8-12 definiert. Mit Ausnahme der Dämmstoffdicken entsprechen die Bauteile den in Abschnitt A-8.1.2 dargestellten Konstruktionen.

	Dämmstoffdicke cm	U-Wert W/(m ² K)
Außenwand	6	0,54
Dach	12	0,3
Kellerdecke	4	0,64
Fenster	g_{\perp} (Verglasung) = 0,63	1,8

Tab. 8-12: Dämmstoffdicken und U-Werte der Außenbauteile für das Standard-Bürogebäude

Der g-Wert der Verglasung bei senkrechtem Strahlungseinfall beträgt $g_{\perp}=0,63$. Noch nicht berücksichtigt ist dabei der Rahmenanteil von 30 % sowie der Korrekturfaktor für die Verschmutzung von 0,9 und für die Verschattung von 0,84.

Im Bereich der Geschosdecken wird abweichend zum Passiv-Bürogebäude eine abgehängte Decke angenommen. Dadurch reduziert sich die dem Raum zur Verfügung stehende thermische Speichermasse.

A-8.4.3 Sonnenschutz

Wie in Abschnitt A-8.1.3 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.4.4 Luftdichtheit der Gebäudehülle

Es wird angenommen, dass die Gebäudehülle ohne besondere Sorgfalt im Bereich der Dichtheit ausgeführt ist. Der Luftwechsel über Fugen und Undichtigkeiten wird mit einem üblichen Wert von 0,2 pro Stunde angenommen. Dieser Wert ergibt sich nach dem in der EN 832 angegebenen Berechnungsverfahren für ein Gebäude, das bei der Blower-Door-Messung (Unterdruck von 50 Pa) einen Luftwechsel von etwa $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$ aufweist.

A-8.5 Standard-Bürogebäude / Nutzung

A-8.5.1 Nutzungszonen

Wie in Abschnitt A-8.2.1 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.5.2 Nutzungszeit und Betriebszeit

Wie in Abschnitt A-8.2.2 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.5.3 Anforderungen an das Raumklima

Die Sollwerte der Raumtemperatur zeigt Tab. 8-13. Die Temperaturen entsprechen dabei nicht den Auslegungsbedingungen, sondern üblichen Raumtemperaturen während der Nutzung. Für die Büros orientieren sich die Sollwerte für Heizen und Kühlen an den Behaglichkeitsgrenzen der DIN 1946 Teil 2.

Am Wochenende und außerhalb der Betriebszeit wird eine Mindesttemperatur von 15°C sichergestellt.

Zonen	Wochentag während der Betriebszeit [°C]	Wochenende außerhalb der Betriebszeit [°C]
Büros	22/26	15
Flur	20	15
Nebenräume	20	15

Tab. 8-13: Minimale/maximale Raumlufthtemperaturen im Standard-Bürogebäude

Die Raumlufffeuchte in den Büros entspricht ebenfalls den in der DIN 1946 Teil 2 vorgegebenen Grenzwerten:

- Minimum: 30 % relative Luftfeuchte
- Maximum: 11,5 g/kg absolute Luftfeuchte.

A-8.5.4 Interne Wärmequellen

A-8.5.4.1 Beleuchtung

Die Büros sind in dem Standard-Bürogebäude mit einem kostengünstigen, aber nicht energieeffizienten Beleuchtungssystem, ausgerüstet (siehe Seminarband "Besseres Licht mit weniger Strom" [IPH 1998]). Eingesetzt sind 18 Watt Leuchtstofflampen in Stabform mit konventionellem Vorschaltgerät. Der Leuchtenwirkungsgrad beträgt 71 %.

Es wird eine Normbeleuchtungsstärke von 500 Lux auf der gesamten Bürofläche angesetzt. Eine Beleuchtungssteuerung ist nicht vorgesehen. Bei Einsatz eines derartigen Beleuchtungssystems ergibt sich ein maximaler Abwärmestrom der Beleuchtung von $27 \text{ W/m}^2_{\text{HNF}}$. Da keine Beleuchtungssteuerung vorgesehen ist, wird der Vollbetriebszeitfaktor entsprechend [IPH 1998] mit 0,6 angenommen.

Standard-Bürogebäude	
Beleuchtungsstärke in Lux	500
Raumindex	1,2
Raumwirkungsgrad	0,65
Leuchtenwirkungsgrad	0,7
Leistung Lampe/Vorschaltgerät in Watt	3 x 18 /3
maximale Anschlussleistung in $\text{W/m}^2_{\text{HNF}}$	27
Beleuchtungssteuerung	nein
Vollbetriebszeitfaktor	0,6
Volllaststunden in h/a	1650

Tab. 8-14: Kennwerte des Beleuchtungssystems im Standard-Bürogebäude

A-8.5.4.2 Arbeitsgeräte

Die Ausstattung der Arbeitsplätze mit Arbeitshilfen entspricht der des Passiv-Bürogebäudes (Abschnitt A-8.2.4.1). Der Stromverbrauch für die Arbeitshilfen wird auf einem mittleren bis hohen Niveau angenommen. Für die Computer wird ein Verbrauch entsprechend den Angaben in der VDI 2078 berücksichtigt. Kopierer, Fax und Laserdrucker werden mit 150 % des Grenzwertes der Gesellschaft Energielabel Deutschland [GED 1998] angesetzt. Damit ergibt sich folgendes Bild bezüglich der maximalen Leistungsaufnahme.

	Betrieb Watt	Standby Watt	Aus Watt
Computer	200	35	7,5
Kopierer (25 Seiten pro Min)		144	7,5
Drucker (Laser)		24	4,5
Fax		6	

Tab. 8-15: Maximale Leistungsaufnahme der Arbeitshilfen im Standard-Bürogebäude

Unter Berücksichtigung des Vollbetriebszeitfaktors ergeben sich während der Nutzungszeit die in Tab. 8-16 dargestellten flächenspezifischen Abwärmeströme in den Büros.

	Maximaler Wärmestrom [W/m ² _{HNF}]	Vollbetriebszeit- faktor Standard-BG.	Volllaststunden h/a	mittlerer Wärmestrom [W/m ² _{HNF}]
Personen	5,6	0,8	2200	4,5
Beleuchtung	27,1	0,6	1650	16,3
Arbeitshilfen	14,5	0,42	1155	5,8
Summe	47			26

Tab. 8-16: Wärmestrom durch interne Wärmequellen in den Büros des Standard-Bürogebäudes

A-8.5.4.3 Außerhalb der Betriebszeit

Auch hier wird ein Stromverbrauch von 150 % des entsprechenden Grenzwertes der Gesellschaft Energielabel Deutschland [GED 1998] angesetzt.

	max. Stromverbrauch im ausgeschalteten Zustand
PC ohne Bildschirm	7,5 Watt
Kopierer	7,5 Watt
Drucker	4,5 Watt
Faxgerät (läuft durch)	6 Watt

Tab. 8-17: Stromverbrauch der abgeschalteten Arbeitshilfen im Standard-Bürogebäude

A-8.5.4.4 Flur und Nebenräume

In den Fluren und Nebenräumen wird nur Beleuchtungsabwärme frei. Als Beleuchtungssystem kommt das in Tab. 8-14 beschriebene System zum Einsatz. Die maximale Beleuchtungsstärke beträgt 100 Lux. Damit ergibt sich ein maximaler Abwärmestrom durch die Beleuchtung von $7,3 \text{ W/m}^2_{\text{HNF}}$.

A-8.5.5 Zuordnung der Tagesprofile zu den Tagen des Jahres

Wie in Abschnitt A-8.2.5 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.5.6 Klima

Wie in Abschnitt A-8.2.6 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.6 Standard-Bürogebäude / HLK-Anlage

A-8.6.1 Gesamtkonzept der HLK-Anlage

Das Standard-Bürogebäude ist mit einer Vollklimaanlage ausgerüstet, die zusammen mit Kühldecken und den Radiatoren das Raumklima in definierten Grenzen hält (siehe Abschnitt A-8.2.3). Im Unterschied zu dem Passiv-Bürogebäude werden alle Zonen des Gebäudes über eine gemeinsame Klimaanlage versorgt. Aus diesem Grund erhalten Flur und Nebenräume ebenfalls ent- bzw. befeuchtete Luft. Geregelt wird der Feuchtegehalt der Zuluft entsprechend den Erfordernissen der Südbüros.

Die aktive Kühlung der Büros wird im Standard-Bürogebäude über Kühldecken realisiert. Die Klimaanlage fördert den aus hygienischen Gründen erforderlichen konstanten Mindestvolumenstrom. Im Vergleich zum Passiv-Bürogebäude können die Lüftungstechnischen Komponenten kleiner dimensioniert und der Aufwand zur Regelung der Luftvolumenströme reduziert werden. Auf einen Erdreichwärmetauscher und eine Wärmerückgewinnung wird verzichtet.

Eine schematische Darstellung der Heizungs- und RLT-Anlage des Standard-Bürogebäudes zeigt Abb. 8-9.

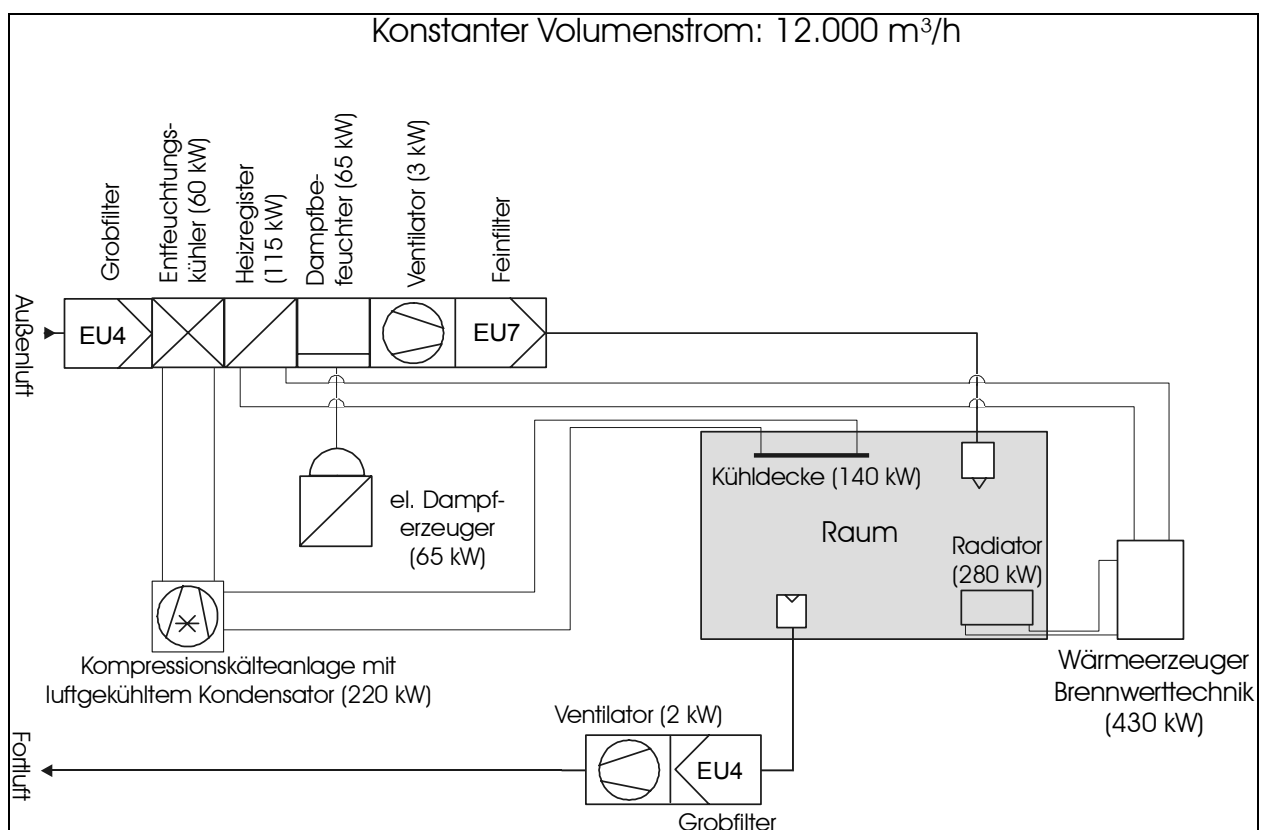


Abb. 8-9: Schematische Darstellung der Heizungs- und RLT-Anlage des Standard-Bürogebäudes

A-8.6.2 Heizungsanlage

Wie in Abschnitt A-8.3.2 für das Passiv-Bürogebäude beschrieben.

A-8.6.3 Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung

A-8.6.3.1 Luftwechsel

Der Luftwechsel wird während der Nutzungszeit über eine Zu- und Abluftanlage realisiert. Sie fördert einen konstanten Volumenstrom. Dieser entspricht in den Büros dem hygienischen Mindestaußenluftwechsel von $1,3 \text{ h}^{-1}$. Die Zulufttemperatur beträgt im Heiz- und im Kühlfall 18°C . Dies wird über ein entsprechendes Heiz- und Kühlregister sichergestellt.

Nachtlüftung ist wie in Abschnitt A-8.3.3 beschrieben möglich. Der maximale Luftwechsel beträgt $1,3 \text{ h}^{-1}$.

In den innen liegenden Fluren und Nebenräumen wird über die gesamte Betriebszeit ein Luftwechsel von $n=0,4 \text{ h}^{-1}$ realisiert.

Zu dem mechanisch erzeugten Luftwechsel addiert sich ein Luftwechsel über Fugen- und dichtigkeiten, der sich nach dem Standard des Baukörpers richtet. In Tab. 8-18 wird der Luftwechsel des Standard-Bürogebäudes mit 0,2 pro Stunde (siehe Abschnitt A-8.4.4) angenommen.

Nutzungszone	Lüftungsanlage h^{-1}	Undichtigkeiten h^{-1}	Luftwechsel gesamt h^{-1}
Büro	1,33	0,2	1,53
Flur	0,4	0,2	0,6
Nebenräume	0,4	0,2	0,6

Tab. 8-18: Luftwechsel während der Betriebszeit im Standard-Bürogebäude

A-8.6.3.2 Wärmerückgewinnung

Es ist keine Wärmerückgewinnung vorgesehen.

A-8.6.3.3 Ventilatoren und Druckverlust

Durch den Verzicht auf Erdreichwärmetauscher, Wärmerückgewinnung, Heiz- und Kühlregister sinkt der von den Ventilatoren zu überwindende Druckverlust auf der Zu- und Abluftseite:

- Gesamtdruckdifferenz bei 1,3-fachem Luftwechsel (Zuluft): 530 Pa
- Gesamtdruckdifferenz bei 1,3-fachem Luftwechsel (Abluft): 300 Pa.

A-8.6.4 Kälteanlage

Die Kälte wird in die Büros mittels einer Kühldecke eingebracht. Die Kühldecke weist bei der Wärmeübertragung einen Strahlungsanteil von 50 % auf. Der Verteilungswirkungsgrad des Rohrnetzes ist mit 90 % angesetzt.

Um aus dem berechneten Kältebedarf der einzelnen Räume den entsprechenden Strombedarf zu ermitteln, muss für die Simulationsrechnungen eine Kälteanlage definiert werden. Der Modellierung liegt eine Kompressionskälteanlage mit Luftkühlung und Hubkolbenverdichter zugrunde.

Für die Berechnung des Stromverbrauchs der Kältemaschine wird im Simulationsprogramm TAS bei gegebenem Gebäudekältebedarf zwischen dem Kälteprozess selbst und dem Teillastverhalten des Verdichters unterschieden. Der Kälteprozess wird über eine Leistungszahl ε_{real} abgebildet, bei der der Vollastwirkungsgrad des Verdichters unterstellt wird (Vollastleistungszahl). Abhängig von dem aktuellen Kältebedarf des Gebäudes wird der Verdichter aber in der Regel im Teillastbetrieb arbeiten. Die Abnahme des Verdichterwirkungsgrades wird über eine Teillastkennlinie beschrieben.

Die Vollastleistungszahl für unterschiedliche Außentemperaturen bestimmt sich aus der unter idealen Bedingungen maximalen erreichbaren Leistungszahl, korrigiert um den exergetischen Wirkungsgrad. Die unter idealen Bedingungen erreichbare Leistungszahl einer Kälteanlage entspricht dem Kehrwert des Carnot'schen Wirkungsgrades.

$$\text{Gl. 8-1} \quad \varepsilon_{ideal} = \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

mit

- ε_{ideal} unter idealen Bedingungen erzielbare Leistungszahl
- η_C Carnot'scher Wirkungsgrad
- T_E Verdampfungstemperatur in Kelvin
- T_C Kondensationstemperatur in Kelvin.

Der exergetische Wirkungsgrad beschreibt die Abweichung des realen vom idealen Prozess. Er wird auch als Carnot'sche Gütezahl bezeichnet [Recknagel 94/95].

$$\text{Gl. 8-2} \quad \eta_{ex} = \frac{\mathcal{E}_{real}}{\mathcal{E}_{ideal}}$$

mit

\mathcal{E}_{real} unter realen Bedingungen erzielbare Leistungszahl
 η_{ex} exergetischer Wirkungsgrad (Carnot'sche Gütezahl).

Die im Volllastbetrieb unter realen Bedingungen erreichte Leistungszahl berechnet sich somit zu:

$$\text{Gl. 8-3} \quad \mathcal{E}_{real} = \frac{\eta_{ex}}{\eta_C} = \eta_{ex} \cdot \frac{T_E}{T_C - T_E}.$$

Zur Ermittlung des Carnot-Wirkungsgrades müssen die Temperaturniveaus für die Verdampfung T_E und Kondensation T_C bekannt sein. Es wird angenommen, dass das Kältemittel den Verdampfer immer mit $T_{WA} = 6,7^\circ\text{C}$ verlässt. Die Verdampfungstemperatur T_E beträgt, bei Berücksichtigung der erforderlichen treibenden Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung von 5 K, konstant $T_E = 274,7$ K. Die Abhängigkeit der Volllastleistungszahl reduziert sich damit auf die Kondensationstemperatur. Da von einem luftgekühlten Kondensator ausgegangen wird, hängt die Kondensationstemperatur primär von der Außenlufttemperatur ab. Als minimal treibende Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und kondensierendem Medium werden nach [Recknagel 94/95] 10 K angesetzt. Damit ist die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur bestimmt und der Carnot-Wirkungsgrad kann berechnet werden.

Die Carnot'sche Gütezahl (exergetischer Wirkungsgrad) größerer Kälteanlagen liegt nach [Recknagel 94/95] zwischen 0,5 und 0,6. Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Volllastleistungszahl wird die Carnot'sche Gütezahl im Folgenden mit 0,5 angesetzt.

Unter diesen Randbedingungen ergibt sich unter Anwendung von Gl. 8-3 der in Abb. 8-10 dargestellte Verlauf der Volllastleistungszahl in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Diese Charakteristik wird in der Simulation verwendet.

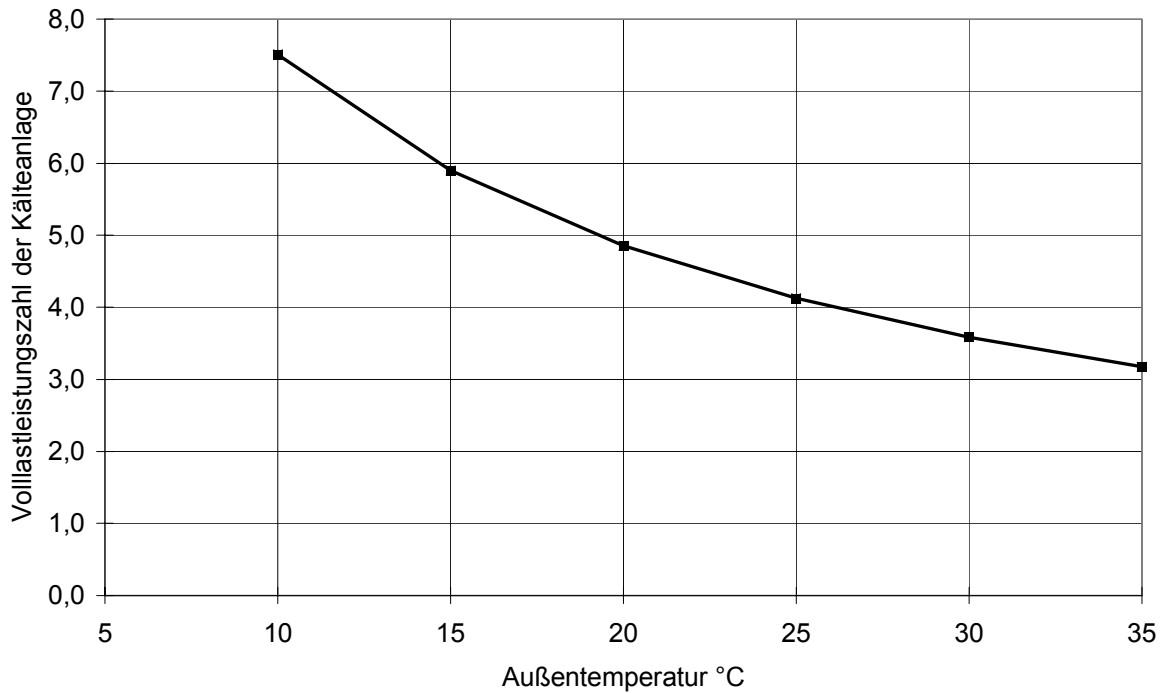


Abb. 8-10: Temperaturabhängigkeit der Leistungszahl der Kältemaschine bei Vollast

Neben dieser Temperaturabhängigkeit der Volllastleistungszahl wird der Stromverbrauch der Kältemaschine vom Teillastverhalten des Verdichters bestimmt. Abb. 8-11 zeigt den Verlauf des Teillastwirkungsgrades für drei unterschiedliche Verdichtertypen. Die Wirkungsgrade entsprechen den Angaben aus [Recknagel 94/95]. Für den Turboverdichter ist die im [Recknagel 94/95] berücksichtigte Zunahme der Kälteleistung im Teillastbetrieb herausgerechnet worden, da dies in der Simulation bereits über die Außentemperaturabhängigkeit der Volllastleistungszahl berücksichtigt wird.

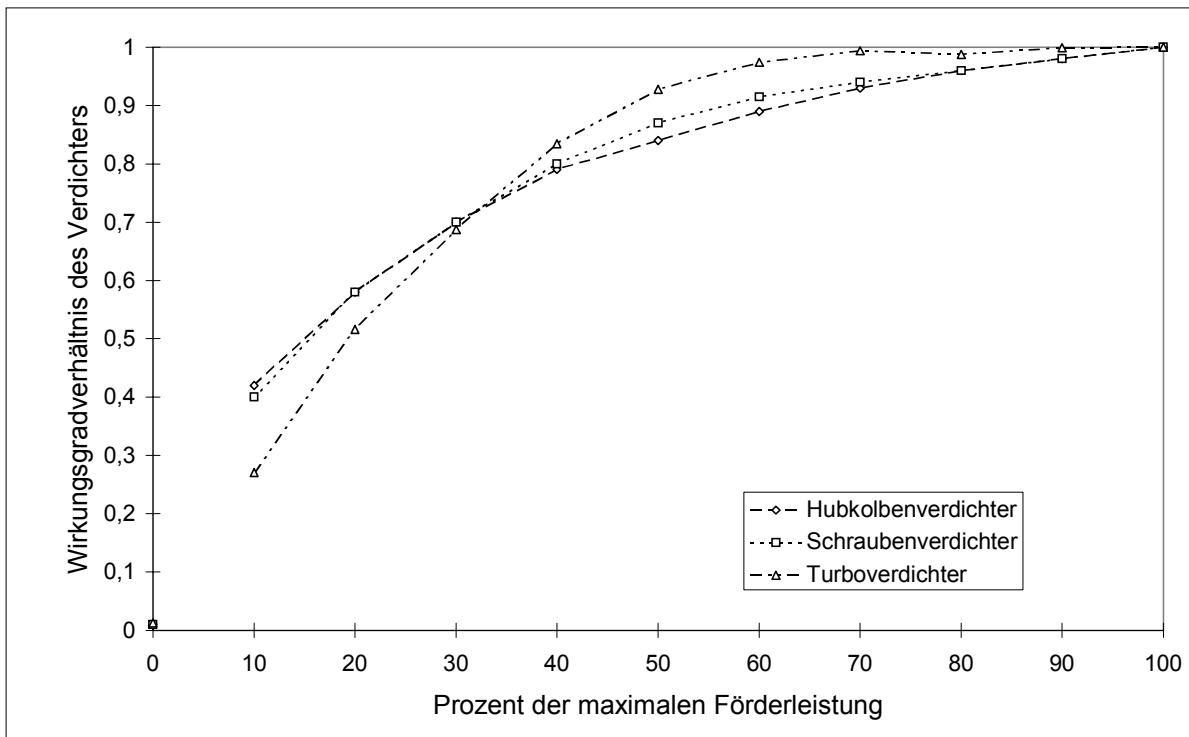


Abb. 8-11: Teillastverhalten unterschiedlicher Verdichtertypen

Die Teillastwirkungsgrade der einzelnen Verdichter unterscheiden sich nur wenig. In der Simulation wird die Charakteristik des Hubkolbenverdichters angenommen.

A-8.6.5 Be- und Entfeuchtung

Zur Befeuchtung der Luft wird ein Dampfbefeuchter eingesetzt. Entsprechend den Empfehlungen der DIN 1946 Teil 2 sichert der Dampfbefeuchter eine Mindestfeuchte von 30 % in den Räumen. Die Dampferzeugung geschieht elektrisch.

Die Entfeuchtung geschieht über einen Entfeuchtungskühler. Dieser ist vor dem Nachheizregister angebracht, so dass die im Entfeuchtungsprozess heruntergekühlte Luft anschließend wieder auf 18°C erwärmt werden kann. Als Regelgröße für den Entfeuchtungskühler dient die absolute Feuchte. Die Zuluft wird so weit entfeuchtet, dass in den Süd-Büros eine absolute Feuchte von 11,5 Gramm Wasser pro kg trockener Luft nicht überschritten wird (DIN 1946 Teil 2).

A-9 ABSCHÄTZEN DER MEHR- BZW. MINDERAUSGABEN FÜR DIE VARIANTE „PASSIV-BÜROGEBÄUDE“

In Abschnitt 4.4 werden die ökonomischen Konsequenzen eines hohen energetischen Standards bei Bürogebäuden über Wirtschaftlichkeitsberechnungen dargestellt. Verglichen werden dabei die beiden in Abschnitt 4.1 und Anhang A-8 definierten Ausführungsvarianten „Standard-Bürogebäude“ und „Passiv-Bürogebäude“. Den Wirtschaftlichkeitsrechnungen liegen Kostenschätzungen zugrunde, die im Folgenden dokumentiert werden. Ermittelt werden die Mehr- und Minderkosten der Ausführungsvariante „Passiv-Bürogebäude“ gegenüber dem „Standard-Bürogebäude“. Die angegebenen Kosten entsprechen dem Preisniveau von 1996. Die Umrechnung auf Euro erfolgt vereinfacht mit dem Faktor 0,5. Die gesetzliche Mehrwertsteuer ist nicht enthalten. Die Vorzeichen werden entsprechend der betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise wie folgt definiert:

- Mehrausgaben werden als negative Beträge
- Minderausgaben werden als positive Beträge angegeben.

A-9.1 Investive Mehr- bzw. Minderausgaben

A-9.1.1 Baukörper

Bauliche Mehrausgaben ergeben sich durch den erhöhten Wärmeschutz bei Außenwand, Fenster, Dach und Kellerdecke. In [Knissel/Loga 1996] werden entsprechende Berechnungen für unterschiedliche Typen von Wohngebäuden durchgeführt. Bestimmt wurden die investiven Mehrkosten des Niedrigenergie-Standards gegenüber der Wärmeschutzverordnung von 1995. Aufbauend auf den in dieser Studie ermittelten Kostenannahmen werden die baulichen Mehrkosten für das untersuchte Beispielgebäude abgeschätzt. Eine zusammenfassende Darstellung der Berechnung zeigt Tab. 9-1. Der Berechnungsvorgang soll am Beispiel der Außenwand erläutert werden.

Im vorliegenden Beispiel wird der Wärmeschutz der Außenwand über ein außen liegendes Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol realisiert. Die Dämmstoffdicken liegen bei 6 cm für das Standard-Bürogebäude bzw. 30 cm für das Passiv-Bürogebäude. Als Kosten je cm zusätzlicher Dämmstoffdicke werden 1,55 EUR je m² Bauteilfläche angenommen. Dieser Wert beinhaltet neben den Materialkosten des Dämmstoffs auch den Mehraufwand bei der Verarbeitung sowie sonstige Mehrkosten wie z. B. tiefere Fensterbänke und Sockelschienen. Er wird bestimmt indem der in [Eicke-Hennig 1995] für die Preisbasis 1990 ermittelte Wert über den Baupreisindex [Statistisches Bundesamt 1998] auf die Preisbasis 1996 umgerechnet wird.

Die Mehrausgaben für 24 cm zusätzliche Dämmstoffdicke betragen damit 37 EUR je m² Bauteilfläche (BTF). Durch Multiplikation dieses Wertes mit der Außenwandfläche des Beispielgebäudes ergeben sich absolute Mehrausgaben von 76.000 EUR. Um einen Vergleich mit anderen Bürogebäuden zu ermöglichen, wird dieser Absolutwert auf die Brutto-Grundfläche

des Gebäudes (nach VDI 3807) bezogen. Die derart definierten spezifischen Mehrausgaben für die Außenwanddämmung betragen $16 \text{ EUR/m}^2_{\text{BGF}}$.

Der gleiche Berechnungsvorgang wird für die zusätzlichen Dämmstoffdicken beim Dach und der Kellerdecke durchgeführt. Die Fenster bestehen im Passiv-Bürogebäude aus einer 3-fach-Wärmeschutzverglasung und einem hoch wärmegeprägten Rahmen. Die Mehrausgaben hierfür werden mit 175 EUR/m^2 Fensterfläche angesetzt.

	Dämmstoffdicke (WLG 040)		Mehrkosten	Mehrkosten	Bauteilfläche m^2_{BTF}	Mehrkosten	Mehrkosten
	Standard-BG cm	Passiv-BG cm	je cm Dämmstoff $\text{€}/(\text{m}^2_{\text{BTF}}\text{cm})$	je m^2 Bauteilfläche $\text{€}/\text{m}^2_{\text{BTF}}$		absolut € (ca.)	je m^2 Brutto-Grundfl. $\text{€}/\text{m}^2_{\text{WF}}$
Außenwand (Polystyrol)	6	30	-1,6	-37	2043	-76.000	-16
Dach	12	40	-0,9	-26	916	-24.000	-5
Fenster	U=1,8 W/(m^2K) U=0,8 W/(m^2K)			-175	1056	-185.000	-38
Kellerdecke	4	30	-2,5	-64	916	-59.000	-12
Summe bauliche Mehrkosten (netto)						-344.000	-71
Planungs-Mehrkosten mit 9% der baulichen Mehrkosten berücksichtigt						-31.000	-6
Summe bauliche Mehrkosten gesamt (netto)						ca. -375.000	-77

Tab. 9-1: Investive Mehrausgaben für den besseren Wärmeschutz der Gebäudehülle des Passiv-Bürogebäudes

Die gesamten baulichen Mehrausgaben inklusive der Planungsmehrkosten addieren sich zu $77 \text{ EUR/m}^2_{\text{BGF}}$.

A-9.1.2 Beleuchtung

Die Kostendifferenz zwischen dem effizienten Beleuchtungssystem des Passiv-Bürogebäudes und dem kostengünstigen System des Standard-Bürogebäudes wird über die unterschiedlichen Leuchtenpreise quantifiziert. Angesetzt werden dabei 80 % des Listenpreises. Dieser Wert beinhaltet neben der Leuchte auch die Kosten für die Lampe und die Verkabelung. Es wird davon ausgegangen, dass die Planungskosten in beiden Fällen identisch sind.

Das Beleuchtungssystem des Passiv-Bürogebäudes besteht aus Deckenleuchten zur Grundausleuchtung des Raumes (220 Lux) und individuellen Arbeitsplatzleuchten. Als Deckenleuchten kommen hochglanz-eloxierte, offene Spiegelrasterleuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten zum Einsatz. Ausgerüstet sind sie mit 58 Watt Leuchtstofflampen in Stabform. Für die Kostenschätzung wird ein Preis je Deckenleuchte von 250 EUR angesetzt (Listenpreis [Siteco 1998]).

Die Deckenbeleuchtung wird über eine Steuereinrichtung beim Erreichen eines gewissen Sollwertes der Beleuchtungsstärke ausgeschaltet. Die Kosten für den Lichtsensor werden mit 17,5 EUR pro Stück angenommen [Siteco]. Für die Verkabelung zum Schaltschrank werden eine mittlere Länge von 20 Metern und Verkabelungskosten von 2,5 EUR je Meter angenommen. Damit ergeben sich Mehrausgaben für die Beleuchtungssteuerung je Büro von

$$17,5 \text{ EUR} + (20 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ EUR/m}) \approx 68 \text{ EUR.}$$

Die erforderliche Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche wird durch individuell zu bedienende Arbeitsplatzleuchten erreicht. Die Arbeitsplatzleuchten bestehen aus einem Leuchtenarm mit dreh- und kippbarem Leuchtenkopf. Sie sind mit Stromsparlampe 20 Watt und elektronischem Vorschaltgerät ausgerüstet. Der Listenpreis beträgt 50 EUR [Osram 1998] pro Stück.

Verglichen wird dieses System mit dem im Standard-Bürogebäude realisierten Beleuchtungssystem. Eingesetzt werden hier 3-flammige Leuchten mit 18 Watt Leuchtstofflampen in Stabform. Die Leuchten besitzen ein weißes Raster und sind mit einem verlustarmen Vorschaltgerät ausgerüstet. Für die Kostenschätzung wird ein Preis von 125 EUR pro Stück angesetzt (Listenpreis [Siteco 1998]). Eine Beleuchtungssteuerung ist nicht vorhanden.

Die wichtigsten Kenndaten der beiden Beleuchtungssysteme sind in Tab. 8-6 und Tab. 8-14 zusammengefasst. Tab. 9-2 stellt die Kosten für diese Systeme zusammen.

Obwohl die im Passiv-Bürogebäude eingesetzten Leuchten einen etwa doppelt so hohen

Passiv-Bürogebäude	Büro		Verkehrs- und Nebenflächen
	Arbeitsplatz	Decke	Decke
Leuchtenkosten (80 % des Listenpreises)	40 €	200 €	200 €
Leuchtenanzahl	160 Stück	240 Stück	60 Stück
Kosten für Beleuchtungssteuerung je Regelkreis	-	68 €	-
Anzahl Regelkreise	-	80 Stück	-
Summe	6.400 €	53.400 €	12.000 €
Gesamtkosten		ca.	72.000 €
Standard-Bürogebäude	Büro		Verkehrs- und Nebenflächen
	Arbeitsplatz	Decke	Decke
Leuchtenkosten (80 % des Listenpreises)	-	97 €	97 €
Leuchtenanzahl	-	1040 Stück	233 Stück
Summe	-	100.880 €	22.601 €
Gesamtkosten		ca.	123.000 €
Minderausgaben für das Passiv-Bürogebäude			51.000 €

Tab. 9-2: Investitionskostenvergleich der eingesetzten Beleuchtungssysteme

Stückpreis aufweisen und Mehrausgaben für die Beleuchtungssteuerung sowie die Arbeitsplatzleuchten anfallen, ergeben sich Minderausgaben von etwa 50.000 EUR. Diese resultieren aus der geringeren Anzahl von Leuchten, die im Passiv-Bürogebäude aufgrund der niedrigeren Beleuchtungsstärke und des höheren Leuchtenwirkungsgrades benötigt werden.

A-9.1.3 Arbeitshilfen

Bei Kopierern, Faxgeräten und Druckern besteht keine Kopplung zwischen Energieeffizienz und Verkaufspreis. Mehrausgaben für die energiesparenden Geräte werden entsprechend nicht berücksichtigt.

Als Computer werden im Passiv-Bürogebäude Notebooks eingesetzt. Die Mehrkosten eines Notebooks gegenüber einem konventionellen Tischgerät betragen bei gleicher Ausstattung etwa 1.000 EUR. Werden alle 160 Arbeitsplätze derart ausgerüstet, belaufen sich die Mehrausgaben für das gesamte Gebäude auf:

$$1.000 \text{ EUR} \cdot 160 \text{ Stück} = 160.000 \text{ EUR.}$$

A-9.1.4 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Anlage)

Um die Mehr- bzw. Minderausgaben bei der HLK-Anlage zu bestimmen, wurden für die in Abb. 8-6 und Abb. 8-9 schematisch dargestellten Anlagen von dem Ingenieurbüro Engels und Jung (Bergisch-Gladbach) Kostenschätzungen erstellt.

Die Kosten der einzelnen Positionen sind in Tab. 9-3 und Tab. 9-4 dokumentiert.

Standard-Bürogebäude			
RLT-Anlage: Konstantvolumenstromanlage mit 12.000 m³/h			
	max. Luftmenge	max. Leistung	Kosten
	kg/s	kW	€ (netto)
Kühlregister Entfeuchtung	4	60	2.500
Heizregister	4	115	1.500
Dampfbefeuchter	4	65	2.000
Luftleitungen	4		30.000
Klappen (FS + Regelung)	4		12.000
Wärmedämmung	4		15.000
Schalldämpfer	4		12.000
Luftdurchlässe	4		15.000
Grobstaubfilter, EU4	4		1.500
Feinstaubfilter, EU 7	4		1.500
Ventilator, konstant, Zuluft	4	3,2	4.000
Ventilator, konstant, Abluft	4	2	4.000
Dampferzeuger		65	2.500
	Summe RLT		103.500
	spez. Kosten		9 €/m³
Heizung			
		max. Leistung	Kosten
		kW	€ (netto)
Wärmeerzeuger		430	53.750
Wärmeverteilung		290	58.000
Heizkörper		290	87.000
	Summe Heizung		198.750
Kühlung			
	gekühlte Fläche	max. Leistung	Kosten
	m²	kW	€ (netto)
Kühldecke	2000	140	300.000
Kompressions-Kälteanlage		220	68.200
	Summe Kühlung		368.200
Zusammenfassung			
	Summe RLT-Anlage		103.500 €
	Summe Heizung		198.750 €
	Summe Kühlung		368.200 €
	Summe gesamt		670.000 €

Tab. 9-3: Kostenschätzung für das Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystems des Standard-Bürogebäudes

Passiv-Bürogebäude			
RLT-Anlage: Variabel-Volumenstromanlage mit 12.000 bis 24.000 m³/h			
	max. Luftmenge	max. Leistung	Kosten
	kg/s	kW	€ (netto)
Wärme- und Feuchterückgewinnung	8		43.200
Luftleitungen	8		60.000
Klappen (FS + Regelung)	8		36.000
Wärmedämmung	8		36.000
Schalldämpfer	8		24.000
Luftdurchlässe	8		42.000
Grobstaubfilter, EU4	8		2.500
Feinstaubfilter, EU 7	8		2.500
Ventilator, variabel, Abluft	8	2,5	10.000
Ventilator, variabel, Zuluft	8	6,0	10.000
	Summe RLT		266.200
	spez. Kosten		11 €/m³
		max. Leistung	
		kW	
Wärmeerzeuger		170	21.250
Wärmeverteilung		165	33.000
Heizkörper		165	49.500
	Summe Heizung		103.750
	Verlegelänge	spez. Kosten	Kosten
	m	€/m	€ (netto)
Erdreichwärmetauscher	180	165	29.700
Zusammenfassung	Summe RLT-Anlage		266.200 €
	Summe Heizung + EWT		133.450 €
	Summe gesamt		399.650 €

Tab. 9-4: Kostenschätzung für das Heizungs- und Lüftungssystem des Passiv-Bürogebäudes

Die Kosten des Erdreichwärmetauschers waren nicht Bestandteil der Kostenschätzung des Ingenieurbüros Engels und Jung. Aus diesem Grund werden diese im Folgenden gesondert ermittelt. Zugrunde gelegt wird dabei die in der Simulation angenommene Realisierungsvariante. Eine Skizze des eingesetzten Erdreichwärmetauschers ist im Abb. 8-8 zu finden. Der Erdreichwärmetauscher besteht aus Stahlbetonrohren DN 800, die in 3 Meter Tiefe und mit 3 Meter Abstand zur Kellerwand im Arbeitsbereich der Baugrube verlegt werden. Um den Abstand von 3 Metern von der Kelleraußenwand einzuhalten, muss der in der Regel 0,6 m breite Arbeitsbereich um 2,4 m verbreitert werden. Bei einem Böschungswinkel von 60° (Bodenklasse 5) müssen je Meter Erdrohr 0,7 m³ Mutterboden und 6,5 m³ Erdreich zusätzlich bewegt werden. Die Kosten für den zusätzlichen Aushub sowie das Verfüllen und Verdichten betragen für das Jahr 1996 entsprechend [Schulz 1996]:

Mutterboden abtragen (mit Großgerät)	6 EUR/m ³
Aushub (Bodenklasse 5, mit Großgerät)	2,5 EUR/m ³
Stahlbetonrohre DN 800 mit Glockenmuffe und Gleitringdichtung, anliefern und verlegen	62,5 EUR/m
Druckprüfung der Rohre	4,25 EUR/m
Verfüllen und verdichten (mit mittlerem Gerät)	8,5 EUR/m ³
Mutterboden andecken (mit mittlerem Gerät)	9,5 EUR/m ³ .

Die Kosten je laufendem Meter Erdreichwärmetauscher lassen sich damit wie folgt abschätzen:

Position	Beschreibung	mittlere Kosten
1	Mutterboden abtragen	4,25 EUR/m
2	Aushub (Bodenklasse 5)	16,25 EUR/m
3	Stahlbetonrohre DN 800, liefern und verlegen	75 EUR/m
4	Druckprüfung	5 EUR/m
5	Verfüllen und verdichten (Bodenklasse 5)	55,25 EUR/m
6	Mutterboden andecken	7,75 EUR/m
Summe		162,5 EUR/m

Tab. 9-5: Kosten je Meter Erdreichwärmetauscher

Bei der im Simulationsmodell angenommenen Länge des Erdreichwärmetauschers von 180 Metern betragen die Gesamtkosten für den Erdreichwärmetauscher damit

$$162,5 \text{ EUR/m} \cdot 180 \text{ m} = 29.250 \text{ EUR.}$$

Die Kosten für die gesamte HLK-Anlage des Passiv-Bürogebäudes einschließlich des Erdreichwärmetauschers belaufen sich auf etwa 400.000 EUR. Damit ergeben sich Minderausgaben im Vergleich zum Standard-Bürogebäude von etwa 275.000 EUR.

A-9.2 Einsparung an Energie- und Wartungskosten

Die im Passiv-Bürogebäude erzielte Energiekosteneinsparung zeigt Tab. 9-6. Sie ergibt sich durch den im Vergleich zum Standard-Bürogebäude sehr guten Wärmeschutz der Gebäudehülle und den Einsatz effizienter Technik. Die Gas- und Strompreise sind dem kommunalen Energiepreisvergleich von 1996 entnommen [KE 1996]. Sie entsprechen einem Mittelwert über 18 Kommunen. Die durch die Liberalisierung des Strommarktes ausgelöste Reduktion des Strompreises wird durch einen Abschlag von 10 % berücksichtigt.

	End-Energiebedarf kWh/a		Energieträgerkosten €/kWh (netto)	Endenergiekosten €/a (netto)	
	Standard-BG	Passiv-BG		Standard-BG	Passiv-BG
Gas	337.341	107.558	0,022	7.000	2.000
Strom	268.895	73.335	0,13	35.000	10.000
Summe ca.				42.000	12.000
Energiekosteneinsparung beim Passiv-Bürogebäude					30.000

Tab. 9-6: Vergleich der jährlichen Energiekosten

Jährlich können im Passiv-Bürogebäude etwa 30.000 EUR an Energiekosten eingespart werden. Dies entspricht einer Reduktion gegenüber dem Standard-Bürogebäude um ca. 70 %.

Wird auf eine Klimaanlage verzichtet, reduzieren sich neben den Investitionskosten auch die Bedienungs-, Wartungs- und Inspektionskosten. Diese werden entsprechend VDI 2067 für raumluftechnische Anlagen in Verwaltungsgebäuden mit 2,5 % der (eingesparten) Investitionskosten angesetzt.

Da im Passiv-Bürogebäude weniger Leuchten erforderlich sind, sinken auch die jährlichen Wartungskosten für die Beleuchtungsanlage. Diese werden ebenfalls mit 2,5 % der Investitionskosten angenommen. Insgesamt können Wartungskosten in Höhe des in Tab. 9-7 dargestellten Betrages jährlich eingespart werden.

Anteil der Wartungskosten	Eingesparte Investitionskosten	Eingesparte Wartungskosten	
2,5 %/a	270.000 EUR	7.000 EUR/a	Heizungs- Lüftung- und Klimaanlage
2,5 %/a	51.000 EUR	1.000 EUR/a	Beleuchtung
Minderausgaben Wartung im Passiv-BG			8.000 EUR/a
			Summe

Tab. 9-7: Vergleich der jährlichen Wartungskosten

Zusammenfassend sind die ermittelten Mehr- (negativ) bzw. Minderinvestitionen (positiv) sowie die eingesparten Energie- und Wartungskosten in Tab. 9-8 dargestellt.

Mehr- bzw. Minder-Investitionen im ersten Jahr		
	€	Lebensdauer
Baulicher Wärmeschutz	-375.000	30
Beleuchtung	51.000	15
Arbeitshilfen	-160.000	5
HLK-Anlage*	270.000	15
Summe	-214.000	

* Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Anlage

jährliche Minderausgaben	
	€/a
Stromkosten	25.000
Gaskosten	5.000
Wartungskosten	8.000
Summe	38.000

Tab. 9-8: Mehr- (negativ) bzw. Minderausgaben (positiv) beim Passiv-Bürogebäude

A-10 AUßENLUFTBEDARF IN DER MORGENDLICHEN SPÜLPHASE

Die in Abschnitt 5.1 definierte Winter-Bedingung beschränkt die Laufzeit der Lüftungsanlage auf Zeiten mit hygienisch erforderlichem Außenluftbedarf. Hieraus ergibt sich eine Abschaltung der Anlage in der Nacht und am Wochenende. Während dieser Abschaltzeiten reichern sich die aus den Einrichtungsgegenständen sowie Bauteiloberflächen ausdiffundierenden Verunreinigungen in der Raumluft an. Diese müssen von der Lüftungsanlage vor Beginn der Nutzungszeit abgeführt werden. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie viele Stunden die Lüftungsanlage vor Nutzungsbeginn eingeschaltet werden muss, um eine ausreichende Luftqualität sicherzustellen. Diese Information wird verwendet, um in Abschnitt 5.2.2 die gesamte wöchentliche Laufzeit der Lüftungsanlage zu bestimmen, die aus hygienischen Gründen erforderlich ist.

Die zeitliche Entwicklung der Konzentration eines Stoffes in einem ideal durchmischten Raumluft lässt sich berechnen, wenn die Anfangsbelastung der Raumluft, die Belastung der Außenluft sowie die Quellstärke bekannt sind. Die Konzentration zum Zeitpunkt t ergibt sich bei gegebenem Luftwechsel über folgende Gleichung [Recknagel 2000]:

$$\text{Gl. 10-1} \quad k(t) = k_a + (k_0 - k_a) \cdot e^{-n \cdot t} + \frac{\dot{K}}{n \cdot V} \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

mit

$k(t)$ Stoffkonzentration im Raum zur Zeit t

k_a Stoffkonzentration der Außenluft

k_0 Stoffkonzentration zur Zeit t_0

\dot{K} anfallende Stoffmenge

n Luftwechsel

V Luftvolumen.

Speichervorgänge durch Sorption in den Raumumschließungsflächen und den Einrichtungsgegenständen werden dabei vernachlässigt.

Die Herleitung von Gl. 10-1 geschieht in ähnlicher Weise wie für das Temperaturverhalten unter quasistatischen Bedingungen in Abschnitt A-12.1. Die dort getroffene Annahme einer einheitlichen mittleren Temperatur des Bauteils findet hier ihre Entsprechung in der Annahme einer einheitlichen Stoffkonzentration im Raum. Es wird also von einem ideal durchmischten Raum ausgegangen. Die Abluftkonzentration entspricht in dem Fall der mittleren Raumkonzentration. Die Lüftungseffektivität ε_V beträgt bei der angenommenen idealen Durchmischung $\varepsilon_V=1$.

Gl. 10-1 beschreibt den zeitlichen Verlauf der Konzentration eines Stoffes. Die Verunreinigungen von Personen und Einrichtungsgegenständen setzen sich aber aus unterschiedlichen Stoffen mit geringer Konzentration zusammen. So können in der Raumluft 8.000 bis 10.000 unterschiedliche Stoffe vorkommen. Um die Luftqualität quantifizierbar zu machen, führte Fanger zwei neue Größen ein [Fanger 1988]: olf und decipol.

Die anfallende bzw. emittierte Stoffmenge wird als Verunreinigungslast mit der Einheit olf bezeichnet. Die Verunreinigungslast einer erwachsenen Standardperson in sitzender Tätigkeit und einem hygienischen Zustand von 0,7 Bädern pro Tag wird mit 1 olf definiert. Andere

Verunreinigungslasten beispielsweise von Einrichtungsgegenständen können nun als Vielfaches der Größe olf quantifiziert werden. Die Verunreinigungslast kann nicht physikalisch gemessen werden. Sie wird indirekt über die empfundene Luftqualität bestimmt.

Zur Beschreibung der empfundenen Luftqualität wird die Größe decipol eingeführt. Ein decipol entspricht der Luftqualität, die sich einstellt, wenn die Verunreinigungslast von einer Person (1 olf) mit 10 l/s sauberer Luft vermischt wird. Zwischen der empfundenen Luftqualität D in decipol, der Verunreinigungslast G in olf und dem Zuluftvolumenstrom (reine Luft) in l/s besteht im stationären Zustand und unter Annahme eines ideal durchmischten Raumes folgender Zusammenhang:

$$\text{Gl. 10-2} \quad D = 10 \cdot \frac{G}{\dot{V}}$$

mit

D empfundene Luftqualität in decipol

G Verunreinigungslast in olf

\dot{V} Luftvolumenstrom in l/s.

Um Verunreinigungen in der Außenluft und andere Werte der Lüftungseffektivität berücksichtigen zu können, wird die Gleichung wie folgt erweitert:

$$\text{Gl. 10-3} \quad D_R - D_A = 10 \cdot \frac{G}{\dot{V} \cdot \varepsilon_V}$$

mit

D_R empfundene Luftqualität der Raumlufte in decipol

D_A empfundene Luftqualität der Außenluft in decipol

ε_V Lüftungseffektivität.

Auch die empfundene Luftqualität kann nicht direkt über ein Messgerät bestimmt werden. Zur Quantifizierung des Wertes wird die Nase - d. h. das subjektive Empfinden von Versuchspersonen - herangezogen. Es gibt zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Bei der ersten wird die empfundene Luftqualität von speziell trainierten Versuchspersonen direkt in der Einheit decipol angegeben. Bei der zweiten Vorgehensweise wird die Luftqualität in einem Raum von einer größeren Anzahl nicht trainierter Personen in akzeptabel ja/nein bewertet und der Prozentsatz der Unzufriedenen (PD-Wert) bestimmt. Fanger fand einen Zusammenhang zwischen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener [Fanger 1988]. Diese Gleichung wird auch als „Behaglichkeitsgleichung für die Raumluftequalität“ bezeichnet [Recknagel 2000]:

$$\text{Gl. 10-4} \quad D = 112 \cdot (\ln PD - 5,98)^{-4}$$

mit

PD Prozentsatz der Unzufriedenen.

Zur Quantifizierung der empfundenen Luftqualität wird also über eine Testgruppe der Prozentsatz Unzufriedener bestimmt und über Gl. 10-4 der Wert für die empfundene Luftqualität berechnet.

Sind der Außenluftvolumenstrom, die empfundene Luftqualität der Außenluft und die Lüftungseffektivität bekannt, kann über Gl. 10-3 die Verunreinigungslast bestimmt werden.

Relativiert wird die Objektivität dieses Verfahrens durch die neuesten Erkenntnisse von Fanger, nach denen der Prozentsatz Unzufriedener bei gleicher Luftqualität nicht konstant ist, sondern von der Temperatur und Feuchte der Raumluft beeinflusst wird [Recknagel 2000]. Bevorzugt wird danach offensichtlich trockene und kühlere Luft. Die Untersuchungen von Laborstudien zeigen, dass sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Akzeptanz und der Enthalpie der feuchten Raumluft ergibt. Somit könnte dieser Einfluss auch quantitativ berücksichtigt werden.

Um die empfundene Luftqualität zu Beginn der Nutzungszeit bestimmen zu können, werden in der vorliegenden Studie folgende Analogien aufgestellt:

SI-Einheiten	Größen nach Fanger
anfallende Schadstoffmenge \dot{K}	Verunreinigungslast G
Schadstoffkonzentration k_x	empfundene Luftqualität D

Gl. 10-1 lässt sich damit in folgender Form schreiben:

Gl. 10-5
$$D(t) = D_A + (D_0 - D_A) \cdot e^{-n \cdot t} + \frac{G}{n \cdot V} \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

mit

D_0 : empfundene Luftqualität zu Zeitpunkt t_0 .

Die Theorie von Prof. Fanger zur empfundenen Luftqualität und damit auch Gl. 10-5 gehen von einem linearen Zusammenhang zwischen der Verunreinigungslast in olf und der empfundenen Luftqualität in decipol aus. Untersuchungen von [Finke 1996] am Hermann-Rietschel-Institut der TU-Berlin legen hingegen einen Zusammenhang entsprechend einer Wurzelfunktion nahe. Kritisch diskutiert werden hier auch die derzeit übliche Addition der Verunreinigungslast von Außenluft und Raum, die Berücksichtigung der Lüftungsanlage und die Grenzwerte für gute mittlere und niedrige empfundene Luftqualität. Da die Diskussion in den Fachkreisen noch nicht abgeschlossen ist, werden für die weiteren Untersuchungen diese kritischen Anmerkungen jedoch noch nicht übernommen.

Die Verunreinigungslast aus Bauteilen, Einrichtungsgegenständen und der Lüftungsanlage sollen in einem wenig verunreinigten Gebäude nach [Recknagel 2000] einen Wert von 0,1 bis 0,2 olf/m² nicht überschreiten. Da angenommen wird, dass die hier diskutierten Gebäude bereits unter hygienischen Gesichtspunkten geplant wurden, wird für die Berechnung eine Verunreinigungslast außerhalb der Betriebszeit von

$$G = 0,1 \text{ olf/m}^2$$

angesetzt. Die Lüftungsanlage wird am Wochenende für 61 Stunden abgeschaltet. In diesem Zeitraum reichert sich die Raumluf mit Verunreinigungen an. Vereinfachend wird angenommen, dass die Verunreinigungslast über den Zeitraum konstant ist. Dies setzt u.a. einen konstanten Konzentrationsgradienten zur Raumluf voraus und vernachlässigt den Einfluss der absinkenden Gebäudetemperatur. Da beide Effekte die an die Luft abgegebene Verunreinigungslast verringern, handelt es sich dabei um eine konservative Annahme. Zudem sind in dem Wert von $G=0,1 \text{ olf/m}^2$ die Verunreinigungen aus der Lüftungsanlage enthalten. Diese ist im vorliegenden Fall jedoch abgeschaltet. Am Ende der Abschaltzeit ergibt sich unter diesen Annahmen eine Verunreinigung von

$$0,1 \text{ olf/m}^2 \cdot 61 \text{ h} = 6,1 \text{ olf h /m}^2 = 21.960 \text{ olf s/m}^2.$$

Bei einer lichten Geschosshöhe von 3 Metern berechnet sich ein Luftvolumen je m^2 Grundfläche von 3000 Litern bzw. 300 Deziliter pro m^2 . Die empfundene Luftqualität am Ende der 61 Stunden beträgt damit unter der hier gemachten Vereinfachung

$$D_0 = \frac{21.960}{300} \cdot \frac{\text{olf} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2}{\text{dl} \cdot \text{m}^2} = 73,2 \frac{\text{olf} \cdot \text{s}}{\text{dl}} = 73,2 \text{ decipol}.$$

Bezüglich der empfundenen Luftqualität der Außenluft werden in der DIN 1946 Teil 2 Anhang A typische Werte angegeben. Für die Berechnung wird von einer Stadt mit mittlerer Außenluftqualität ausgegangen. Die empfundene Außenluftqualität beträgt hier

$$D_A = 0,2 \text{ decipol}.$$

Für diese Annahmen ergibt sich der in Abb. 10-1 dargestellte zeitliche Verlauf der empfundenen Luftqualität in Abhängigkeit von der Länge der morgendlichen Spülphase bei unterschiedlichen Luftwechslern.

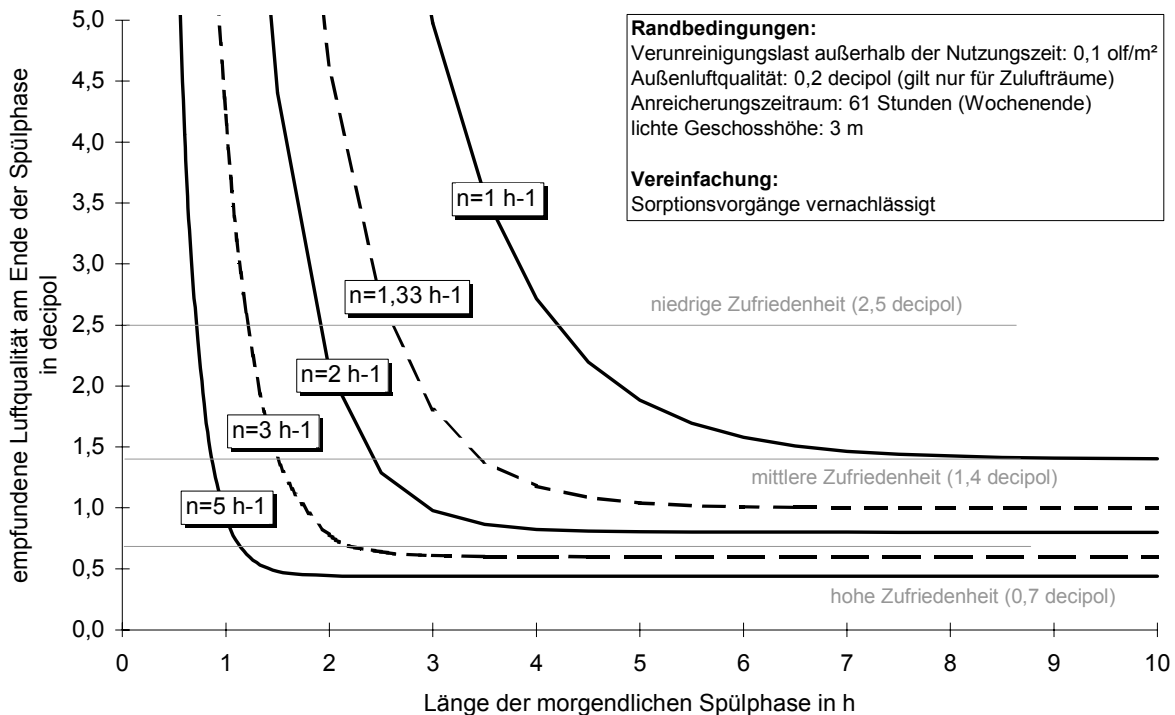


Abb. 10-1: Empfundene Luftqualität in den Zulufräumen in Abhängigkeit von der Länge der morgendlichen Spülphase bei unterschiedlichen Luftwechseln

Mit zunehmender Länge der Spülphase geht die empfundene Luftqualität mit einem hyperbolischen Verlauf in den stationären Zustand über. Der stationäre Wert ist dabei (bei konstanter Verunreinigungslast) abhängig von dem realisierten Luftwechsel. Mit einem 1-fachen Luftwechsel kann bei der hier angenommenen Verunreinigungslast (nur Gebäude und Einrichtung, keine Personen) im stationären Zustand lediglich eine mittlere Zufriedenheit erreicht werden. Um eine empfundene Luftqualität unter 0,7 decipol und damit eine hohe Zufriedenheit zu erreichen, muss mindestens ein 3-facher Luftwechsel realisiert werden.

Vergleicht man diese Luftwechselzahlen mit den in Wohngebäuden üblichen mittleren Werten von 0,6 bis 0,8 h⁻¹ und berücksichtigt, dass in Wohngebäuden mit diesen Luftwechseln zusätzliche Verunreinigungslasten durch Personen, Kochen, Wäschewaschen usw. weg gelüftet werden müssen, ergibt sich eine deutliche Diskrepanz in Bezug auf Aussagen zum erforderlichen Luftwechsel.

Aus Abb. 10-1 wird auch deutlich, dass zwischen Luftwechsel und empfundener Luftqualität kein linearer, sondern ein hyperbelförmiger Zusammenhang besteht. Um im stationären Zustand eine Halbierung der empfundenen Luftqualität zu erreichen, muss der Luftwechsel verdoppelt werden.

Der realisierte Luftwechsel hat einen deutlichen Einfluss auf die Länge der Spülphase, die zum Erreichen des stationären Zustandes erforderlich ist. Während bei einem Luftwechsel von 1 h⁻¹ eine Spülphase von etwa 8 Stunden erforderlich ist, wird der stationäre Wert bei einem 5-fachen Luftwechsel bereits nach etwa 1,7 Stunden erreicht.

Die erforderliche Luftmenge $V_{sp\ddot{u}l}$ zum Weglüften einer Anfangskonzentration C_0 lässt sich aus Gl. 10-5 ermitteln. Wird die Luftmenge auf das Netto-Raumvolumen bezogen, ergibt sich ein Wert, der hier als Luftaustauschzahl bezeichnet wird.

$$\text{Gl. 10-6} \quad \varepsilon_{sp\ddot{u}l} = \frac{V_{sp\ddot{u}l}}{V}$$

mit

$V_{sp\ddot{u}l}$ erforderliches Luftvolumen zum Weglüften einer Anfangskonzentration D_0

$\varepsilon_{sp\ddot{u}l}$ Luftaustauschzahl.

Wird die Verunreinigungslast während der Spülphase vernachlässigt, was aufgrund der hohen Anfangskonzentration durchaus zulässig ist, d. h.

$$G = 0,$$

ergibt sich aus Gl. 10-5 ein Wert für die Luftaustauschzahl entsprechend folgender Beziehung:

$$\text{Gl. 10-7} \quad \varepsilon_{sp\ddot{u}l} = n \cdot t = -\ln\left(\frac{\Delta D}{D_0 - D_A}\right)$$

mit

ΔD zulässige Differenz zwischen empfundener Luftqualität im Raum und der Außenluft zu Beginn der Nutzungszeit in decipol

$D(t) = D_A + \Delta D$ empfundene Luftqualität zu Beginn der Nutzungszeit.

Die Luftaustauschzahl ist somit unter der oben genannten Vereinfachung unabhängig von dem Luftwechsel und der Zeit. Sie wird ausschließlich bestimmt durch die Differenz der Anfangs- und Außenluftbelastung und der zugelassenen Differenz der empfundenen Luftqualität zur Außenluftbelastung. Für das Weglüften einer Anfangskonzentration D_0 ist es unter der oben genannten Vereinfachung unerheblich, ob ein hoher Luftwechsel über eine kurze Zeit oder ein geringer Luftwechsel über eine lange Zeit realisiert wird.

Mit den oben definierten Werten für D_0 und D_a und der Annahme

$$\Delta D = 0,1 \text{ decipol}$$

ergibt sich für den hier betrachteten Fall eine Luftaustauschzahl von

$$\varepsilon_{sp\ddot{u}l} = -\ln\left(\frac{0,1 \text{ decipol}}{73,2 - 0,2 \text{ decipol}}\right) = 6,6.$$

Wird davon ausgegangen, dass in der Spülphase lediglich der hygienisch erforderliche Luftwechsel gefördert wird, kann aus Gl. 10-7 die erforderliche Länge der Spülphase berechnet werden:

Gl. 10-8
$$t_{sp\ddot{u}l} = \frac{\varepsilon_{sp\ddot{u}l} \cdot H_G}{V_{hyg}}$$

Die Länge der morgendlichen Spülphase in Abhängigkeit von dem Abschaltzeitraum zeigt Abb. 10-2. Da aufgrund der oben gemachten Abschätzung in Bezug auf die Verunreinigungslast der Wert von 0,1 olf/m² als hoch angesehen wird, ist die Laufzeit der Lüftungsanlage für unterschiedliche Annahmen für die Verunreinigungslast dargestellt.

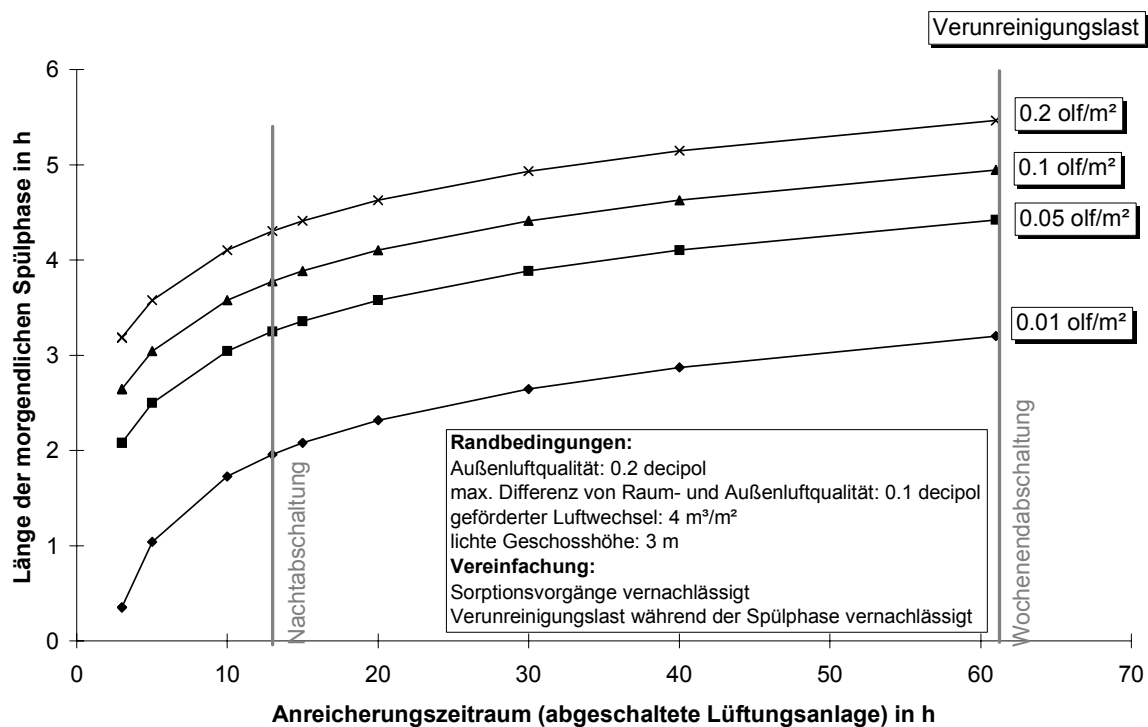


Abb. 10-2: Länge der erforderlichen morgendlichen Spülphase in Abhängigkeit vom Abschaltzeitraum der Lüftungsanlage bei einer Förderleistung der Lüftungsanlage von 4 m³/m²

Die Länge der Spülphase nimmt in logarithmischer Form mit der Abschaltzeit zu. Bereits nach kurzen Abschaltzeiträumen sind relativ lange Spülphasen erforderlich. Nach der 13 Stunden langen Nachtabschaltung beträgt die Spülphase zwischen 2 bis 4,3 Stunden je nach Höhe der Verunreinigungslast. Wegen des größeren Abtransports von Verunreinigungen bei höheren Konzentrationen nimmt die Länge der Spülphase nicht linear mit der Abschaltzeit zu. So ist nach der Wochenendabschaltung von 61 Stunden eine Spülphase von lediglich 3,2 bis 5,5 Stunden erforderlich.

Abb. 10-2 und Gl. 10-5 machen deutlich, dass zwischen Verunreinigungslast und Länge der Spülphase kein linearer, sondern ein logarithmischer Zusammenhang besteht. Auch dies liegt in dem größeren Abtransport von Verunreinigungen bei höheren Verunreinigungslasten, wobei Speichervorgänge nicht berücksichtigt sind.

Über die tatsächliche Verunreinigungslast in Gebäuden gibt es noch keine abgesicherten Erkenntnisse. Auch wenn die in [Recknagel 2000] angegebenen flächenspezifischen Verun-

reinigungslasten von 0,1 bis 0,2 olf/m² für Gebäude mit geringen Verunreinigungen als etwas hoch angesehen wird, wird dies als konservative Annahme für die weiteren Berechnungen unterstellt. Zur Bestimmung der Laufzeit der Lüftungsanlage werden die folgenden Zeiträume für die Spülphase vorgeschlagen.

Abschaltzeitraum	Länge der Spülphase
Nachtabstaltung für 13 Stunden	$t_{NA} = 4$ Stunden
Wochenendabschaltung	$t_{WA} = 5$ Stunden

Tab. 10-1: Vorgeschlagene Standardwerte für die erforderliche Länge der morgendlichen Spülphase

Da die Nutzungszeit konstant ist, verkürzt sich die Abschaltphase um die Länge der Spülphase. In der Berechnung wurde keine entsprechende Korrektur vorgenommen, sondern vereinfachend unterstellt, dass die gesamten Verunreinigungen von 13 Stunden bereits zu Beginn der Spülphase vorliegen. Dies ist erneut eine konservative Annahme.

A-11 BEHEIZBARKEIT VON KRITISCHEN EINZELRÄUMEN

In Abschnitt 5.2 wird zur Berechnung des Mindestdämmstandards der Gebäudehülle eine Bilanz über das gesamte Gebäude erstellt. Natürlich muss die Beheizbarkeit nicht nur für das gesamte Gebäude, sondern auch für jeden Raum im Gebäude gegeben sein. Diese Frage wird in Abschnitt 5.7 diskutiert. Die dort getroffenen Aussagen sind eine Zusammenfassung der im Folgenden durchgeführten detaillierten Untersuchungen.

Um deren Beheizbarkeit zu überprüfen, werden im Folgenden raumweise Betrachtungen angestellt. Dabei werden durch Anwendung von Gl. 5-57 auf die jeweiligen Raumsituationen die Anforderungen an den Mindestdämmstandard bestimmt, die sich aus der raumweisen Betrachtung ergeben. Diese werden verglichen mit dem Mindestdämmstandard aus der gebäudebezogenen Betrachtung.

Besonders kritisch sind Eckräume unter dem Dach bzw. im Erdgeschoss, da diese einen hohen Außenflächenanteil aufweisen. Untersucht wird ein Eckraum unter dem Dach, der als Büro genutzt wird. Entsprechend dem hier unterstellten Lüftungskonzept wird er mit Zuluft versorgt.

Variiert wird die Lage des Raumes im Gebäude und dessen Abmessungen, da hiervon das AV-Verhältnis und damit der Wert für U_{max} abhängen. Betrachtet werden ein längs- und ein stirnseitig angeordneter Büroraum.

Ebenfalls variiert wird die Fensterfläche des Raumes. Da der U-Wert der Fenster um ein Mehrfaches über dem der opaken Bauteile liegt, beeinflusst die Fensterfläche den Ist-Wert von U_{ges} . Gleichzeitig werden durch die Fensterfläche die solaren Einträge und damit U_{max} verändert.

A-11.1 Randbedingungen

Grundlage für die Berechnungen ist das in Abschnitt 4.1 beschriebene Beispielgebäude sowie die in Abschnitt 5.4.1 definierten Randbedingungen.

Als interne Wärmequellen wurde in den bisherigen gebäudebezogenen Berechnungen ein Mittelwert von

$$\bar{q}_{int} = 2,1 \frac{W}{m^2_{BGF}}$$

angesetzt. Da die Bürofläche nur 48 % der Brutto-Grundfläche beträgt, die wesentlichen Wärmequellen aber in den Büros auftreten, müsste bei der raumweisen Betrachtung der Wärmestrom durch interne Lasten in den Büros etwa doppelt so hoch angesetzt werden. Darauf wird in den folgenden Berechnungen verzichtet. Damit wird ein Büro mit nur geringen internen Wärmequellen betrachtet.

Da es sich um einen Zulufttraum handelt, werden 100 % der Netto-Fläche des Raumes mit Zuluft versorgt. Der Hauptnutzflächenfaktor ζ ergibt sich somit aus dem Verhältnis von Netto- zu Brutto-Grundfläche des Raumes.

Die solaren Einträge \bar{q}_{sol} werden abhängig von der Fensterfläche ermittelt, wobei wie in bisherigen Berechnungen ein Fensterflächenanteil von 40 % bezogen auf die Innenfläche der Außenwand angesetzt wird. Der Wärmestrom durch solare Einträge wird für die jeweiligen Raumsituationen individuell bestimmt.

Die U-Werte der Außenbauteile werden aus der gebäudebezogenen Betrachtung ermittelt, so dass die Winterbedingung erfüllt wird. Für den untersuchten Fall beträgt das A/V-Verhältnis des Beispielgebäudes

$$A/V\text{-Verhältnis: } 0,33 \text{ m}^{-1}.$$

Damit berechnet sich ein Wert für den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle von

$$U_{max} = 0,31 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

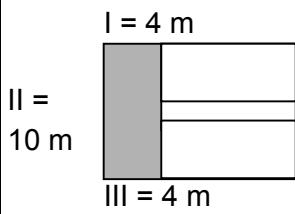
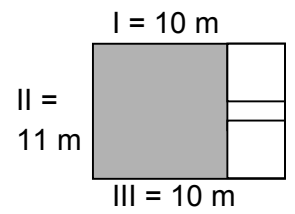
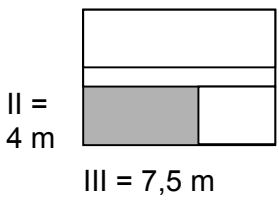
Um diesen Wert zu realisieren, sind beispielsweise folgende Dämmstoffdicken erforderlich.

Bauteil	Dämmstoffdicke	U-Wert
Außenwand	18 cm	2,1 W/(m ² K)
Dach	30 cm	0,13 W/(m ² K)
Kellerdecke	10 cm	0,33 W/(m ² K)
Fenster	g _⊥ -Wert: 0,49	0,78 W/(m ² K)

Tab. 11-1: Mögliche Ausprägung des Dämmstandards der Außenbauteile beim Beispielgebäude als Ergebnis der gebäudebezogenen Betrachtung

A-11.2 Berechnung

Die untersuchten Raumsituationen, die über Gl. 5-57 ermittelten Grenzwerte U_{max} (Raum) und der Ist-Wert von U_{ges} (Raum) zeigt Tab. 11-2.

	Stirnraum-Rechteck		Stirnraum-Quadrat		Längsraum-Rechteck	
						
AV-Verhältnis in m^{-1}	0,75		0,60		0,69	
Fenster in Seiten	I, III	I, II, III	I, II	I, II, III	III	II, III
Grenzwert: U_{max} in $W/(m^2K)$	0,24	0,26	0,30	0,31	0,26	0,28
Ist-Wert: U_{ges} in $W/(m^2K)$	0,24	0,27	0,24	0,27	0,25	0,29
Beheizbarkeit gegeben?	ja	nein	ja	ja	ja	nein

Tab. 11-2: Beheizbarkeit eines Eckraums bei unterschiedlicher geometrischer Ausgestaltung

Es wird deutlich, dass einzelne kritische Räume gesondert überprüft werden müssen, auch wenn die Winter-Kenngröße für das gesamte Gebäude erfüllt ist. Bei ungünstigen Randbedingungen können sich aus der raumweisen Betrachtung höhere Anforderungen an U_{ges} ergeben als für das gesamte Gebäude. Es zeigt sich auch, dass die raumweise Situation entscheidend über den Grundriss, d. h. den architektonischen Entwurf, beeinflusst und somit entschärft werden kann. Im Folgenden werden einige Einflussparameter diskutiert.

Positiv wirkt sich ein geringes AV-Verhältnis aus. Dies wird umso günstiger, je größer der Eckraum ist.

Die Größe der Fensterfläche des Raumes beeinflusst neben U_{max} vor allem den Ist-Wert von U_{ges} . Die Fensterfläche ist damit eine weitere Größe, über die die Beheizbarkeit der Eckräume sichergestellt werden kann, wobei sich eine Reduktion der Fensterfläche positiv auswirkt.

In den bisherigen raumweisen Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die den betrachteten Raum umgebenden Nachbarräume die gleiche Temperatur aufweisen. Tritt eine

Temperaturdifferenz zu den Nachbarräumen auf, ergeben sich zusätzliche interne Wärmeströme. Diese müssen in der Bilanz berücksichtigt werden. Kritisch sind Nachbarräume mit niedrigerer Temperatur. Dies ist im praktischen Betrieb insbesondere dann der Fall, wenn der Eckraum nicht von Büros, sondern von Nebenräumen umgeben ist. Ob die Beheizbarkeit in dem Fall noch gegeben ist, muss individuell überprüft werden. Günstiger ist es jedoch, wenn über die Grundrissgestaltung sichergestellt wird, dass kritische Räume möglichst nicht von Nebenräumen (Ablufträumen) umgeben werden.

Eine weitere in der Praxis sicherzustellende Annahme ist die Temperaturdifferenz von Zuluft- und Raumlufttemperatur von 30 Kelvin. Insbesondere die Dachräume liegen weit entfernt von der Lüftungszentrale im Keller. Auf diesem Weg ergeben sich Wärmeverluste von den Lüftungskanälen an die Umgebung. Eine Möglichkeit, die entsprechende Zulufttemperatur sicherzustellen, besteht darin, Nachheizregister vorzusehen. Diese wurden in den bisher realisierten Modellprojekten ohnehin zur zonenweisen Temperaturregelung eingebaut.

Die kritischen Räume sollten möglichst als Zulufräume ausgestaltet werden. Da den Ablufträumen bei dem hier angenommenen Lüftungskonzept nur indirekt Heizleistung zugeführt werden kann, ist die Beheizbarkeit erschwert und muss individuell überprüft werden.

A-11.3 Fazit

Auch wenn die Winterbedingung bei der gebäudebezogenen Betrachtung erfüllt ist, muss die Beheizbarkeit von besonders kritischen Räumen individuell überprüft werden. Die Beheizbarkeit der kritischen Räume kann durch die Grundrissgestaltung positiv beeinflusst bzw. sichergestellt werden. Günstig wirken sich folgende Punkte aus:

- kritische Räume als Zulufräume (z. B. Büros) ausgestalten
- keine angrenzenden Nebenräume (Ablufträume) mit geringerer Temperatur
- größere, möglichst quadratische Räume
- keine übermäßigen Fensterflächen.

Trotz dieser im Einzelfall höheren Anforderung an kritische Räume wird der Dämmstandard der Gebäudehülle weiterhin aus der gebäudebezogenen Betrachtung abgeleitet, da dieser den zukünftigen Heizenergieverbrauch bestimmt. Die Beheizbarkeit der kritischen Räume muss gegebenenfalls über die Grundrissgestaltung sichergestellt werden.

A-12 DYNAMISCHE AUFHEIZLAST BEI INTERMITTIERENDEM HEIZBETRIEB

Die Winter-Bedingung (Abschnitt 5.1) impliziert durch die Beschränkung der Beheizung auf den hygienisch erforderlichen Mindestluftvolumenstrom einen intermittierenden Betrieb der Lüftungsanlage und damit auch der Heizung. Sie setzt also eine Nacht- und Wochenendabschaltung voraus.

Für den praktischen Gebäudebetrieb muss sichergestellt sein, dass zu jedem Zeitpunkt der Nutzungszeit die erforderliche Raumtemperatur erreicht werden kann. Eine Nacht- oder Wochenendabschaltung kann somit nur realisiert werden, wenn ein Aufheizen des ausgekühlten Gebäudes am Morgen mit der verfügbaren Heizleistung möglich ist.

Die Frage, ob und unter welchen Randbedingungen ein solches morgendliches Aufheizen des Gebäudes mit dem hygienischen Außenluftvolumenstrom möglich ist, wird in Abschnitt 5.7.2 behandelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden dort jedoch nur die Ergebnisse der im Folgenden durchgeführten Berechnungen dargestellt.

Um zu überprüfen, ob ein Gebäude nach einer Nacht- oder Wochenendabschaltung der Lüftungs-/Heizungsanlage mit dem hygienischen Mindestluftwechsel aufgeheizt werden kann, wird im Folgenden das Auskühlverhalten und die sich daraus ergebende dynamische Aufheizlast für Gebäude mit unterschiedlicher wirksamer Speicherkapazität berechnet. Es wird dargestellt, welche Luftwechsel in der Aufheizphase bei unterschiedlich langen Aufheizzeiträumen erforderlich sind.

Obwohl diese Frage gut mit dynamischen Simulationsrechnungen untersucht werden könnte, wird für die Bestimmung der dynamischen Aufheizlast ein Ansatz gewählt, der

- das Auskühlverhalten über einen instationären aber quasistatischen Ansatz,
- die dynamische Aufheizlast über eine analytische Lösung der partiellen Differentialgleichung (Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung)

beschreibt. In Abgrenzung zu den dynamischen Simulationsrechnungen wird dieser Ansatz im Folgenden als „analytischer Ansatz“ bezeichnet. Grund für die Ableitung des analytischen Ansatz ist, dass die dynamische Aufheizlast im Rahmen der Gebäudeplanung bestimmt werden muss, wenn eine Luftheizung realisiert werden soll. Die Untersuchung stellt also eine Konkretisierung der Winter-Bedingung dar. Da für die Winter-Kenngröße ein Berechnungsverfahren gewählt wurde, das deutlich unter dem Niveau einer dynamischen Simulation liegt, soll auch für die Ermittlung der dynamischen Aufheizlast ein analytischer Ansatz gesucht werden. Gelingt dies und bildet dieser Ansatz die realen Verhältnisse mit hinreichender Genauigkeit ab, kann bei der Planung auf den Einsatz von dynamischen Simulationsrechnungen verzichtet werden. Zudem kann der analytische Ansatz gegebenenfalls auch bei der Quantifizierung einer Sommer-Kenngröße herangezogen werden.

A-12.1 Berechnung des Auskühlverhaltens

In einem ersten Schritt muss berechnet werden, bis auf welche Temperatur ein Gebäude bei abgeschalteter Lüftungs- und damit Heizungsanlage auskühlt. Eine wichtige Größe zur Beschreibung des Temperatur- und damit auch des Auskühlverhaltens ist die Zeitkonstante. Die Herleitung soll für den Fall der quasistatischen, instationären Wärmeleitung aufgezeigt werden [Elsner 93]. Betrachtet wird ein Körper, z. B. eine Wand, die mit der Umgebung im Wärmeaustausch steht. Eine quasistatische Betrachtung setzt voraus, dass sich der Körper im thermischen Gleichgewicht befindet, d. h. eine einheitliche, ortsunabhängige Temperatur T_W aufweist. Weiter wird davon ausgegangen, dass sich die Temperatur der Umgebung nicht ändert: $T_A = \text{konstant}$ ($C_U \gg C_W$).

Die Annahme einer einheitlichen ortsunabhängigen Gebäudetemperatur stellt eine Vereinfachung dar. Diese kann für den vorliegenden Fall akzeptiert werden, da der Auskühlvorgang bei abgeschalteter Lüftungsanlage langsam vor sich geht und somit keine großen Temperaturgradienten innerhalb des Gebäudes auftreten. Die mittlere Gebäudetemperatur entspricht dabei nicht der Lufttemperatur sondern der mittleren Temperatur der Speichermassen während der Nutzungszeit.

Für eine Wärmezufuhr in die oben erwähnte Wand mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten U gilt nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$\text{Gl. 12-1} \quad C \frac{d\Theta}{dt} = -U \cdot A \cdot \Theta$$

mit

U Wärmedurchgangskoeffizient

A Fläche

$$\Theta = T_W - T_A$$

T_W Wandtemperatur

$$C = m \cdot c_p$$

m Masse

c_p spezifische Wärmekapazität

Integriert man diese Gleichung zwischen dem Anfangszustand t_0 mit $\Theta_0 = T_{W,0} - T_A$ bis zu einem beliebigen Zeitpunkt t mit $\Theta_t = T_{W,t} - T_A$, ergibt sich nach Variablentrennung

$$\text{Gl. 12-2} \quad \int_{\Theta_0}^{\Theta_t} \frac{d\Theta}{\Theta} = -\frac{U \cdot A}{C} \cdot \int_{t_0}^t dt$$

bzw.

$$\ln \frac{\Theta_t}{\Theta_0} = -\frac{U \cdot A}{C} \cdot \Delta t.$$

Für die gesuchte Übertemperatur des Körpers erhält man daraus

$$\text{Gl. 12-3} \quad \Theta_t = \Theta_0 \cdot \exp\left(-\frac{U \cdot A}{C} \cdot \Delta t\right).$$

Führt man die thermische Zeitkonstante

$$\text{Gl. 12-4} \quad \tau = \frac{C}{U \cdot A}$$

ein, ergibt sich die Grundgleichung für das Zeitverhalten eines Körpers beim Aufheizen oder Abkühlen:

$$\text{Gl. 12-5} \quad \Theta_t = \Theta_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right).$$

Die Temperatur des Körper $T_{W,t}$ nach einer Zeit Δt kann nach Gl. 12-5 wie folgt berechnet werden:

$$\text{Gl. 12-6} \quad T_{W,t} = T_A + \Theta_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right).$$

Wird auf die Vereinfachung eines quasistatischen Körpers mit einer einheitlichen mittleren Temperatur verzichtet, ergibt sich eine partielle Differentialgleichung zur Beschreibung des nun zeitlich und örtlich veränderlichen Temperaturfeldes im Körper. Ein derartiger Ansatz wird in Abschnitt 12.2 besprochen. Zunächst wird jedoch die Ermittlung der Zeitkonstanten von Gebäuden diskutiert.

Bestimmen der Zeitkonstante

Zur Berechnung der Zeitkonstanten muss die Speicherkapazität bestimmt werden, die in dem betrachteten Zeitintervall eine thermische Änderung erfährt und so das thermische Verhalten beeinflusst. Diese wird als wirksame Speicherkapazität C bezeichnet. Allgemein berechnet sich die wirksame Speicherkapazität eines Bauteils j nach folgender Beziehung:

$$\text{Gl. 12-7} \quad C = A_j \cdot d_{W,j} \cdot c_{P,j} \cdot \rho_j$$

mit

$d_{W,j}$ thermisch wirksame Dicke des Bauteils j

ρ Dichte.

Die wirksame Bauteildicke d_w und damit die wirksame Speicherkapazität hängt von der Art der Temperaturänderung und dem Zeitintervall ab. Das hier betrachtete Auskühlen des Gebäudes kann idealisiert als sprunghafte Änderung der Umgebungstemperatur angenommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass vor dem Temperatursprung die Speichermassen des Gebäudes eine einheitliche Temperatur aufweisen. Diese entspricht in dem hier betrachteten Fall der Raumtemperatur, da die aktiven Speichermassen durch die Heizungsanlage auf dieser Temperatur gehalten werden (Temperaturgradienten in den Bauteilen und Differenz zwischen Luft- und Oberflächentemperatur werden vernachlässigt). Im vorliegenden Gedankenexperiment entspricht die Umgebungstemperatur vor dem Temperatursprung fiktiv der Raumsolltemperatur.

Das Abschalten der Heizungsanlage wird nun als Temperatursprung interpretiert, d. h. die Umgebungstemperatur sinkt sprunghaft von der Raumsolltemperatur auf den angenommenen Wert der Außentemperatur. Aufgrund der sich nun einstellenden Wärmeverluste über die Gebäudehülle und Undichtheiten kühlt das Gebäude aus.

Zur Quantifizierung der thermisch aktiven und damit wirksamen Speichermassen muss zwischen Außen- und Innenbauteilen unterschieden werden. Die gesamte wirksame Speicherkapazität des Gebäudes ergibt sich als Summe dieser beiden:

$$\text{Gl. 12-8} \quad C_{ges} = C_a + C_i.$$

Außenbauteile

Da der Wärmestrom aus dem Gebäude über die Außenbauteile an die Umgebung erfolgt, ist bei Annahme einer einheitlichen Bauteiltemperatur (quasistatischer Ansatz) die gesamte Speichermasse der Außenbauteile aktiv.

In der Realität weisen die Außenbauteile keine einheitliche Temperatur auf. Im Gegenteil fällt an ihnen die gesamte Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Umgebungstemperatur ab. Der Temperaturabfall konzentriert sich dabei im Wesentlichen auf die Dämmebene, insbesondere bei den hier betrachteten außenseitig hoch wärmegeämmten Bauteilen (siehe Abb. 12-1). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden in den folgenden Berechnungen für Außenbauteile nur die Bauteilschichten bis zur wesentlichen Dämmebene als thermisch wirksam angesetzt.

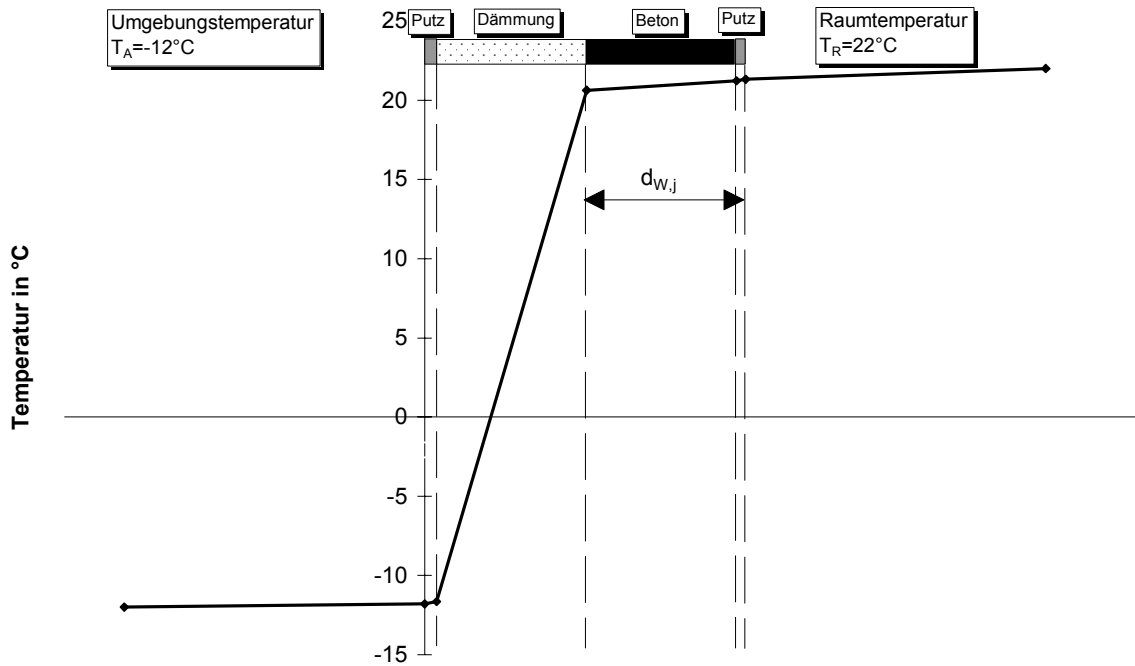


Abb. 12-1: Temperaturverlauf in einer gut gedämmten Außenwand

Die wirksame Speicherkapazität des Außenbauteils j $C_{a,j}$ ergibt sich damit zu

$$\text{Gl. 12-9} \quad C_{a,j} = \sum_j A_j \cdot d_{W,j} \cdot c_{p,j} \cdot \rho_j,$$

wobei für $c_{p,j}$ und ρ_j Mittelwerte von $d=0$ bis $d=d_W$ angesetzt werden.

Innenbauteile

In Bezug auf die Innenbauteile kann der intermittierende Betrieb der Lüftungsanlage und das sich daraus ergebende Auskühlen des Gebäudes als periodische Anregung angesehen werden. Hierbei ist nicht die gesamte Speichermasse der Innenbauteile aktiv. Je nach Periodendauer und Temperaturleitfähigkeit (Maß für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Temperaturänderung) ergeben sich unterschiedliche Eindringtiefen und damit unterschiedliche Werte für die Zeitkonstante des Gebäudes. Die Eindringtiefe wird dabei umso größer, je länger die Periodendauer und je größer die Temperaturleitfähigkeit ist.

Die maximale Temperaturamplitude θ_{\max} in einer einseitig unendlich ausgedehnten Platte bei periodischer Änderung (t_p = Periodendauer) der Oberflächentemperatur (Randbedingung 1. Art) mit der Amplitude θ_A ergibt sich nach [Elsner 93] in der Entfernung x von der Oberfläche zu

$$\text{Gl. 12-10} \quad \theta_{\max} = \theta_A \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{t_p \cdot \lambda}} \cdot x\right) = \theta_A \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{t_p \cdot a}} \cdot x\right)$$

mit

θ_A	Temperaturamplitude an der Oberfläche
θ_{\max}	maximale Temperaturamplitude in Entfernung x von der Oberfläche
t_p	Periodendauer
λ	Wärmeleitfähigkeit
x	Abstand von der Oberfläche
$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$	Temperaturleitfähigkeit.

Der Ort x_E , an dem eine vorgegebene Amplitude θ_{\max} in der Platte auftritt, berechnet sich demnach zu

Gl. 12-11

$$x_E = \sqrt{\frac{t_p \cdot \lambda}{\pi \cdot \rho \cdot c_p}} \cdot \ln \frac{\theta_A}{\theta_{\max}}$$

Die Eindringtiefe σ wird definiert als der Abstand zur Oberfläche, bei dem sich folgendes Amplitudenverhältnis einstellt:

Gl. 12-12 $\ln \frac{\theta_A}{\theta_{\max}} = 1$ bzw. $\theta_{\max} = \frac{\theta_A}{e^1}$

Die Eindringtiefe σ berechnet sich zu:

Gl. 12-13 $\sigma = \sqrt{\frac{t_p \cdot \lambda}{\pi \cdot \rho \cdot c_p}}$

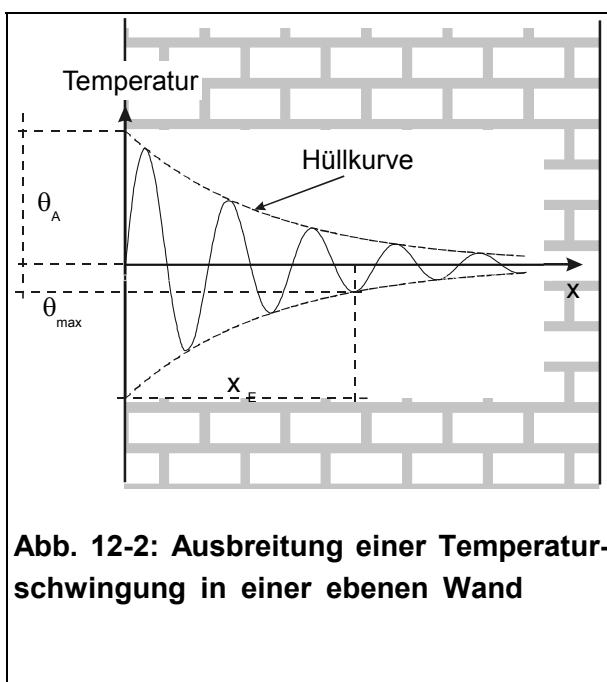
mit

σ Eindringtiefe bei periodischer Anregung.

Die Eindringtiefe σ entspricht damit dem Abstand von der Oberfläche, bei dem die Amplitude der Störung auf den Wert $\frac{1}{e}$ gesunken ist. Nach [Keller 1998] ergibt sich hieraus die thermisch wirksame Dicke eines Innenbauteils zu

Gl. 12-14 $d_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sigma$

Für eine einseitig unendlich ausgedehnte Platte aus Beton ergibt sich der in Abb. 12-3 dargestellte Verlauf der thermisch wirksamen Dicke in Abhängigkeit von der Periodendauer.



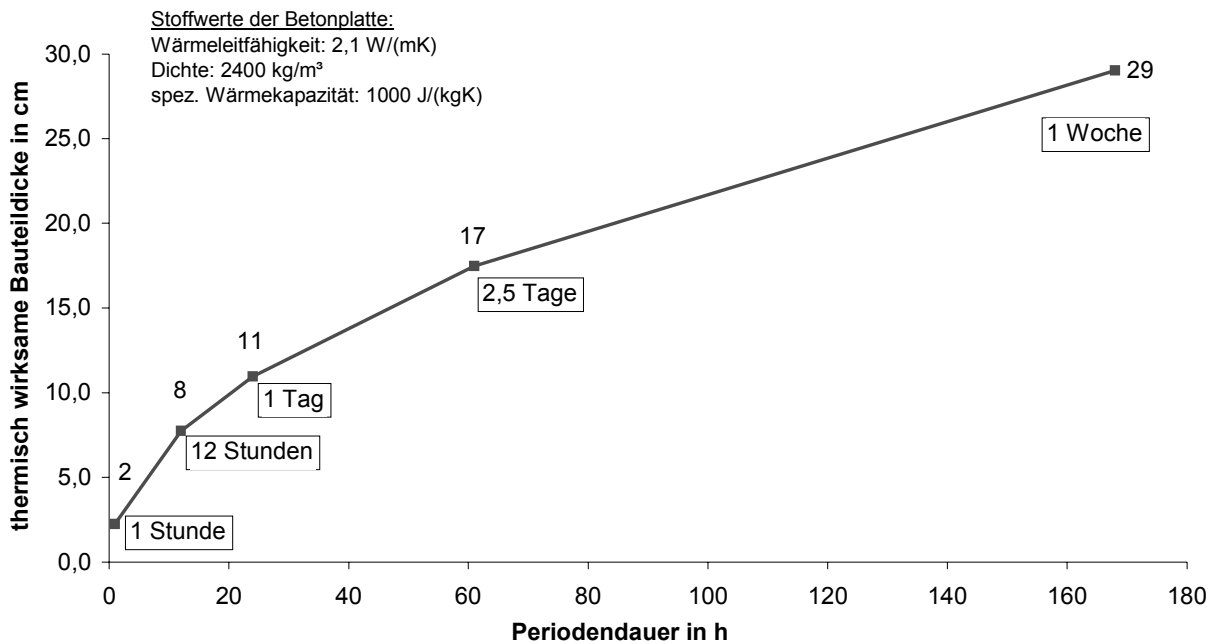


Abb. 12-3: Thermisch wirksame Dicke einer Betonplatte bei periodischer Anregung

Aus Gl. 12-9, Gl. 12-13 und Gl. 12-14 berechnet sich die wirksame Speicherkapazität des Innenbauteils j zu

$$\text{Gl. 12-15} \quad C_{i,j} = \frac{\sum_j A_j \cdot \sqrt{\lambda_j \cdot c_{p,j} \cdot \rho_j}}{\sqrt{\omega}}$$

mit

ω als Kreisfrequenz der äußeren Anregung.

Der Ausdruck $\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$ wird als Wärmeeindringkoeffizient bezeichnet. Die wirksame Speicherkapazität der Innenbauteile und damit auch die Zeitkonstante ist abhängig von der Periodendauer bzw. der Kreisfrequenz der äußeren Anregung und dem Wärmeeindringkoeffizienten.

A-12.2 Berechnung der dynamischen Aufheizlast

In der vergleichsweise kurzen morgendlichen Aufheizzeit ergeben sich deutliche Temperaturgradienten zwischen Raumtemperatur T_R , Oberflächentemperatur T_O sowie einer weiter unten definierten kalorischen mittleren Bauteiltemperatur T_M . Im Unterschied zum Auskühlen des Gebäudes, bei dem wegen der geringen Temperaturunterschiede mit einem quasistatischen Ansatz gerechnet werden konnte, müssen bei der Ermittlung der Aufheizlast dynamische Effekte berücksichtigt werden.

Das zeitlich und örtlich veränderliche Temperaturfeld eines Körpers wird durch die Fouriersche Differentialgleichung mit den dazugehörigen Randbedingungen beschrieben. Für den Fall der eindimensionalen Wärmeleitung in einem homogenen, isotropen Körper mit zeitlich unveränderlichen Stoffwerten lautet diese

$$\text{Gl. 12-16} \quad \frac{dT}{dt} = a \cdot \frac{d^2T}{dx^2}.$$

Für Fragestellungen mit komplizierteren Rand- oder Anfangsbedingungen kann die Fouriersche Differentialgleichung heute durch numerische Verfahren wie Differenzenverfahren oder Finite Elemente-Verfahren gelöst werden.

Die analytische Integration dieser partiellen Differentialgleichung gelingt in der Regel nur für einfache Körper und einfache Anfangs- und Randbedingungen. Da hieraus jedoch gewisse systematische Aussagen abgeleitet werden können, sind eine Reihe von analytischen Lösungen entwickelt worden. Für die Berechnung des Aufheizvorgangs wird im Folgenden eine Näherungsmethode nach [Schlünder 1981] verwendet, die auch im [VDI-Wärmeatlas] zu finden ist.

Der hier zu untersuchende dynamische Aufheizvorgang wird als einmalige sprunghafte Änderung der Raumtemperatur von T_{Anf} auf T_{Spr} angesehen. Bei der Näherungsmethode wird nicht das gesamte Temperaturfeld des Körpers berechnet, sondern lediglich eine mittlere kalorische Bauteiltemperatur T_M , die wie folgt definiert ist:

$$\text{Gl. 12-17} \quad T_M \equiv \frac{\int_V (\rho \cdot c_p \cdot T) dV}{\int_V (\delta \cdot c_p) dV}$$

mit
 T_M mittlere kalorische Bauteiltemperatur.

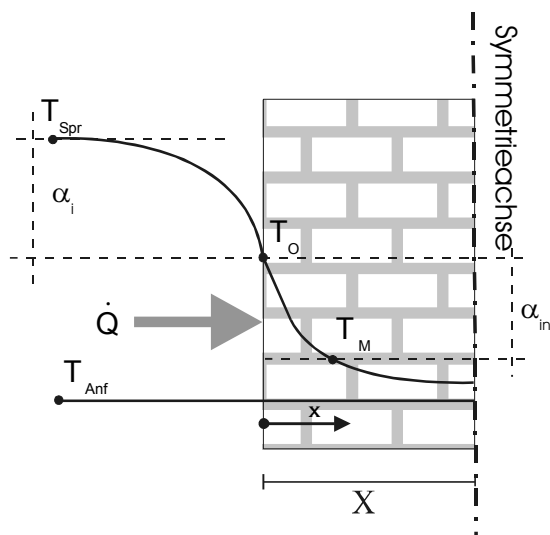


Abb. 12-4: Schematische Darstellung des Aufheizvorgangs

Es wird dabei von identischen Randbedingungen an beiden Bauteiloberflächen ausgegangen und nur die Situation bis zur Symmetrieachse (halbes Bauteil) betrachtet.

Der Zusammenhang zwischen Wärmestrom, mittlerer kalorischer Bauteiltemperatur und Oberflächentemperatur T_O wird beschrieben, indem ein fiktiver interner Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{int}}(t)$ definiert wird:

$$\text{Gl. 12-18} \quad -\dot{Q} \equiv \alpha_{\text{int}}(t) \cdot A \cdot (T_M - T_O)$$

mit

T_O Oberflächentemperatur
 $\alpha_{\text{int}}(t)$ interner Wärmeübergangskoeffizient.

Das negative Vorzeichen des Wärmestroms ergibt sich aus der hier gewählten Vorzeichenkonvention (Abschnitt 4.1.4). Zusammen mit dem inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i

$$\text{Gl. 12-19} \quad -\dot{Q} = \alpha_i \cdot A \cdot (T_O - T_{Spr})$$

mit

T_{Spr} Lufttemperatur nach Temperatursprung,

kann der zeitabhängige Speicherkoeffizient $K(t)$ bestimmt werden:

$$\text{Gl. 12-20} \quad K(t) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{int}}(t)}}.$$

Über $K(t)$ wird der Wärmestrom aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur nach dem Temperatursprung und mittlerer kalorischer Bauteiltemperatur beschrieben. Unter Berücksichtigung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik kann geschrieben werden:

$$\text{Gl. 12-21} \quad -\dot{Q} = K(t) \cdot A \cdot (T_M - T_{Spr}) = -\rho \cdot c_P \cdot V_S \frac{dT_M}{dt}$$

mit

V_S Volumen des Bauteils bis zum Temperatur-Symmetriezentrum.

Nach Variablentrennung ergibt sich analog der in Abschnitt 12.1 dokumentierten Herleitung

$$\text{Gl. 12-22} \quad \frac{dT_M}{T_M - T_{Spr}} = -\frac{K(t) \cdot A}{\rho \cdot c_P \cdot V_S} \cdot dt$$

$$\text{Gl. 12-23} \quad \int_{T_M(t_0)}^{T_M(t_{AH})} \frac{1}{T_M - T_{Spr}} \cdot dT_M = \int_{t_0}^{t_{AH}} -\frac{K(t) \cdot A}{\rho \cdot c_P \cdot V_S} \cdot dt$$

mit

t_{AH} Aufheizzeitraum.

$\alpha_{\text{int}}(t)$ und damit auch $K(t)$ sind zeitabhängig. Für die Bestimmung der mittleren Aufheizlast interessiert jedoch der integrale Mittelwert des Wärmeübergangskoeffizienten über die Aufheizzeit:

$$\text{Gl. 12-24} \quad \alpha_{\text{int},AH} \equiv \frac{1}{t} \cdot \int_0^{t_{AH}} \alpha_{\text{int}}(t) dt$$

mit

$\alpha_{\text{int},AH}$ über den Aufheizzeitraum gemittelter interner Wärmeübergangskoeffizient.

$$\text{Gl. 12-25} \quad K_{AH} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{int},AH}}}$$

mit

K_{AH} über den Aufheizzeitraum gemittelter Speicherkoeffizient.

Für eine gegebene Aufheizzeit sind $\alpha_{\text{int},AH}$ und K_{AH} damit konstant. Gl. 12-23 kann integriert werden und es ergibt sich:

$$\text{Gl. 12-26} \quad \frac{T_{M,AH} - T_{Spr}}{T_{Anf} - T_{Spr}} = \exp\left(-\frac{K_{AH} \cdot A}{\rho \cdot c_P \cdot V_S} \cdot t_{AH}\right)$$

$$\text{Gl. 12-27} \quad T_{M,AH} = T_{Spr} + (T_{Anf} - T_{Spr}) \cdot \exp\left(-\frac{K_{AH} \cdot A}{\rho \cdot c_P \cdot V_S} \cdot t_{AH}\right)$$

mit

T_{Anf} Bauteiltemperatur vor Temperatursprung

$T_{M,AH}$ mittlere kalorische Bauteiltemperatur am Ende der Aufheizzeit.

Die einzige Unbekannte in Gl. 12-27 ist der über den Aufheizzeitraum gemittelte Speicherkoeffizient K_{AH} . Ist K_{AH} bekannt, kann über Gl. 12-27 $T_{M,AH}$ bestimmt werden. Unter Verwendung von Gl. 12-21 ergibt sich der über t_{AH} gemittelte zu- bzw. abgeführte Wärmestrom zu

$$\text{Gl. 12-28} \quad \dot{Q}_{AH} = \rho \cdot c_P \cdot V_S \cdot \frac{T_{M,AH} - T_{Anf}}{t_{AH}} .$$

Bezogen auf einen m² Bauteilfläche beträgt der Wärmestrom entsprechend:

$$\text{Gl. 12-29} \quad \dot{q}_{AH} = \rho \cdot c_p \cdot X \cdot \frac{T_{M,AH} - T_{Auf}}{t_{AH}}$$

mit

- \dot{q}_{AH} über den Aufheizzeitraum gemittelter Wärmestrom in das Bauteil bezogen auf die Bauteilfläche
 X Abstand des Temperatur-Symmetriezentrums eines Bauteils von der Oberfläche.

Die Fragestellung reduziert sich somit auf die Bestimmung K_{AH} und hierbei auf $\alpha_{\text{int},AH}$. Die Berechnung muss wegen der speziellen Definition von $\alpha_{\text{int},AH}$ (siehe Gl. 12-18) nur für die Randbedingung erster Art erfolgen. Es werden zunächst getrennte Lösungen für lange und kurze Aufheizzeiten angegeben.

Lange Aufheizzeiten

Weit verbreitet ist die Lösung von [Gröber 1933]. Hierbei wird zunächst die Anzahl der Variablen durch die Einführung dimensionsloser Größen reduziert. Die dimensionslose Form der Fourierschen Differenzialgleichung

$$\text{Gl. 12-30} \quad \frac{d\theta_N}{dFo} = \frac{d^2\theta_N}{d\xi_{Sym}^2}$$

kann mit einem Produktansatz gelöst werden. Dieser führt auf eine transzendente Gleichung, deren Lösung sich als Summe der Eigenwerte ergibt. Die Anzahl der zu summierenden Eigenwerte wird durch die Fehlergrenzen bestimmt, wobei die Anzahl der erforderlichen Summanden mit zunehmender Zeit abnimmt. Für Werte der Fourier-Zahl (dimensionslose Zeit) von

$$\text{Gl. 12-31} \quad Fo > 0,5$$

reicht in der Regel schon die Bestimmung des ersten Summanden der Reihe, der mit dem ersten Eigenwert gebildet wird. Für die Randbedingungen 1. Art ergibt sich für lange Zeiten

$$\text{Gl. 12-32} \quad \alpha_{\text{int},\infty} = \frac{\pi^2 \cdot \lambda}{4 \cdot X}$$

Der interne Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{int},\infty}$ ist damit unabhängig von der Zeit, proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ und umgekehrt proportional vom Abstand zum Symmetriezentrum X .

Kurze Aufheizzeiten

Für kurze Zeiten, d. h. kleine Werte der Fourier-Zahl, nimmt die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenwerte stark zu, weswegen der Ansatz von Gruber für diesen Bereich nur mit großem Rechenaufwand angewandt werden kann. Zur Bestimmung des internen Wärmeübergangskoeffizienten für kurze Zeiten $\alpha_{\text{int},0}$ wird daher ein anderer Lösungsansatz verwendet, der in [Elsner 93] dargestellt ist. Er beruht auf der Idee, die Orts- und die Zeitvariable zu einer gemeinsamen dimensionslosen Variablen zusammenzufassen. $\alpha_{\text{int},0}$ ergibt sich daraus nach der Beziehung

$$\text{Gl. 12-33} \quad \alpha_{\text{int},0} = \frac{2 \cdot \lambda}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot t_{AH}}}.$$

Wird die Temperaturleitfähigkeit a in Gl. 12-33 ausgeschrieben, folgt für den internen Wärmeübergangskoeffizienten

$$\text{Gl. 12-34} \quad \alpha_{\text{int},0} = \frac{2 \cdot \lambda}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot t_{AH}}} = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot t_{AH}}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}.$$

Der interne Wärmeübergangskoeffizient und damit auch der Wärmestrom für kurze Zeiten verändern sich damit umgekehrt proportional zur Zeit und proportional zum Wärmeeindringkoeffizienten $\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$.

Alle Aufheizzeiten

Für den gesamten Bereich der Fourier-Zahl, d. h. für alle Zeiten, lässt sich nach [VDI Wärmeatlas] α_{int} als quadratischer Mittelwert aus $\alpha_{\text{int},\infty}$ und $\alpha_{\text{int},0}$ beschreiben:

$$\text{Gl. 12-35} \quad \alpha_{\text{int},AH} = \sqrt{\alpha_{\text{int},\infty}^2 + \alpha_{\text{int},0}^2}.$$

Damit ist die gesuchte Berechnungsvorschrift für $\alpha_{\text{int},AH}$ gegeben. Nach [Schlünder 1981] ist die Abweichung von Gl. 12-27 gegenüber der exakten Lösung stets kleiner als ± 4 Prozent.

Der auf die Bauteilfläche bezogene aufgenommene bzw. abgegebene Wärmestrom ergibt sich damit aus Gl. 12-29 über folgende Beziehung

Gl. 12-36

$$\dot{q}_{AH} = \rho \cdot c_P \cdot X \frac{T_{Spr} - T_{Anf} + (T_{Anf} - T_{Spr}) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i + \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^4 \cdot \lambda^2}{16 \cdot X^2} + \frac{4 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c_P}{\pi \cdot t_{AH}}}}} \cdot t_{AH}\right)}{\rho \cdot c_P \cdot X} \cdot t_{AH}}{t_{AH}}.$$

Wird für den Aufheizvorgang eine von der Aufheizzeit abhängige „Zeitkonstante“ $\tau_{AH}(t_{AH})$ entsprechend

$$\text{Gl. 12-37} \quad \tau_{AH}(t_{AH}) = \frac{\rho \cdot c_P \cdot X}{\frac{1}{\alpha_i + \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^4 \cdot \lambda^2}{16 \cdot X^2} + \frac{4 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c_P}{\pi \cdot t_{AH}}}}}}$$

definiert, vereinfacht sich Gl. 12-36 zu

$$\text{Gl. 12-38} \quad \dot{q}_{AH} = \rho \cdot c_P \cdot X \frac{\left[T_{Spr} - T_{Anf} + (T_{Anf} - T_{Spr}) \exp\left(-\frac{t_{AH}}{\tau_{AH}(t_{AH})}\right) \right]}{t_{AH}}.$$

A-12.3 Kopplung der Berechnung von Auskühlverhalten und Aufheizlast

Die Verbindung von Auskühl- und Aufheizvorgang ergibt sich aus der Tatsache, dass die Temperatur am Ende des Auskühlvorgangs T_{AK} dem Startzustand für den Aufheizvorgang T_{Anf} entspricht. Angehoben wird die Temperatur in der Aufheizzeit auf den Sollwert der Raumtemperatur und damit auf die Ausgangstemperatur des Auskühlvorgangs. Es ergibt sich folgende Beziehung:

$$T_{Anf} = T_{AK}$$

$$T_{Spr} = T_R.$$

Die Auskühltemperatur T_{AK} kann nach Gl. 12-6 berechnet werden, wobei diese für die hier untersuchte Fragestellung wie folgt geschrieben wird:

$$\text{Gl. 12-39} \quad T_{AK} = T_A + (T_R - T_A) \cdot \exp\left(-\frac{t_{AK}}{\tau_{AK}}\right)$$

mit

T_{AK} Auskühltemperatur, d. h. Temperatur, auf die das Gebäude auskühlt

τ_{AK} Zeitkonstante für den Auskühlvorgang.

Wird Gl. 12-39 in Gl. 12-38 eingesetzt, ergibt sich folgender Ausdruck für den von einem Bauteil abgegebenen oder aufgenommenen Wärmestrom:

$$\text{Gl. 12-40} \quad \dot{q}_{AH} = -\frac{\rho \cdot c_p \cdot X}{t_{AH}}$$

$$\left[T_A + (T_R - T_A) \cdot \exp\left(\frac{t_{AK}}{\tau_{AK}}\right) - T_R - \left(T_A + (T_R - T_A) \cdot \exp\left(\frac{t_{AK}}{\tau_{AK}}\right) - T_R \right) \exp\left(-\frac{t_{AH}}{\tau_{AH}(t_{AH})}\right) \right]$$

Die dynamische Aufheizlast des gesamten Gebäudes ist die Summe der Wärmeströme in die einzelnen Bauteile j :

$$\text{Gl. 12-41} \quad \dot{Q}_{AH} = \sum_j \dot{q}_{AH,j} \cdot A_j.$$

\dot{Q}_{AH} kann interpretiert werden als der über den Aufheizzeitraum t_{AH} gemittelte Wärmestrom, der von den Speichermassen aufgenommen wird, wenn die Raumlufttemperatur zu Beginn des Aufheizzeitraums von T_{AK} auf T_R angehoben wird.

A-12.4 Berechnen der dynamischen Aufheizlast für das Beispielgebäude

In diesem Abschnitt wird die über Gl. 12-41 beschriebene dynamische Aufheizlast für das Beispielgebäude unter unterschiedlichen Randbedingungen bestimmt und daraus der erforderliche Luftwechsel in der morgendlichen Aufheizphase berechnet. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen der wirksamen Speicherkapazität auf das dynamische Verhalten untersucht, indem unterschiedlich „schwere“ Gebäudevarianten definiert und betrachtet werden.

A-12.4.1 Randbedingungen

Die in der Berechnung angesetzten Randbedingungen werden im Folgenden dargestellt und begründet, sofern sie sich von den in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Angaben unterscheiden.

U_{ges} der Gebäudehülle

Der erforderliche mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle wird für die in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Randbedingungen über Gl. 5-57 bestimmt. Für das A/V-Verhältnis des Beispielgebäudes von

$$\text{A/V-Verhältnis: } 0,33 \text{ m}^{-1}$$

ergibt sich ein Wert von

$$U_{max} = 0,31 \text{ W/(m}^2\text{K)} .$$

Wirksame Speichermasse

Bei den Außenbauteilen wird die gesamte Speichermasse bis zur Dämmschicht als thermisch wirksam angesehen, da die Wärmeverluste von der Raumluft über die Außenbauteile an die Umgebung erfolgen. Für die Innenbauteile werden folgende wirksame Bauteildicken angesetzt:

Nachtabschaltung	$d_{W,max} = 10 \text{ cm}$
Wochenendabschaltung	$d_{W,max} = 15 \text{ cm}.$

Bauteilaufbau der unterschiedlichen Gebäudevarianten

Die Berechnungen werden für Gebäude mit unterschiedlicher Speicherkapazität durchgeführt. Grundlage zur Definition der Gebäudevarianten sind die in [Grimm 2000] verwendeten Konstruktionen. In Tab. 12-1 ist der Bauteilaufbau der einzelnen Varianten qualitativ dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die massiven Bauteile grau hinterlegt. Über die Bauteilkürzel - z. B. AW-B - können die einzelnen Konstruktionen den in Abschnitt A-12.8 definierten schichtweisen Aufbauten zugeordnet werden.

	Var.1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Basis	Var. 7
Außenwand	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht	massiv	massiv
	AW-Gkt	AW-Gkt	AW-Gkt	AW-Gkt	AW-Gkt	AW-Gkt	AB-B	AW-B
Dach	leicht	leicht	leicht	leicht	massiv	leicht	massiv	massiv
	DA-Gkt	DA-Gkt	DA-Gkt	DA-Gkt	DA-B	DA-Gkt	DA-B	DA-B
Kellerdecke	leicht	leicht	massiv aufgest. ²⁾	massiv	massiv	massiv	massiv	massiv
	KD-H	KD-H-E	KD-B-a	KD-B-E	KD-B-E	KD-B-E	KD-B-E	KD-B-E
Geschoss- decke / Fußboden	Aufbau wie Kellerdecke, jedoch nur die in Abschnitt 12.8 grau hinterlegten Schichten							
Geschoss- decke / Decke	leicht	leicht	massiv abgeh. ¹⁾	massiv abgeh. ¹⁾	massiv abgeh. ¹⁾	massiv	massiv	massiv
	GD-H	GD-H	GD-B-a	GD-B-a	GD-B-a	GD-B	GD-B	GD-B
Innenwand	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht	massiv
	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-Gkt	IW-KS
Speicher- kapazität³ KWh/K	189	253	374	437	527	668	1041	1226
spez. Spei- cherkap.³ Wh/(m²_{BGF}K)	39	52	76	89	108	137	213	251
Zeitkon- stante τ_{AK}³ in h	104	139	205	240	290	367	572	674
1) abgehängt 2) aufgeständert 3) für Auskühlvorgang am Wochenende								

Tab. 12-1: Übersichtsdarstellung der untersuchten Varianten

Mittelwertbildung bei den Stoffwerten der Bauteile

Für die Berechnung werden die thermisch wirksamen Bauteilschichten (z. B. Innenputz und Beton) zu einer Schicht zusammengefasst. Die resultierenden Stoffwerte werden durch schichtdicken-gewichtete Mittelwertbildung berechnet.

Mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bauteils λ_j

$$\text{Gl. 12-42} \quad L_j = \frac{\lambda_j}{d_{W,j}} = \frac{1}{\sum_r \frac{1}{L_r}}$$

$$\text{Gl. 12-43} \quad \lambda_j = \frac{1}{\sum_r \frac{1}{L_r}} \cdot d_{W,j}$$

mit

L Wärmeleitkoeffizient.

Mittlere volumenbezogene Speicherkapazität des Bauteils c_j

$$\text{Gl. 12-44} \quad c = c_p \cdot \rho$$

$$\text{Gl. 12-45} \quad c_j \cdot d_{W,j} = \sum_r c_r \cdot d_r$$

$$\text{Gl. 12-46} \quad c_j = \frac{\sum_r c_r \cdot d_r}{d_{W,j}}.$$

Die in die Mittelbildung einbezogenen Bauteilschichten sind in Abschnitt 12.8 fett hervorgehoben. Als Fußboden der Geschosdecken werden die bei der Kellerdecke grau hinterlegten Materialschichten berücksichtigt.

Betriebs- bzw. Abschaltzeiten der Lüftungsanlage

Die Betriebszeiten der Lüftungsanlage setzen sich entsprechend Abschnitt 5.2.2 aus der Nutzungszeit und der Spülphase zusammen. Es ergeben sich folgende hygienisch begründete Betriebs- und Abschaltzeiten.

	Zeitraum	Dauer
Nachtabstaltung	von 18:30 bis 3:30	9 Stunden
Wochenendabstaltung	Fr. 18:30 bis Mo. 2:30	61 h - 5 h = 56 h

Tab. 12-2: In der Berechnung angenommene Abschaltzeiten der Lüftungsanlage

Wärmeübergangskoeffizient an den Raumbooberflächen α_i

Neben den Eigenschaften der Bauteile wird der mittlere von den Bauteilen aufgenommene Wärmestrom in der Aufheizphase von dem Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Bauteiloberflächen und Raumluft α_i beeinflusst. Der in der DIN 4108 Teil 4 angegebene Wert von $\alpha_i = 7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ kann nicht verwendet werden, da dieser von einem sowohl konvektiven wie radiativen Wärmeübergang im Raum ausgeht. Im vorliegenden Fall findet wegen der angenommenen Luftheizung in der Aufheizphase jedoch lediglich ein konvektiver Wärmeübergang von der Raumluft an die Oberflächen statt. Zwar erwärmen sich Oberflächen mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften unterschiedlich schnell, so dass sich ein Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen einstellt. Dieser führt jedoch nur zu einem Ausgleich zwischen den Oberflächentemperaturen und nicht zu einem zusätzlichen Wärmestrom von der Raumluft an die Bauteile. Die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_i geschieht über die im Simulationsprogramm TAS verwendeten Ansätze [Kamps 1996], [TAS theory manual]. Dabei wird unterschieden zwischen

- einem horizontalen Wärmestrom in Innen- oder Außenwände $\alpha_{i,hor}$

$$\text{Gl. 12-47} \quad \alpha_{i,hor} = [670,656 \cdot H_G]^{-1/6} + 1,23 \cdot \Delta T_{R-O}^{1/3}$$

mit

$\alpha_{i,hor}$ konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei horizontalem Wärmestrom in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

ΔT_{R-O} Differenz zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur in K

- einem aufwärts gerichteten Wärmestrom in Decken,

$$\text{Gl. 12-48} \quad \alpha_{i,auf} = 1,63 \cdot \Delta T_{R-O}$$

- und einem abwärts gerichteten Wärmestrom in den Fußboden $\alpha_{i,ab}$

$$\text{Gl. 12-49} \quad \alpha_{i,ab} = 0,6 \cdot \left(\frac{\Delta T_{R-O}}{l^2} \right)^{1/5}$$

mit der charakteristische Länge l

$$\text{Gl. 12-50} \quad l = 4 \cdot \frac{A_j}{l_{U,j}},$$

wobei

$l_{U,j}$ Umfang des Bauteils j in m.

Bei einer zeitlich und örtlich gemittelten Temperaturdifferenz zwischen Raumluf- und Oberflächentemperatur von 3,5 K berechnen sich für einen Büroraum mit den Abmessungen Länge = 7,5 m; Tiefe = 4 m; Höhe = 3 m; folgende konvektive Wärmeübergangskoeffizienten

- horizontaler Wärmestrom $\alpha_{i,hor} = 2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- aufwärts gerichteter Wärmestrom $\alpha_{i,auf} = 2,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- abwärts gerichteter Wärmestrom $\alpha_{i,ab} = 0,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Unter Berücksichtigung der Oberflächenstruktur des Beispielgebäudes wird folgender flächengemittelter Wert für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten als Näherung in der Berechnung angesetzt:

$$\alpha_j = 2,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Die Annahme des gleichen Wertes von α_j für alle Bauteile in allen Varianten ist eine wesentliche Vereinfachung. Wegen der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der Bauteile werden sich die mittleren Oberflächentemperaturen unterscheiden und damit auch α_j . Zudem hängt der Wärmeübergangskoeffizient von der Art der Zuluft einbringung ab. Durch eine mechanisch induzierte Luftbewegung im Raum steigt α_j an. Diese Effekte sind im Einzelfall durch genauere Berechnungsansätze zu berücksichtigen.

Klimarandbedingungen

Es werden die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Klimarandbedingungen der DIN 4701 Teil 2 angesetzt, jedoch ohne die Außentemperaturkorrektur. Dies ist gerechtfertigt, da die Dauer der Wochenendabschaltung von 61 Stunden (etwa 2,5 Tage) in etwa dem in der DIN 4701 angegebenen Mittelwert über 2 Tage entspricht.

Die solaren Einträge werden durch eine Reduktion des Fenster-U-Wertes nach Gl. 5-61 berücksichtigt. Der maximale mittlere Wärmedurchgangskoeffizient des Beispielgebäudes reduziert sich dadurch auf

$$U_{max} = 0,31 \text{ W/(m}^2\text{K)} - 0,03 \text{ W/(m}^2\text{K)} = 0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

A-12.4.2 Temperatur am Ende der Abschaltzeit

Über Gl. 12-6 wird die mittlere Gebäudetemperatur am Ende der Abschaltzeit T_{AK} berechnet (Abb. 12-5). Untersucht werden die in Tab. 12-1 dokumentierten Ausführungsvarianten mit unterschiedlichen Werten der wirksamen Speicherkapazität.

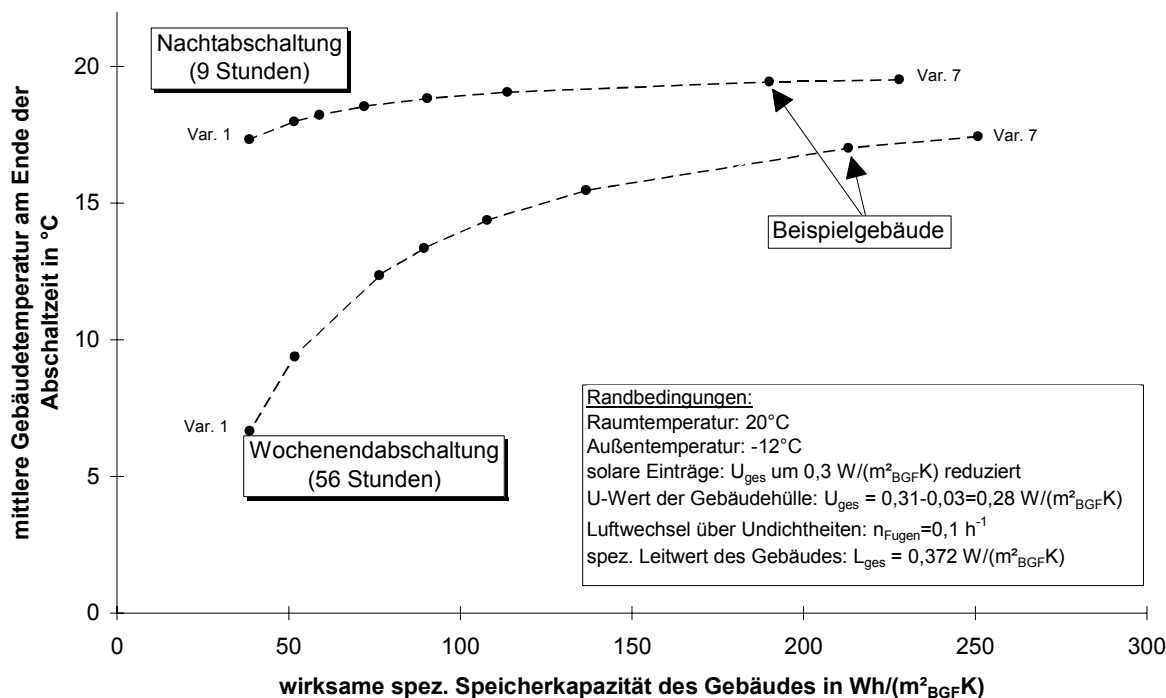


Abb. 12-5: Mittlere Gebäudetemperatur am Ende der Abschaltzeit T_{AK} (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Die Temperatur, auf die das Gebäude auskühlt, hängt bei konstantem thermischen Leitwert in logarithmischer Form von der wirksamen Speicherkapazität und der Länge des Auskühlzeitraums ab (siehe Gl. 12-6). Je geringer die Speicherkapazität und je länger der Zeitraum, desto tiefer liegt die mittlere Gebäudetemperatur am Ende des Auskühlzeitraums.

Das Auskühlen der Gebäude während der Nachtabschaltung (9 Stunden) ist aufgrund der hohen Zeitkonstanten gering. Nur für die Gebäudevariante 1 mit einer wirksamen spezifischen Speicherkapazität von 39 Wh/(K m²_{BGF}) sinkt die mittlere Gebäudetemperatur während der Nacht unter 18°C.

Deutlich tiefer liegen die Temperaturen nach der Wochenendabschaltung. Nach 56 Stunden ohne Heizung beträgt die mittlere Gebäudetemperatur am Montagmorgen bei Variante 7 (sehr hohe wirksame Speicherkapazität von 250 Wh/(m²_{BGF}·K)) nur noch 17,5°C. Bei den Ausführungsvarianten mit einer Speicherkapazität unter 110 Wh/(m²_{BGF}·K) fällt die Endtemperatur unter 15°C. Die leichteste Variante mit 39 Wh/(m²_{BGF}·K) weist am Ende des Auskühlzeitraum eine mittlere Gebäudetemperatur von nur noch 6,7 °C auf.

A-12.4.3 Erforderlicher Luftwechsel

Die erforderliche Heizleistung in der Aufheizphase ergibt sich als Summe aus der dynamischen Aufheizlast \dot{Q}_{AH} sowie den stationären Wärmeverlusten während der Aufheizphase (Transmission \dot{Q}_{Trans} sowie Undichtheiten $\dot{Q}_{Lüft,Fug}$), vermindert um die nutzbaren solaren und internen Gewinne. Die solaren Gewinne werden in dem hier getroffenen Ansatz durch eine Reduktion des Fenster-U-Wertes und damit über \dot{Q}_{Trans} berücksichtigt. Interne Wärmegewinne außerhalb der Nutzungszeit werden per Definition in den Abschaltzeiten nicht angenommen, so dass sich für die dem Gebäude in der Aufheizphase zuzuführende Heizleistung folgender Zusammenhang ergibt:

$$\text{Gl. 12-51} \quad \dot{Q}_{Heiz} = \dot{Q}_{Trans} + \dot{Q}_{Lüft,Fug} + \dot{Q}_{AH} \cdot$$

Der erforderliche, mittlere Luftwechsel n_{erf} in der Aufheizphase berechnet sich zu

$$\text{Gl. 12-52} \quad n_{erf} = \frac{\dot{Q}_{Heiz}}{V_{Geb} \cdot c_L \cdot \Delta T_{Zu,max}} \cdot$$

In der folgenden Abbildung ist der erforderliche Luftwechsel in der Aufheizzeit für Gebäude mit unterschiedlicher wirksamer Speicherkapazität dargestellt. Als Aufheizzeit wird dabei die aus hygienischen Gründen erforderliche Betriebszeit der Lüftungsanlage von Nutzungsbeginn (Spülphase) angesetzt. Nach Anhang A-10 beträgt diese nach einer Nachtabschaltung 4 Stunden und nach einer Wochenendabschaltung 5 Stunden.

Zur leichteren Bewertung der Ergebnisse ist als graue Linie der über das gesamte Gebäude gemittelte verfügbare Außenluftwechsel eingezeichnet. Damit das Gebäude auf die gewünschte Solltemperatur aufgeheizt werden kann, muss der erforderliche Luftwechsel in der Aufheizphase unter diesem verfügbaren gemittelten Außenluftwechsel von $n = 0,73 \text{ h}^{-1}$ liegen.

Der erforderliche Luftwechsel wird in den folgenden Abbildungen über die wirksame Speicherkapazität der untersuchten Ausführungsvarianten aufgetragen. Zwischen diesen beiden Größen besteht jedoch kein eindeutiger Zusammenhang. Der erforderliche Luftwechsel wird neben der Speicherkapazität u. a. von dem Wärmeeindringkoeffizienten bestimmt. Es ist somit möglich, dass es für einen Wert der wirksamen Speicherkapazität zwei unterschiedliche Werte für den erforderlichen Luftwechsel gibt. Die einzelnen Stützpunkte sind dennoch über Linien verbunden, um die Übersichtlichkeit und die Zuordnung der Ergebnisse zu erleichtern. Um auf den fehlenden eindeutigen Zusammenhang hinzuweisen, sind die Linien bewusst nur gestrichelt ausgeführt.

Die graue Fläche symbolisiert den Luftwechsel zum Decken der stationären Wärmeverluste. Dieser Betrag steht nicht zum Aufheizen des Gebäudes zur Verfügung.

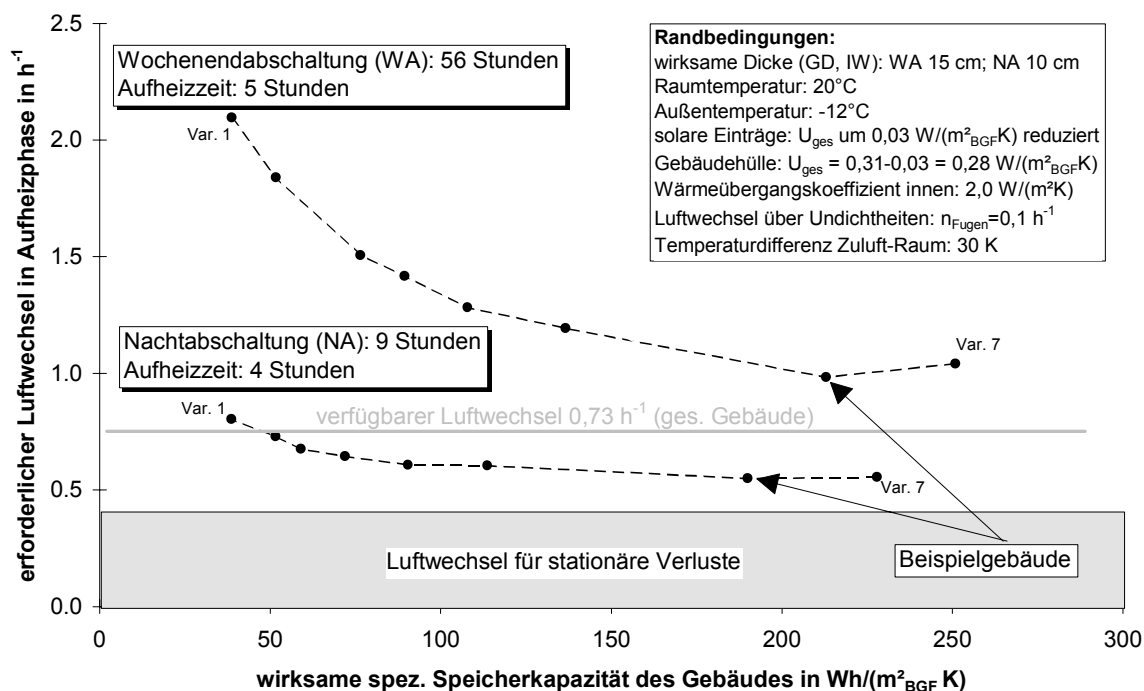


Abb. 12-6: Erforderlicher Luftwechsel in der Aufheizzeit nach der Wochenend- und Nachtabschaltung (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Nach einer Nachtabschaltung kann das Gebäude in der Regel mit dem hygienisch erforderlichen Luftwechsel am Morgen auf die geforderte Solltemperatur aufgeheizt werden. Einzige Ausnahme stellt die Ausführungsvariante 1 mit der wirksamen Speicherkapazität von 39 $Wh/(m^2_{BGF}K)$ dar. Hier überschreitet der thermisch erforderliche Luftwechsel den hygienisch erforderlichen um $0,07 h^{-1}$. Diese Differenz ist so gering, dass sie nicht weiter betrachtet wird.

Deutlich kritischer stellt sich die Situation nach der Wochenendabschaltung dar. Hier liegt der erforderliche Luftwechsel in jedem Fall deutlich über dem verfügbaren Wert, so dass ein Aufheizen des Gebäudes unter diesen Randbedingungen nicht möglich ist. In Abschnitt 12.5 wird untersucht, wie sich die Situation in Abhängigkeit von der Länge der Aufheizzeit verändert.

Aus Abb. 12-6 wird weiter deutlich, dass Gebäude mit geringerer wirksamer Speicherkapazität einen höheren Luftwechsel bzw. Heizleistung während der Aufheizphase benötigen. Dieser Effekt wird ebenfalls in Abschnitt 12.5 diskutiert.

Auffällig ist der Anstieg der Kurve für die geringe Aufheizzeit (5 Stunden) von Variante 6 zur Variante 7. Die Varianten 6 und 7 unterscheiden sich nur im Aufbau der Innenwände. In Variante 7 sind die Innenwände aus Kalksandstein gemauert. In Variante 6 sind sie als Leichtbau-Innenwände aus Gipskarton ausgeführt. Die Kalksandstein-Innenwände haben einen Wärmeeindringkoeffizienten, der um den Faktor 7 über dem der Leichtbau-Innenwände liegt. Dies führt zu einem erhöhten Wärmestrom in die Innenwände, insbesondere bei kurzen Aufheizzeiten (siehe Gl. 12-34) und damit zu einem Anstieg des erforderlichen Luftwechsels für Variante 7 (sowohl in Abb. 12-6 und auch in mehreren der folgenden Abbildungen). Dieser Effekt verdeutlicht, dass, wie zuvor ausgeführt, kein eindeutiger Zusammenhang zwischen

wirksamer Speicherkapazität und erforderlichem Luftwechsel besteht (Verbindungslinien deswegen gestrichelt gezeichnet).

Für die Berechnung der dynamischen Heizlast (Gl. 12-36) wird die Raumlufftemperatur als Randbedingung angesetzt (Randbedingung 3. Art), wobei zu Beginn der Aufheizphase ein Sprung in der Raumlufftemperatur auf $T_R = 20^\circ\text{C}$ angenommen wird. Für die Behaglichkeit der Mitarbeiter ist neben der Raumlufftemperatur auch die Oberflächentemperatur der Raumschließungsflächen wichtig. Eine Größe, die dies berücksichtigt, ist die operative Temperatur T_{op} , die hier vereinfacht als arithmetisches Mittel zwischen Raumlufftemperatur und Oberflächentemperatur ermittelt wird:

$$\text{Gl. 12-53} \quad T_{op} = \frac{T_R + T_O}{2}$$

mit

T_{op} operative Temperatur.

Abb. 12-7 zeigt die mittlere operative Temperatur zu Beginn der Betriebszeit nach einer Nacht- und einer Wochenendabschaltung.

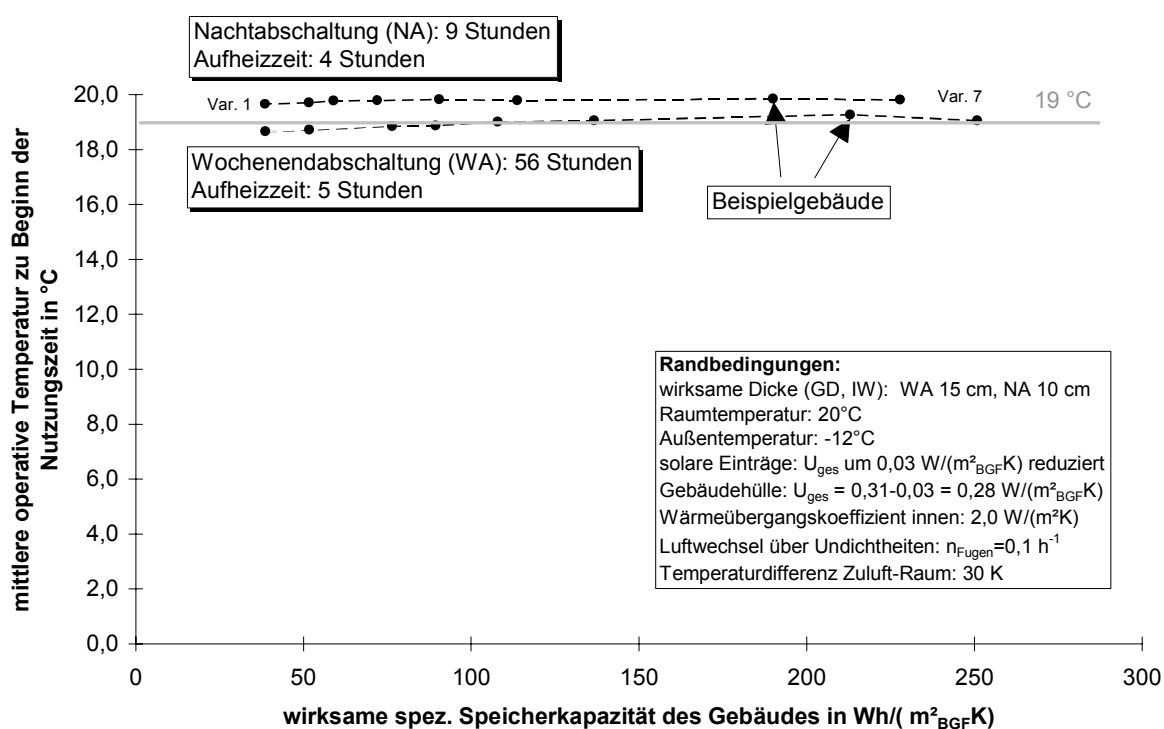


Abb. 12-7: Mittlere operative Temperatur im Gebäude zu Beginn der Nutzungszeit (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Die mittlere operative Temperatur liegt nach einer Nachtabschaltung nahe an dem Sollwert der Raumlufftemperatur. Selbst nach einer Wochenendabschaltung ergibt sich eine Differenz zwischen operativer Temperatur und Raumluffsolltemperatur von etwa 1 Kelvin.

Zu beachten ist, dass die Oberflächentemperatur neben der ohnehin vorhandenen Ungenauigkeit des Näherungsansatzes von $\pm 4\%$ durch die Definition des Wärmeübergangskoeffizienten an den Raumboflächen α_i beeinflusst wird (siehe Abschnitt A-12.4.1). Zudem sind in diese Betrachtung keine Wärmeverluste über die Außenbauteile berücksichtigt, die ebenfalls zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur führen. Bei den hier betrachteten hochgedämmten Gebäuden fällt dieser Einfluss jedoch vergleichsweise gering aus.

Wichtig zu bedenken ist weiterhin, dass es sich hier um einen flächengewichteten Mittelwert der operativen Temperatur handelt. Schwere Bauteile in leichten Gebäuden können deutlich geringere Oberflächentemperaturen aufweisen, so dass es lokal zu geringeren Werten der operativen Temperatur kommen kann. Der dargestellte Verlauf der operativen Temperatur kann entsprechend nur als grobe Abschätzung angesehen werden.

A-12.5 Einfluss der Aufheizzeit

Wie die Ergebnisse des vorhergehenden Abschnittes zeigen, kann das Gebäude nach einer Wochenendabschaltung nicht allein mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftwechsel auf die Raumtemperatur von 20°C aufgeheizt werden. In Abb. 12-8 ist dargestellt, wie sich der erforderliche Luftwechsel in Abhängigkeit von der gewählten Aufheizzeit verändert.

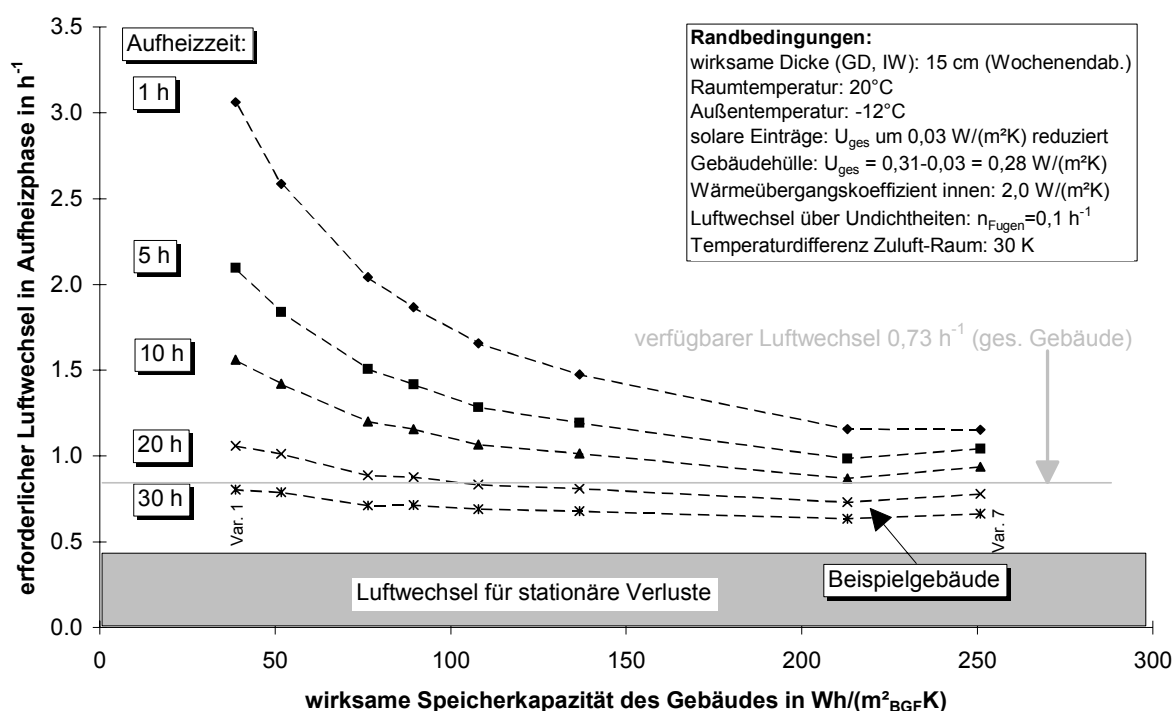


Abb. 12-8: Erforderlicher Luftwechsel nach einer Wochenendabschaltung bei unterschiedlichen Aufheizzeiten (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Es wird deutlich, dass der erforderliche Luftwechsel mit zunehmender Aufheizzeit abnimmt. Erst ab einer Länge von 30 Stunden liegt er für alle Varianten unter dem verfügbaren Wert.

Aufheizzeit und erforderlicher Luftwechsel (Heizleistung) verändern sich jedoch nicht im gleichen Verhältnis. Eine Verdoppelung der Aufheizzeit führt nicht zu einer Halbierung des erforderlichen Luftwechsels, sondern zu einer deutlich geringeren Reduktion. Die dem Gebäude zugeführte Wärme steigt somit mit zunehmender Aufheizzeit an. Dies erklärt sich dadurch, dass die Speichermassen der Bauteile bei den hier betrachteten Aufheizzeiten noch nicht ihre Endtemperatur erreicht haben. Mit zunehmender Aufheizzeit erhöht sich somit die thermische Energie der Bauteile.

Deutlich wird auch, dass der erforderliche Luftwechsel insbesondere bei kurzen Aufheizzeiten für die Gebäude mit geringer wirksamer Speicherkapazität höher liegt. Dies lässt sich vornehmlich darauf zurückführen, dass die „leichten“ Gebäude stärker auskühlen (siehe Abb. 12-5), die Bauteile am Morgen somit um eine größere Temperaturdifferenz angehoben werden müssen. Gleichzeitig machen sich bei kurzen Aufheizzeiten die unterschiedlichen Werte der wirksamen Speicherkapazität noch nicht wesentlich bemerkbar. Erst bei längeren Aufheizzeiten werden durch die geringeren Werte der in Gl. 12-37 definierten „Zeitkonstante“ (Aufheizvorgang) die Auswirkungen der vermehrten Auskühlung von leichten Gebäuden ausgeglichen.

Bei Aufheizzeiten von 30 Stunden ist der erforderliche Luftwechsel weitgehend unabhängig von der Speicherkapazität der Gebäude. Wird die Aufheizzeit darüber hinaus verlängert (bei gleichbleibender Auskühlzeit), so dass auch für die schweren Bauteile die innere Energie wieder ihren Ausgangswert (vor Auskühlphase) erreicht hat, weisen schwere Gebäude eine höhere mittlere Aufheizlast auf als Leichte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur in schweren Gebäuden in der Auskühlphase weniger stark sinkt. Die mittlere Gebäudetemperatur ist somit höher und damit auch die Wärmeverluste.

A-12.6 Aufheizlast von Einzelräumen

In den bisherigen Berechnungen wurde das Gebäude als eine integrale Einheit angesehen und die Entwicklung der mittleren Gebäudetemperatur betrachtet. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Aufheizlast in einzelnen Räumen darstellt.

Das thermische Verhalten der Räume wird, bei sonst gleichen Randbedingungen, durch die Lage des Raums im Gebäude beeinflusst. Um die Auswirkung auf den erforderlichen Luftwechsel abzuschätzen, werden im folgenden zwei extreme Situationen untersucht:

- ein Eckraum unter dem Dach, der intern nur von Flur und Nebenräumen umgeben ist (ungünstigster Fall) und
- ein Mittelraum, der intern bis auf den Flur nur von Büroräumen umgeben ist (günstigster Fall).

Die Räume haben Netto-Maße von Länge: 7,5 m; Tiefe: 4 m; Höhe: 3 m. Daraus ergibt sich folgende Struktur der Brutto-Raumumschließungsflächen:

	Mittelraum m ²	Eckraum m ²
Außenwand	14,6	28,3
Dach	-	32,1
Fenster	9	9
Geschossdecke Fußboden (adiabat)	30 (adiabat)	-
Geschossdecke Decke	30 (adiabat)	30
Innenwand zu Nebenräumen	24 (adiabat)	12
Innenwand zu Flur	22,5	22,5

Tab. 12-3: Umschließungsflächen der untersuchten Räume

Die Bauteile weisen den in Abschnitt 12.8 dokumentierten Aufbau auf. Wegen der speziellen Geometrie der Räume kommen nicht alle in Tab. 12-1 aufgeführten Ausführungsvarianten zum Tragen. Die Stützstellen in Abb. 12-9 können entsprechend ihrer Position auf der gestrichelten Linie folgenden Varianten zugeordnet werden.

	1	2	3	4	5	6
Mittelraum:	Var.1	Var.2	Var.3	Var.5	Basis	Var.7
Eckraum:	Var.3	Var.4	Var.5	Basis	Var.7	

Tab. 12-4: Zuordnung der Varianten zu den Stützstellen (von links) in Abb. 12-9

Die Nebenräume und der Flur werden bei dem hier angenommenen Lüftungskonzept (siehe Abschnitt 5.1.1) nicht mit Zuluft versorgt. Ihnen kann somit auch nicht direkt ein Heizwärmestrom zugeführt werden. Beheizt werden diese Bereiche durch die aus den Büros überströmende warme Luft. Im Zeitverlauf betrachtet werden somit zunächst die Büros und erst danach Nebenräume und Flur aufgeheizt. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem bei der kurzen Aufheizzeit von 5 Stunden als Temperatur in Flur und Nebenräumen die Endtemperatur der Auskühlphase T_{AK} angesetzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass in der kurzen Aufheizzeit von 5 Stunden diese Bereiche noch nicht nennenswert erwärmt werden. Für die Aufheizzeit von 30 Stunden wird als Temperatur in den Nebenräumen und Flur das arithmetische Mittel zwischen T_R und T_{AH} angesetzt.

Die Zulufttemperatur wird auf dem Weg durch das Gebäude sinken, so dass insbesondere im Eckraum nicht mehr die volle Temperaturdifferenz von 30 Kelvin zur Verfügung steht. Die Wärmeverluste der Zuluftkanäle führen dabei zu einer Erwärmung ihrer Umgebung. Geht man davon aus, dass die Kanäle vornehmlich in Nebenräumen und Flur geführt werden, wird diesen Bereichen ein Wärmestrom zugeführt, so dass die Temperatur hier ansteigt. Die angenommene Temperaturdifferenz zu den Büros müsste entsprechend korrigiert werden. Beide Effekte werden in der hier vorgenommenen Betrachtung vernachlässigt.

Da nur Büros (Zulufräume) untersucht werden, kann ein verfügbarer Luftwechsel von $n=1,3 \text{ h}^{-1}$ angesetzt werden. Dieser Wert ist als graue Linie in Abb. 12-9 eingezeichnet.

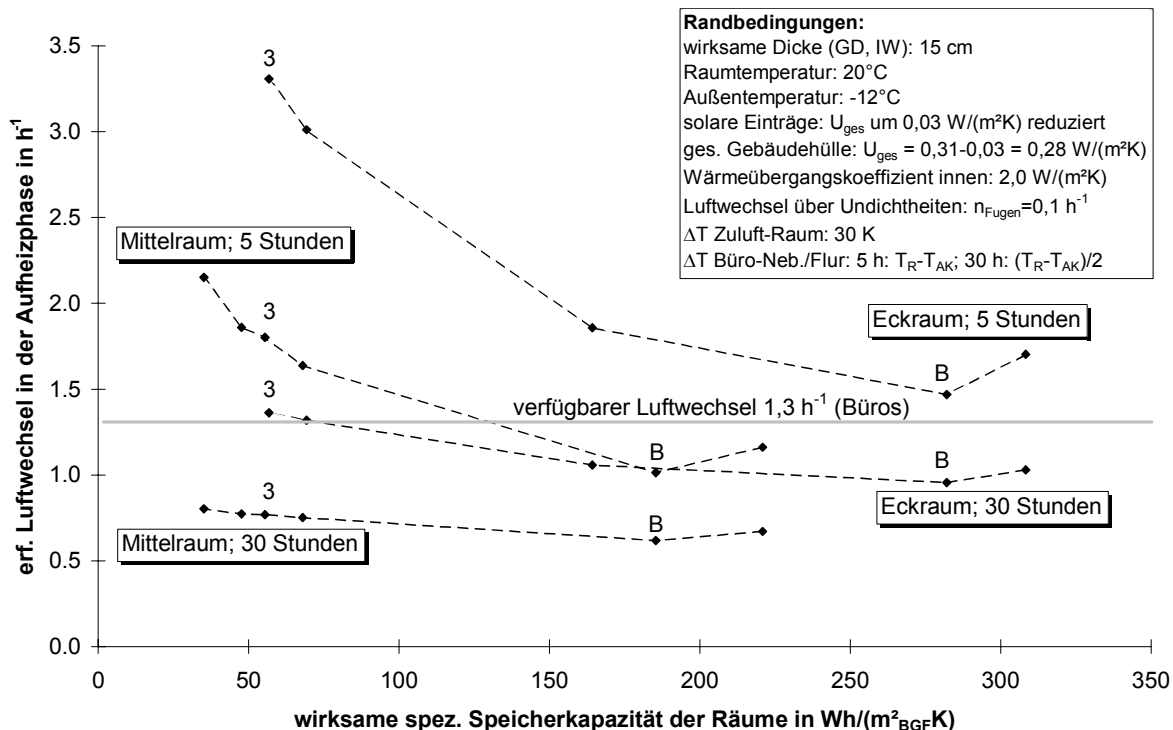


Abb. 12-9: Erforderlicher Luftwechsel nach einer Wochenendabschaltung in einem Eck- und einem Mittelraum bei unterschiedlichen Aufheizzeiträumen (Variantenbezeichnung: Tab. 12-4)

Die Lage des Raumes hat deutlichen Einfluss auf den erforderlichen Luftwechsel in der Aufheizphase. So liegt der Eckraum bei einer Aufheizzeit von 5 Stunden mit einem erforderlichen Luftwechsel von 3,3 bis 1,5 h⁻¹ in jedem Fall über dem verfügbaren Wert von 1,3 h⁻¹. Erst wenn die Aufheizzeit auf 30 Stunden verlängert wird, kann der Eckraum auf die gewünschte Solltemperatur aufgeheizt werden, wobei die sehr leichte Variante (3) noch geringfügig über dem Maximalwert liegen.

Günstiger stellt sich die Situation für den Mittelraum dar. Bei einer Aufheizzeit von 5 Stunden unterschreitet der erforderliche Luftwechsel bei der Basisvariante und der Variante 7 den verfügbaren Wert, so dass ein Aufheizen realisiert werden kann. Bei einem Aufheizzeitraum von 30 Stunden ist dies für alle Varianten gegeben.

Die Interpretation der Gründe für dieses Verhalten wird durch den unterschiedlichen Aufbau der Raumumschließungsflächen und den sich damit ergebenden unterschiedlichen thermischen Eigenschaften erschwert. Die wichtigsten Effekte sollen für die Basisvariante (B) und die Variante 3 (3) aufgezeigt werden.

Beide Räume der Basisvariante haben am Ende der Auskühlzeit eine ähnliche Temperatur. So kühlt der Eckraum bei der Annahme einer Aufheizzeit von 5 Stunden (Abschaltzeit: 56 Stunden) nur um 0,3 Kelvin, bei einer Aufheizzeit von 30 Stunden (Abschaltzeit: 31 Stunden) um 0,2 Kelvin stärker aus als der Mittelraum. Die größere wirksame Speicherkapazität des Eckraumes wird durch die höheren Verluste wieder ausgeglichen, so dass sich ein ähnlicher Wert für die Zeitkonstante und damit ein ähnliches Auskühlverhalten ergibt. Die Unterschiede im erforderlichen Luftwechsel lassen sich zu 75 % bis 80 % auf den höheren internen Wärmestrom an Flur und Nebenräume des Eckraums zurückführen.

Bei der Variante 3 sinkt die Temperatur in dem Eckraum deutlich stärker ab. Bei einer Aufheizzeit von 5 Stunden (Abschaltzeit: 56 Stunden) liegt sie um 4,4 Kelvin, bei einer Aufheizzeit von 30 Stunden (Abschaltzeit: 31 Stunden) um 3 Kelvin unter der Temperatur des Mittelraumes. Dies ergibt sich aus den höheren Wärmeverlusten des Eckraums bei ähnlicher wirksamer Speicherkapazität. Wegen der geringeren Auskühltemperatur ist der Unterschied im erforderlichen Luftwechsel für die dynamischen Aufheizvorgänge bei dieser Variante größer. So begründet sich bei einer Aufheizzeit von 5 Stunden nur noch 50 % des Unterschiedes im erforderlichen Luftwechsel durch den größeren internen Wärmestrom. Bei der Aufheizzeit von 30 Stunden sind es noch 65 %. Der verbleibende Teil ist auf die Unterschiede in der morgens zu überwindenden Temperaturdifferenz zurückzuführen.

A-12.7 Vergleich mit Simulationsrechnungen

In den analytischen Berechnungen werden eine Reihe von Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

- vereinfachter Ansatz zur Berechnung der dynamischen Aufheizlast mit einer maximalen Abweichung zur exakten Lösung von ± 4 % (Abschnitt A-12.2)
- wirksame Speicherkapazität mit pauschalem Ansatz für thermisch wirksame Dicke der Bauteile bestimmt (Abschnitt A-12.4.1)
- Wärmeübergangskoeffizient an Innenoberflächen berechnet und pauschal zugewiesen (Abschnitt A-12.4.1)
- Temperaturdifferenz zum Keller als $\Delta T_U/2$ angenommen
- Wärmeübergangskoeffizient an Außenoberflächen konstant nach DIN 4108, Teil 4.

Um die Auswirkungen dieser Vereinfachungen auf das Ergebnis abzuschätzen, werden die analytischen Berechnungen mit dynamischen Simulationsrechnungen verglichen. Wichtig für einen solchen Vergleich ist, dass die in der Simulation verwendeten physikalischen Modelle bekannt sind und die Validität des Programms überprüft wurde. Diese Voraussetzungen sind für das hier verwendete Simulationsprogramm TAS gegeben (siehe auch Abschnitt 4.1.6).

Der Vergleich mit Simulationsrechnungen hat gegenüber einem Abgleich mit Messdaten eines realen Gebäudes den Vorteil, dass die Randbedingungen bekannt sind und zwischen den beiden Berechnungsgängen abgeglichen werden können. Unterschiede im Ergebnis lassen sich somit genauer interpretieren.

Die Randbedingungen für die Simulationsrechnungen entsprechen weitgehend den bisher gemachten Angaben. Abweichend davon wird für die folgenden Berechnungen

- eine Aufheizzeit von einer Stunde und daraus resultierend eine Abschaltzeit von 60 Stunden für die Simulation und die analytische Berechnung angenommen
- in der analytischen Berechnung berücksichtigt, dass die Oberflächentemperatur während der Nutzungszeit nicht der Raumlufttemperatur von 20°C entspricht, sondern aufgrund der Wärmeverluste über die Außenbauteile und der Tagesamplitude der Raumtemperatur tiefer liegt. Als Temperatur der Speichermassen während der Nutzungszeit wird in den analytischen Berechnungen ein mittlerer Wert von $18,7^\circ\text{C}$ angesetzt. Dies entspricht der aus den Simulationsläufen bestimmten mittleren Oberflächentemperatur der Basisvariante.

Abb. 12-10 zeigt den Vergleich zwischen den analytisch berechneten Temperaturen am Ende des Auskühlzeitraums T_{AK} mit den für die gleichen Randbedingungen simulierten Temperaturen. Die analytisch berechneten Temperaturen entsprechen der mittleren Gebäudetemperatur, die simulierten der mittleren Oberflächentemperatur.

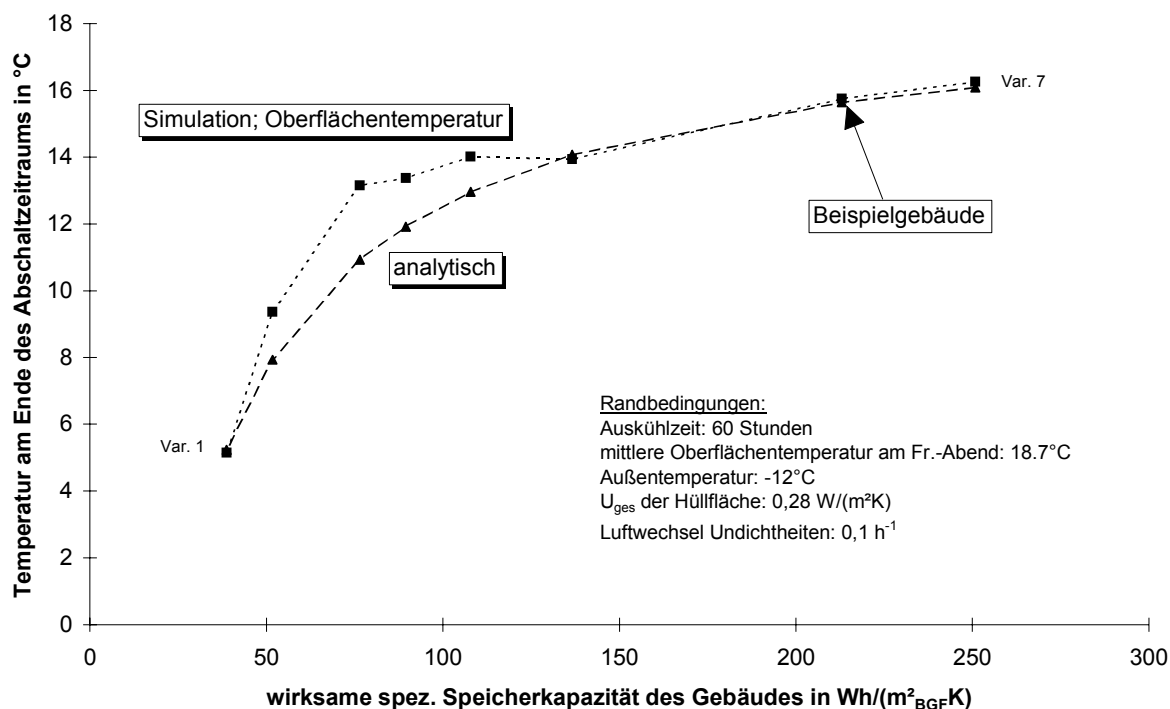


Abb. 12-10: Vergleich der analytisch berechneten und der dynamisch simulierten Temperatur am Ende des Auskühlzeitraums T_{AK} (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und analytisch bestimmten Temperaturen. Die bei der analytischen Berechnung vorgenommene Mittelwertbildung bei den Stoffwerten und die Definition der Eindringtiefe scheint damit die physikalischen Vorgänge mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Nennenswerte Abweichungen ergeben sich nur bei den Varianten 3, 4 und 5 mit abgehängter Decke oder aufgeständertem Fußboden. Hier scheint die Vernachlässigung des Strahlungsaustausches über die Luftschicht der abgehängten Decke in der analytischen Berechnung und die pauschale Definition der Eindringtiefe zu Unterschieden zu führen.

Den Vergleich von analytisch berechnetem und dynamisch simuliertem erforderlichen Luftwechsel bei einer Aufheizzeit von einer Stunde zeigt Abb. 12-11.

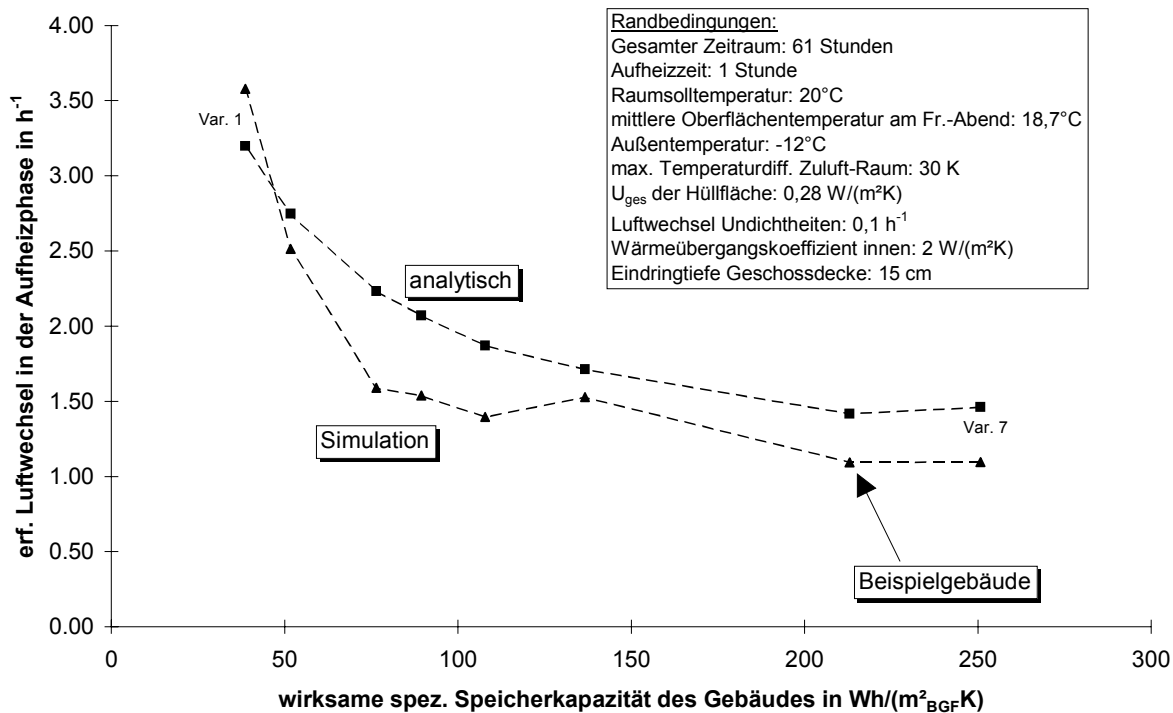


Abb. 12-11: Vergleich von analytisch berechnetem und dynamisch simuliertem erforderlichen Luftwechsel zum Aufheizen des Gebäudes nach einer Wochenenda-b-senkung unter der Annahme einer Aufheizzeit von einer Stunde (Variantenbeschreibung: Tab. 12-1)

Die beiden Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei der analytisch berechnete Luftwechsel bis auf die Variante 1 über dem simulierten Wert liegt. Die bereits angesprochene Hierarchie im Ergebnis ist somit weitgehend eingehalten, das heißt: mit genaueren Rechnungen ergeben sich geringere Anforderungen.

Es zeigt sich, dass für die Basisvariante und die Variante 7 mit hoher wirksamer Speicherkapazität der erforderliche Luftwechsel von der analytischen Berechnung überschätzt wird. Bei den Varianten 3, 4 und 5 führen die zu geringen Auskühltemperaturen, neben eventuellen anderen Effekten, zu höheren Werten des Luftwechsels. In der „leichten“ Variante 1 liegt der analytisch bestimmte erforderliche Luftwechsel unter dem simulierten Wert.

Ein Großteil dieser Abweichungen lässt sich auf die pauschale Annahme des Wärmeübergangskoeffizienten an den Innenoberflächen zurückführen. Zur Ermittlung von α_i wurde eine mittlere Auskühltemperatur von 13°C angenommen. Werden die tatsächlichen Auskühltemperaturen eingesetzt, ergibt sich für die Variante 7 $\alpha_i = 1,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und für die Variante 1 $\alpha_i = 2,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Bei Berücksichtigung dieser Werte reduziert sich die Differenz im erforderlichen Luftwechsel bei der Variante 7 von 0,37 h⁻¹ auf 0,22 h⁻¹. Bei der Variante 1 verkleinert sich der Unterschied von 0,38 h⁻¹ auf 0,06 h⁻¹, d. h. es ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

Für den Fall der Luftheizung (konvektiver Wärmestrom) ist das hier dargestellte analytische Verfahren für eine erste Abschätzung der dynamischen Aufheizleistung geeignet. Erforderlich

ist dabei, dass der Wärmeübergangskoeffizient an den Innenoberflächen mit der tatsächlichen Auskühltemperatur bestimmt wird. Weitere Untersuchungen zu der Abbildung von Bauteilen mit Luftschichten, d. h. abgehängte Decken oder aufgeständerter Fußboden, können die Ergebnisse der analytischen Berechnung noch verbessern.

Sowohl in der analytischen Berechnung als auch in der dynamischen Simulation wird von einem ideal durchmischten Gebäude mit einer Lufttemperatur von 20°C ausgegangen. Die erforderliche Heizlast wird dem Gebäude als konvektive Heizleistung zugeführt. In der Realität geschieht diese Wärmezufuhr durch Einblasen von warmer Zuluft mit 50°C. Hierdurch wird sich eine Temperaturschichtung im Raum ausbilden, die je nach Art der Zuluftführung mehr oder weniger deutlich ausfallen wird. Erwartet wird, dass der Wärmeübergangskoeffizient an den Innenoberflächen im Bereich des Warmluftpolsters ansteigt, was eventuell zu einem größeren Wert der Aufheizlast und damit des erforderlichen Luftwechsels führen kann. Diese Frage sollte in theoretischen Studien oder im Rahmen von praktischen Versuchen weiter untersucht werden.

Deutlich komplexer wird die Ermittlung der dynamischen Aufheizleistung, wenn ein Heizsystem mit nennenswertem Strahlungsanteil bei der Wärmeübertragung eingesetzt wird (Plattenheizkörper, Fußbodenheizung). In dem Fall muss der Strahlungsaustausch zwischen den einzelnen Oberflächen und dem Heizsystem berücksichtigt werden. Da der Wärmestrom in die Bauteile durch den zusätzlichen radiativen Wärmetransport zunimmt, ist in dem Fall mit einem Anstieg der zuzuführenden dynamischen Aufheizleistung zu rechnen.

A-12.8 Schichtenweise Definition der verwendeten Bauteile

Im Folgenden werden die bei der Berechnung verwendeten Bauteile schichtenweise definiert. Die Zuordnung zu den untersuchten Varianten geschieht über Tab. 12-1.

Die fett gedruckten Bauteilschichten sind in die Mittelwertbildung nach Gl. 12-43 und Gl. 12-46 einbezogen.

Beim Bauteil „Geschossdecke“ muss zwischen dem Aufbau der Decke und des Fußbodens unterschieden werden. Der Aufbau der „Decken“ entspricht den fett gedruckten Bauteilschichten in den mit GD-... bezeichneten Bauteilen. Der „Fußboden“ der Geschossdecken entspricht den farbig hinterlegten Schichten in den mit KD-... bezeichneten Bauteilen.

Einzelne Bauteilschichten sind in zwei Teile unterteilt, um die wirksame Bauteildicke von 10 cm bzw. 15 cm abbilden zu können.

Bauteilbezeichnung: AW-B: Außenwand / Beton					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Außenputz	0,020	1400	1000	0,700	0,029
Wärmedämmung	0,150	120	800	0,040	3,750
Beton	0,250	2400	920	2,100	0,119
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					0,245

Bauteilbezeichnung: AW-Gkt: Außenwand / Gkt					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Holzpressplatte	0,019	1000	2800	0,170	0,170
Wärmedäm.+10% Holz	0,110	168	930	0,049	2,245
Holzpressplatte	0,019	1000	2800	0,170	0,112
Wärmedäm.+10% Holz	0,061	168	930	0,049	1,245
Gipskartonplatte	0,015	900	840	0,210	0,071
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					0,249

Bauteilbezeichnung: DA-B: Dach / Beton					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Bitumdachbahn	0,020			0,170	0,118
Wärmedämmung	0,300	120	800	0,040	7,500
Beton	0,180	2400	920	2,100	0,086
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					0,127

Bauteilbezeichnung: DA-Gkt: Dach / OSB+Gkt					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,040
Bitumdachbahn	0,020			0,170	0,118
Holzpressplatte	0,019	1000	2800	0,170	0,170
Wärmedäm.+10% Holz	0,350	168	930	0,049	7,143
Holzpressplatte	0,019	1000	2800	0,170	0,112
Gipskartonplatte	0,015	900	840	0,210	0,071
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					0,128

Bauteilbezeichnung: IW-Gkt: Innenwand / Gkt					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Gipskartonplatte	0,0125	900	840	0,210	0,060
Wärmedäm.+10% Holz	0,060	168	930	0,049	1,224
Gipskartonplatte	0,0125	900	840	0,210	0,060
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					0,624

Bauteilbezeichnung: IW-KS: Innenwand / Kalksandstein					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Kalksandstein	0,115	1600	920	0,790	0,146
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert W/(m²K)					2,230

Bauteilbezeichnung: GD-B: Geschossdecke / Beton					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Teppich	0,005	186	1360	0,060	0,083
Zementestrich	0,060	2000	1000	1,400	0,043
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Beton (inaktiv)	0,045	2400	920	2,100	0,021
Beton	0,135	2400	920	2,100	0,064
Akustikputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,652

Bauteilbezeichnung: GD-B-a: Geschossdecke / abgehängt					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,130
Teppich	0,005	186	1360	0,060	0,083
Zementestrich (1.8)	0,060	2000	1000	1,400	0,043
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Beton (inaktiv)	0,143	2400	920	2,100	0,068
Beton	0,038	2400	920	2,100	0,018
Luft	0,100	0	0,000	0,096	1,042
Gipskartonplatte	0,0125	900	840	0,210	0,060
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,383

Bauteilbezeichnung: GD-H-E: Geschossdecke / Holzbalken-Estrich					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Teppich	0,005	186	1360	0,060	0,083
Zementestrich	0,060	2000	1000	1,400	0,043
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Holzpressplatte	0,020	1000	2800	0,17	0,118
Holzbalken + 90% Luft (inaktiv)	0,043	61	211	0,170	0,250
Holzbalken + 90% Luft	0,138	61	211	0,170	0,809
Gipskartonplatte	0,0125	900	840	0,210	0,060
Innenübergang					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,376

Bauteilbezeichnung: GD-H: Geschossdecke / Holzbalken					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Teppich	0,005	186	1360	0,060	0,083
Holzpressplatte	0,025	1000	2800	0,17	0,147
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Holzbalken + 90% Luft (inaktiv)	0,043	61	211	0,170	0,250
Holzbalken + 90% Luft	0,138	61	211	0,170	0,809
Gipskartonplatte	0,0125	900	840	0,210	0,060
Innenübergang					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,378

Bauteilbezeichnung: KD-B-E: Kellerdecke / Estrich					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	1360	0,06	0,083
Zementestrich	0,060	2000	1000	1,4	0,043
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Beton	0,180	2400	920	2,100	0,086
Wärmedämmung	0,060	120	800	0,040	1,500
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,325

Bauteilbezeichnung: KD-B-a: Kellerdecke / aufgeständert					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	1360	0,06	0,083
Holzpressplatte	0,025	1000	2800	0,17	0,147
Luft	0,1	0	0	0,096	1,042
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Beton	0,180	2400	920	2,100	0,086
Wärmedämmung	0,020	120	800	0,040	0,500
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,311

Bauteilbezeichnung: KD-H-E: Kellerdecke / Holzbalkendecke-Estrich					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	1360	0,06	0,083
Zementestrich	0,06	2000	1000	1,4	0,043
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Holzpressplatte	0,02	1000	2800	0,17	0,118
Holzbalken + 90% WD	0,070	168	930	0,049	1,429
Holzpressplatte	0,020	1000	2800	0,17	0,118
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,317

Bauteilbezeichnung: KD-H: Kellerdecke / Holzbalkendecke					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	Wh/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	1360	0,06	0,083
Holzpressplatte	0,025	1000	2800	0,17	0,147
Wärmedämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Holzbalken + 90% WD	0,070	168	930	0,049	1,429
Holzpressplatte	0,020	1000	2800	0,17	0,118
Innenputz	0,000	1400	1000	0,700	0,000
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert W/(m²K)					0,321

Tab. 12-5: Schichtenweise Beschreibung der verwendeten Bauteile aus Tab. 12-1