

**Leitfaden für die Vor-Ort-Beratung  
bei Sanierungsvorhaben**

**Hilfestellung zur Beurteilung  
baulicher Aspekte**

A. Geißler

A. Maas

G. Hauser

**Abschlußbericht**

**Juni 2001**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen  
und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: Z 6 - 5.4.00-11 / II 13 - 80 01 00 -11)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



**Leitfaden für die Vor-Ort-Beratung  
bei Sanierungsvorhaben**

**Hilfestellung zur Beurteilung  
baulicher Aspekte**

A. Geißler  
A. Maas und  
G. Hauser

Aktenzeichen: Z 6 - 5.4.00-11 / II 13 - 80 01 00 -11

Der Bericht umfaßt

80 Seiten Text  
21 Abbildungen  
30 Tabellen

Kassel, den 15. März 2001

(Dr.-Ing. A. Geißler)

(Dr.-Ing. A. Maas)

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Hauser)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Energieeinsparverordnung . . . . .	2
2.2	Die energetische Vor-Ort-Beratung . . . . .	2
2.2.1	Allgemeines . . . . .	2
2.2.2	Gebäude . . . . .	4
2.2.3	Heizungsanlage . . . . .	6
2.3	Rechenverfahren . . . . .	6
2.3.1	Allgemeines . . . . .	6
2.3.2	Jahres-Heizenergiebedarf . . . . .	6
2.3.3	Primärenergiebedarf . . . . .	12
2.4	Meßverfahren . . . . .	12
2.4.1	Geometrische Daten . . . . .	12
2.4.2	Wärmetechnische Kenndaten . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Hilfsmittel und Geräte zur Aufnahme von Gebäudekenndaten</b>	<b>22</b>
3.1	Geometrische Kenndaten . . . . .	22
3.1.1	Allgemeines . . . . .	22
3.1.2	Bauzeichnungen . . . . .	22
3.1.3	Zollstock und Bandmaß . . . . .	22
3.1.4	Laser-Entfernungsmessgerät . . . . .	22
3.1.5	Photogrammetrie . . . . .	28
3.1.6	Theodolit . . . . .	34
3.1.7	Akustische Mikroskopie . . . . .	34
3.2	Wärmetechnische Kenndaten . . . . .	34
3.2.1	Allgemeines . . . . .	34
3.2.2	Materialdaten in der Literatur . . . . .	34
3.2.3	Materialreste . . . . .	41
3.2.4	Baubeschreibung . . . . .	41
3.2.5	Kernbohrung . . . . .	41
3.2.6	Temperaturfühler-Messgerät . . . . .	41
3.2.7	Infrarot-Temperaturmessgerät . . . . .	41
3.2.8	Wärmestrommeßgeräte . . . . .	42
3.2.9	Thermographie . . . . .	42
3.3	Sonstige Gebäudedaten . . . . .	44
3.3.1	Allgemeines . . . . .	44
3.3.2	Endoskopie . . . . .	44
3.3.3	Luftdichtheitsmessung . . . . .	45

<b>4</b>	<b>Vergleichsrechnungen</b>	<b>47</b>
4.1	Allgemeines . . . . .	47
4.2	Gebäudedaten . . . . .	47
4.2.1	Freistehendes Einfamilienhaus . . . . .	47
4.2.2	Mehrfamiliengebäude . . . . .	47
4.3	Ausgangszustand . . . . .	47
4.3.1	Allgemeines . . . . .	47
4.3.2	Freistehendes Einfamilienhaus . . . . .	50
4.3.3	Mehrfamiliengebäude . . . . .	52
4.4	Parameter und Variationsbreite . . . . .	54
4.4.1	Allgemeines . . . . .	54
4.4.2	Pauschale Variationen . . . . .	54
4.4.3	Variation "beheizter Bereich" . . . . .	54
4.5	Berechnungsergebnisse . . . . .	56
4.5.1	Freistehendes Einfamilienhaus . . . . .	56
4.5.2	Mehrfamiliengebäude . . . . .	58
4.6	Auswertung und Diskussion . . . . .	60
4.6.1	Allgemeines . . . . .	60
4.6.2	Variation einzelner Parameter . . . . .	61
4.6.3	Variation von Parameterkombinationen . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>70</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	70
5.2	Energieeinsparverordnung (EnEV) . . . . .	70
5.3	Erforderliche bauliche Gebäudedaten . . . . .	71
5.4	Datenermittlung . . . . .	73
5.5	Rechengang und Auswertung . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>Bild- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>82</b>

# 1 Einleitung

Nach heutigem Kenntnisstand wird der prognostizierte Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den nächsten Jahrzehnten mit hoher Wahrscheinlichkeit globale Klimaveränderungen mit katastrophalen Folgen nach sich ziehen. Um dieser Entwicklung entgegenzusteuern, muss der gegenwärtige CO<sub>2</sub>-Ausstoß massiv verringert werden. Eine Stabilisierung der Klimaentwicklung würde bedeuten, dass die jährliche CO<sub>2</sub>-Emission in den nächsten 50 Jahren auf die Hälfte reduziert werden muss. Um eine Reduktion in dieser Größenordnung erreichen zu können ist es unabdingbar, Potentiale zur Minderung des Energieverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Bereichen soweit wie möglich auszuschöpfen.

Mit ca. 45% sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Gebäudebeheizung der grösste Einzelfaktor des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Gleichzeitig besteht hier ein hohes Potential, insbesondere durch Wärmeschutzmassnahmen Energie einzusparen. Dem Gebäudebestand kommt dabei eine zentrale Rolle zu, denn nur die energetische Sanierung bestehender Gebäude ermöglicht es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch zu senken.

Bundesweit verfügen 24 Mio. Altbauwohnungen, davon 18 Mio. in den alten und 6 Mio. in den neuen Bundesländern, über ein energetisch äusserst schlechtes Niveau. Das sind 75% des gesamten Bestandes. Zu den "Energieverschwendern" zählen vor allem Gebäude, die vor Inkrafttreten der zweiten Wärmeschutzverordnung aus dem Jahr 1982 errichtet und nicht oder unzureichend energetisch saniert wurden. Ihr jährlicher Heizenergieverbrauch liegt durchschnittlich zwischen 150 bis 200 kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche (z.B. [1]).

Die Bundesregierung hat, um die energetische Verbesserung von Gebäuden im Bestand anzukurbeln, ein Programm zur Förderung der Beratung zur sparsamen und rationellen Energieverwendung in Wohngebäuden vor Ort – die "Vor-Ort-Beratung" – aufgelegt. Hierbei wird die ingenieurmässige Unterstützung der Hauseigentümer bei der Erkennung von energetischen Schwachpunkten ihrer Gebäude gefördert. Dem Hauseigentümer soll Hilfestellung bei der heizenergieerduzierenden Sanierung gegeben werden. Die Beratung wird von einem besonders qualifizierten Ingenieur vorgenommen, der berechtigt ist, die entsprechenden Förderanträge beim "Bundesamt für Wirtschaft und Technologie" zu stellen.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Erstellung eines Leitfadens für die Aufnahme von Gebäudedaten, die zur Beurteilung des energetischen Ist-Zustandes eines Gebäudes sowie von geplanten Sanierungsmaßnahmen benötigt werden. D.h., es werden Hilfestellungen zur Beurteilung baulicher Aspekte im Rahmen der Vor-Ort-Beratung erarbeitet. Hierbei stellen sich u.a. die folgenden Fragen.

- Wie können die wärmeschutztechnischen Kennwerte von Materialien (Wärmeleitfähigkeiten) bzw. Konstruktionen (Wärmedurchgangskoeffizienten) vor Ort bestimmt werden?
- Welche zerstörungsfreie Methoden sind hierfür prinzipiell geeignet?
- Welche Methoden sind einfach handhabbar und führen zu ausreichender Genauigkeit bei der energetischen Bewertung von Gebäuden?
- Wie und mit welcher Genauigkeit sind die geometrischen Größen wärmeübertragende Hüllfläche und beheiztes Gebäudevolumen zu ermitteln?
- Welchen Einfluß haben Fehler in den Eingangsgrößen auf die Einschätzung von energetischen Verbesserungsmaßnahmen am Gebäude?

Angestellte Berechnungen beruhen für den baulichen Teil auf dem im Referentenentwurf zur Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 29.11.2000 [2] genannten Monatsbilanzverfahren nach DIN EN 832:1998-12 [3] und DIN V 4108-6:2000-11 [4].

Vorliegender Bericht geht im Hauptteil detailliert auf Hilfsmittel und Verfahren zur Vor-Ort-Energieberatung ein. Die Zusammenfassung greift die wesentlichen Aussagen auf und kann als eigentlicher "Leitfaden" erachtet werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Energieeinsparverordnung

Der Vor-Ort-Berater gibt dem Hauseigentümer Ratschläge für Massnahmen zur energetischen Verbesserung des Gebäudes. Entscheidet sich der Hausbesitzer für Massnahmen an bestimmten Bauteilen, muss er sich künftig an die grundlegenden Regelungen gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) [2] halten. Diese sind im wesentlichen die folgenden (§ 9, Stand 29.11.2000):

1. Heizkessel, die vor dem 1. Oktober 1978 in Betrieb genommen worden sind, müssen bis zum 31. Dezember 2005 den Anforderungen des § 11<sup>1</sup> genügen. Heizkessel nach Satz 1, deren Brenner nach dem 1. November 1996 erneuert worden ist, müssen bis zum 31. Dezember 2008 den Anforderungen des § 11 genügen. Sind die vorhandenen Heizkessel Niedertemperatur-Heizkessel oder Brennwertkessel, gilt § 11 als erfüllt.
2. Bei heizungstechnischen Anlagen, die vor dem 1. Oktober 1978 in Betrieb genommen worden sind, müssen ungedämmte, zugängliche Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen bis zum 31. Dezember 2005 den Anforderungen nach Anhang 5<sup>2</sup> genügen, sofern sie sich nicht in beheizten Räumen befinden.
3. Ungedämmte, nicht begehbare und zugängliche oberste Geschossdecken beheizter Räume von Gebäuden mit normalen Innentemperaturen sind bis zum 31. Dezember 2005 so zu dämmen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Geschoßdecke  $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  nicht überschreitet.
4. Bei Wohngebäuden mit nicht mehr als zwei Wohnungen, von denen zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser Verordnung eine der Eigentümer selbst bewohnt, sind die Anforderungen nach den Absätzen 1 bis 3 nur im Falle eines Eigentümerwechsels zu erfüllen. Die Frist beträgt zwei Jahre ab dem Eigentumsübergang; sie läuft jedoch nicht vor dem 31. Dezember 2005, in den Fällen des Absatzes 1 Satz 2 nicht vor dem 31. Dezember 2008, ab.

In Tabelle 1 sind die gemäß Referentenentwurf bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen einzuhaltende U-Werte gegeben.

### 2.2 Die energetische Vor-Ort-Beratung

#### 2.2.1 Allgemeines

Durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie wurde das Förderprogramm "Vor-Ort-Beratung" ins Leben gerufen. Es soll Haus- und Wohnungseigentümern ermöglichen, mit Hilfe des Sachverständigen von Experten sinnvolle und wirtschaftliche Massnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs ihrer Immobilien ergreifen zu können. Immobilieneigentümer sollen hierdurch zum Handeln "animiert" werden.

Gegenstand der Förderung ist eine sogenannte "ingenieurmässige" Vor-Ort-Beratung, d.h., die Beratung muss von einem besonders qualifizierten Ingenieur, der berechtigt ist, Förderanträge zu stellen, vorgenommen werden. Der Ingenieur ist dabei sowohl der Antragsberechtigte als auch der Zuwendungsempfänger. Unter <http://www.rkw.de/eb1-vorw.htm> ist eine Liste berechtigter Ingenieure, die das Antragsverfahren, die Vorgaben der Beratungsrichtlinien und die Anforderungen an den Beratungsbericht kennen und in der Regel schon mehrfach Beratungen innerhalb des Programms durchgeführt haben, zu finden.

Die vollständigen Antragsrichtlinien und weitere Informationen sind im Internet unter <http://www.bawi.de> in der Rubrik "Aktuelle Förderprogramme" erhältlich.

Voraussetzungen der Förderung sind dabei:

1. Das Gebäude muss sich in der Bundesrepublik Deutschland befinden,

<sup>1</sup>§ 11, "Inbetriebnahme von Heizkesseln", enthält Regelungen für die Aufstellung und Inbetriebnahme von Heizkesseln

<sup>2</sup>Anhang 5, "Anforderungen zur Begrenzung der Wärmeabgabe von Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen", enthält Angaben zu Mindestdicken der Dämmschicht von Leitungen

**Tabelle 1:** Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen (Anhang 3, Tabelle 1 in [2])

Zeile	Bauteil	Maßnahme nach	Gebäude nach	Gebäude nach
			§ 1 Abs.1 Nr. 1	§ 1 Abs. 1 Nr. 2
			max. Wärmedurchgangskoeffizient $U_{max}^{1)}$ in $W/(m^2 K)$	
	1	2	3	4
1 a)	Außenwände	allgemein	0,45	0,75
b)		Nr. 1 b), d) und e)	0,35	0,75
2 a)	Außenliegende Fenster, Fenstertüren, Dachflächenfenster	Nr. 2 a) und b)	1,7 <sup>2)</sup>	2,8 <sup>4)</sup>
b)		Verglasungen	1,5 <sup>3)</sup>	keine Anforderungen
c)		Vorhangfassaden	allgemein	1,9 <sup>4)</sup>
3 a)	Außenliegende Fenster, Fenstertüren, Dachflächenfenster mit Sonderverglasungen	Nr. 2 a) und b)	2,0 <sup>2)</sup>	2,8 <sup>2)</sup>
b)		Sonderverglasungen	1,6 <sup>3)</sup>	keine Anforderungen
c)		Vorhangfassaden mit Sonderverglasungen	Nr. 6 Satz 2	2,3 <sup>4)</sup>
4 a)	Decken, Dächer und Dachschrägen	Nr. 4.1	0,30	0,40
b)		Dächer	Nr. 4.2	0,25
5 a)	Decken und Wände gegen unbeheizte Räume oder Erdreich	Nr. 5 b) und e)	0,40	keine Anforderungen
b)		Nr. 5 a), c), d) und f)	0,50	keine Anforderungen

§ 1 Abs.1 Satz 1: Wohngebäude

§ 1 Abs.1 Satz 2: Büro- und Verwaltungsgebäude (für Vor-Ort-Beratung nicht relevant)

1) Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils unter Berücksichtigung der neuen und der vorhandenen Bauteilschichten; für die Berechnung opaker Bauteile ist DIN EN ISO 6946:1996-11 zu verwenden.

2) Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters; er ist technischen Produkt-Spezifikationen zu entnehmen oder nach DIN EN ISO 10077-1:2000-11 zu ermitteln.

3) Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung; er ist technischen Produkt-Spezifikationen zu entnehmen oder nach DIN EN 673:1999-1 zu ermitteln.

4) Wärmedurchgangskoeffizient der Vorhangfassade; er ist nach anerkannten Regeln der Technik zu ermitteln.

**Tabelle 2:** Förderung der Vor-Ort-Beratung gemäß BAWI-Richtlinie (Stand Juli 1999).

Objekttypen	Anzahl der Wohneinheiten	Höchstzuwendungsfähige Ausgaben (ohne Umsatzsteuer) [DM]	Bundesanteil (Förderanteil) [DM]
A	Ein-/ Zweifamilienhaus	850,00	650,00
B	bis 6 WE	1200,00	700,00
C	bis 15 WE	1700,00	750,00
D	bis 30 WE	2200,00	800,00
E	bis 60 WE	2700,00	850,00
F	bis 120 WE	3200,00	900,00

2. die Baugenehmigung des Gebäudes muss vor dem 01.01.1984 in den alten und vor dem 01.01.1989 in den neuen Bundesländern erteilt worden sein,
3. die Gebäudehülle darf nicht aufgrund späterer Baugenehmigungen zu mehr als 50 % verändert worden sein und
4. mehr als die Hälfte des Gebäudes muss ständig zu Wohnzwecken genutzt werden.

Die Laufzeit des Förderprogrammes ist derzeit bis 31.12.2002. Die höchstzuwendungsfähigen Ausgaben sowie der Förderanteil für eine Vor-Ort-Beratung sind gemäß Tabelle 2 festgesetzt worden.

Der Ablauf einer Vor-Ort-Beratung teilt sich in drei Phasen auf.

1. Erhebung des Ist-Zustandes (Aufnahme des Gebäudes)
2. Erstellung eines Beratungsberichtes als Anleitung zur weiteren Vorgehensweise des Hauseigentümers
3. Abschlussgespräch

Bei jeder Vor-Ort-Beratung ist es notwendig, im Rahmen der Erhebung des Ist-Zustandes, gewisse Grunddaten des jeweiligen Objektes zu ermitteln. Diese beziehen sich sowohl auf das Gebäude als auch auf Heizungs- und Lüftungsanlagen. Der Eigentümer/Hausverwalter/Nutzer sollte daher bei der Vor-Ort-Besichtigung Kopieen der Eingabepläne (Grundrisse, Ansichten, Schnitte, Baubeschreibung), der Energieabrechnungen der letzten drei Jahre (Öl, Gas, Strom, Fernwärme, Holz, usw.) sowie der letzten Schornsteinfegerprotokolle bereithalten.

Die Mindestanforderungen an eine Vor-Ort-Beratung und den zu erstellenden Bericht umfassen umfangreiche Vorgaben. Es sind Daten zum Gebäude und der Heizungsanlage aufzunehmen. Weiterhin sind Vorschläge zur Verbesserung der Gebäudehülle, zur Minderung der Lüftungswärmeverluste, zu Verbesserungen am Heizungssystem und der Warmwasserbereitung auszuarbeiten, welche sowohl die anfallenden Kosten als auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung umfassen.

Über diese Vorgaben aus den Richtlinien zur Vor-Ort-Energieberatung hinaus sollten auch Angaben zum Nutzerverhalten (ein Nutzerprofil) angegeben werden. Dies umfaßt Angaben zu üblichen Raumlufttemperaturen, Lüftungsgewohnheiten und ggf. Angaben zu den tatsächlich genutzten Flächen, wenn diese Signifikant von der Energiebezugsfläche abweichen.

### 2.2.2 Gebäude

Folgende Daten sind für ein Gebäude aufzunehmen:

- Grunddaten
  - Ort, Haustyp, Baujahr

- Zahl der Wohneinheiten,
- beheizbare Wohnflächen
- wesentliche Investitionen für wärmetechnische Massnahmen
- Daten für die wärmeschutztechnische Einstufung der Gebäudehülle
  - Außenwand-, Dach-, Fensterflächen
  - Flächen von Decken unter nicht ausgebauten Dachgeschossen
  - Kellerdeckenflächen
  - Außenflächen beheizter Dach- und Kellerräume
  - Innenwandflächen zu nicht beheizten Gebäudebereichen
  - offensichtliche Wärmebrücken (Art, Längen)
- Gebäudevolumen, Lüftungswärmebedarf

Die Ermittlung des Heizwärmebedarfs soll solare Energiegewinne berücksichtigen und auch differenzierte, auf Teilflächen der Gebäudehülle bezogene Maßnahmen ermöglichen. Die Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs stützt sich dabei auf DIN 4108 Teil 6 [4].

Die wärmeübertragende Hüllfläche setzt sich aus der Summe aller wärmeübertragenden Einzelflächen eines Gebäudes zusammen. Sie bildet die geometrische Grundlage zur Berechnung des Jahres-Transmissionswärmebedarfs  $Q_{l,T}$  (siehe 2.3.2.1.1, Gleichung 5).

Die wärmeübertragende Hüllfläche eines Gebäudes ist gemäß Tabelle 3 für die Zuordnung von Abminderungsfaktoren nach [4] bzw. [2] in getrennt auszuweisende Einzelflächen aufzugliedern. Folgende Kriterien können die Ermittlung der Flächen und insbesondere die Zuordnung einzelner Bauteile zu der entsprechenden Kategorie unterstützen.

Außenwand	Die Fläche der an die Aussenluft grenzenden Wände ohne Fenster und Türen. Die Flächen werden mit Gebäudeaussenmaßen ermittelt. Gerechnet wird ab Oberkante des Geländes oder, falls die unterste Decke über der Oberkante des Geländes liegt, von der Oberkante dieser Decke bis zur Oberkante der obersten Decke oder der Oberkante der wirksamen Dämmschicht. Deckenflächen, die das Gebäude nach unten gegen die Aussenluft abgrenzen, z.B. Decken über Kfz-Abstellplätzen (Carport) oder Fahrzeugdurchfahrten (inneren Wärmeübergangskoeffizienten beachten).
Dach	die nach aussen abgrenzende wärmegeämmte Dach- oder Dachdeckenfläche. Die Dachflächen bilden den oberen Abschluss der Gebäudehülle. Hierzu zählen auch Dachschrägen und Decken.
Oberste Geschossdecke	Decken zum nicht ausgebauten Dachraum. Dabei sind die Dachschräge – der Teil des Daches im ausgebauten Dachgeschoss, der an die Aussenluft grenzt – und die Dachgeschossdecke – die an den ungeheizten Spitzboden angrenzende obere Geschossdecke – mit unterschiedlichen Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen.
Abseitenwand	Im ausgebauten Dachgeschoss die Fläche der Abseitenwände zum nicht wärmegeämmten Dachraum
Fenster	Die Fläche der Fenster, Fenstertüren, Türen und Dachfenster, soweit sie beheizte Räume nach aussen abgrenzen. Sie wird aus den lichten Rohbaumaßen ermittelt.
Unterer Gebäudeabschluss	Die Grundflächen des Gebäudes. Gerechnet wird die Bodenfläche auf dem Erdreich oder bei unbeheizten Kellern die Kellerdecke. Dabei sind jedoch jeweils unterschiedliche Abminderungsfaktoren anzusetzen. Wände beheizter Bereiche, die an das Erdreich grenzen.
Wände und Decken zu unbeh. Räumen	Innenwände, sofern sie an Räume mit niedrigen Innentemperaturen grenzen. Räume mit niedrigen Innentemperaturen können beispielsweise unbeheizte Treppenhäuser oder Kellerräume sein.

Unter dem beheizten Gebäudevolumen  $V$  versteht man alle beheizten Räume eines Gebäudes. Die Räume werden von der wärmeübertragenden Hüllfläche eingeschlossen.

Das beheizte Gebäudevolumen wird für die Ermittlung des Lüftungswärmebedarfs  $Q_L$  (2.3.2.1.2) sowie für die Berechnung der internen Wärmegewinne  $Q_I$  (2.3.2.1.3) herangezogen.

In Abschnitt 3.1 wird auf Möglichkeiten zur Ermittlung geometrischer Daten eines Gebäudes eingegangen.

### 2.2.3 Heizungsanlage

Folgende Daten der Heizungsanlage sind im Rahmen der Vor-Ort-Beratung zu ermitteln:

- Grunddaten
  - Typ, Baujahr
  - Nennleistung
  - Kesselwirkungsgrad - soweit bekannt
  - Brennstoffart
  - Zustand der Heizungsanlage (Wärmeerzeuger, Abgasanlage, Verteilnetz)
  - bisherige energietechnische Investitionen
- Heizkessel (Zu berücksichtigen sind alle wesentlichen energietechnischen Verbesserungsmassnahmen, mindestens aber die Daten, die im Schornsteinfegerprotokoll (1. BImSchV) enthalten sind)
- Energieverbrauch über mehrere Heizperioden (zur Mittelwertbildung)
- Warmwasserbereitung

Die Beschreibung der Heizungsanlagen soll sich auf DIN 4701 Teil 10 [5] stützen.

Die nähere Betrachtung der Heizungsanlagen ist nicht Gegenstand vorliegenden Forschungsprojektes. Für die notwendigen Berechnungen wird auf die Beschreibung der Anlagentechnik gemäß [6] zurückgegriffen (siehe auch Abschnitt 2.3.2.3 auf Seite 11).

## 2.3 Rechenverfahren

### 2.3.1 Allgemeines

Maßnahmen zur energetischen Verbesserung von Gebäuden müssen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Es ist daher unabdingbar, einen Vergleich zwischen dem errechneten Bedarf im Ist-Zustand und im sanierten Zustand – für alle im Rahmen einer Vor-Ort-Beratung empfohlenen Verbesserungsmöglichkeiten – durchzuführen. Dieser Vergleich kann aber nur so gut die tatsächlichen Gegebenheiten widerspiegeln, wie der zugrunde liegende rechnerische Ansatz ist. Ausgehend von der Datenaufnahme wird das Gebäude thermisch mit einem Rechenverfahren beschrieben. Um später bei der Bewertung von Maßnahmen eine möglichst gute Beschreibung des sanierten Gebäudes zu bekommen, sollte die Beschreibung des Ist-Zustands an Verbrauchswerten abgeglichen werden.

Es wird dabei das Berechnungsverfahren gemäß Referentenentwurf zur EnEV bzw. DIN 4108 Teil 6 zugrundegelegt. Hierbei wird das Monatsbilanzverfahren gewählt, da nur in diesem Verfahren eine ausreichende Detailtiefe für die Betrachtung von Maßnahmen und deren Wirtschaftlichkeit vorhanden ist. Die Anlagentechnik wird künftig auf der Basis von DIN 4701 Teil 10 behandelt. Für bestehende Anlagen liegen jedoch zum großen Teil die notwendigen Kenndaten nicht vor. Die Bestimmung entsprechender Daten ist im Rahmen vorliegenden Projektes nicht möglich. Somit kann das Verfahren derzeit nicht konsistent für den Gebäudebestand übernommen werden.

### 2.3.2 Jahres-Heizenergiebedarf

Der Jahres-Heizenergiebedarf setzt sich aus dem Jahresheizwärmebedarf  $Q_h$ , dem Wärmebedarf für Warmwasser  $Q_W$ , den technischen Wärmeverlusten  $Q_t$  sowie dem Energiebetrag eines regenerativen Systems  $Q_r$ .

$$Q = Q_h + Q_W + Q_t - Q_r \quad (1)$$

zusammen.

Die Verbrauchsdaten aus der Ist-Zustandsaufnahme eines Gebäudes sind mit dieser Größe zu korrelieren.

### 2.3.2.1 Jahres-Heizwärmebedarf

Die Bestimmung des Jahres-Heizwärmebedarfs  $Q_h$  erfolgt durch Bilanzierung der Wärmeverluste infolge Transmission und Lüftung sowie der nutzbaren internen und solaren Wärmegewinne. Er entspricht der vom Heizsystem an das Gebäude abzugebenden Wärmemenge und kann durch

$$Q_h = Q_{l,T} + Q_{l,V} - \eta (Q_i + Q_s) \quad (2)$$

mit

$Q_{l,T}$	Transmissionswärmebedarf
$Q_{l,V}$	Lüftungswärmebedarf
$Q_i$	interne Wärmegewinne
$Q_s$	solare Wärmegewinne
$\eta$	Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne

berechnet werden. Der Berechnung des Heizwärmebedarfs liegen normierte meteorologische Randbedingungen zugrunde.

#### 2.3.2.1.1 Transmissionswärmebedarf

Die Transmissionswärmeverluste  $Q_{l,T}$  entstehen durch Wärmeleitung über die Gebäudehülle aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen innen und aussen.

Zur Gebäudehülle gehören alle den voll- und teilbeheizten Wohnraum nach aussen abgrenzende Flächen wie Dachflächen, Aussenwände, Fenster und Geschossdecken gegen Keller oder Erdreich. Weiterhin müssen Wärmebrücken berücksichtigt werden.

Gemäß DIN EN 832 [3] bzw. EN ISO 13789 [7] wird der Transmissionswärmebedarf unter Berücksichtigung von Wärmebrückeneffekten anhand der Gleichung

$$Q_{l,T} = F_{Gt} \left( \sum_i F_i U_i A_i + \sum_j F_j \Psi_j l_j + \sum_k F_k \chi_k \right) \quad (3)$$

mit

$F_{Gt}$	Faktor zur Berücksichtigung der Heizgradtagzahl
$F$	Temperatur-Korrekturfaktor
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)
$A$	Bauteilfläche
$\Psi$	Wärmebrückenverlustkoeffizient
$\chi$	Punktbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient

ermittelt.

In Tabelle 3 sind Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_i$  aus DIN 4108-6 wiedergegeben.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  (früher k-Wert) gibt den Wärmestrom  $Q$  in [Wh] an, der pro Stunde pro  $m^2$  Bauteilfläche bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin zwischen Innen- und Aussenluft vorliegt. Schlecht gedämmte Bauteile weisen einen hohen, gut gedämmte Bauteile einen niedrigen U-Wert auf.

Die Berechnung von U-Werten erfolgt nach DIN EN 6946 [8]. Im einfachsten Fall ist der U-Wert gemäß Gleichung 14 auf Seite 14 zu bestimmen. Die in die Berechnung eingehenden Wärmeübergangswiderstände  $R_{si} = 1/h_i$  und  $R_{se} = 1/h_e$  sind von der Richtung des Wärmestroms abhängig. In DIN EN 6946 [8] sind die anzusetzenden Rechenwerte für Wärmeübergangswiderstände für Standardfälle festgelegt. Für Sonderfälle sind entsprechende Berechnungsvorschriften gegeben. Im Rahmen der Vor-Ort-Beratung können die in Tabelle 4 angegebenen Werte für Standardfälle genommen werden.

**Tabelle 3:** Rechenwerte der Abminderungsfaktoren von Bauteilen aus [4].

Wärmestrom nach außen über	$F_x$	Temperaturbezogener Abminderungsfaktor $F_x$ [-]					
		$B' [m]^{1)}$ < 5 $R_f$ und $R_w$ <sup>2)</sup> $\leq 1$   $> 1$		5 bis 10 $R_f$ und $R_w$ <sup>2)</sup> $\leq 1$   $> 1$		> 10 $R_f$ und $R_w$ <sup>2)</sup> $\leq 1$   $> 1$	
Außenwand	$F_{AW}$	1,0					
Dach (als Systemgrenze)	$F_D$	1,0					
Dachgeschoßdecke (Dachraum nicht ausgebaut)	$F_D$	0,8					
Abseitenwand (Drempel)	$F_u$	0,8					
Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	$F_u$	0,5					
Wände und Decken zu niedrig beheizten Räumen	$F_{nb}$	0,35					
Wände und Decken zu unbeheiztem Glasvorbau bei einer Verglasung aus Einfachverglasung	$F_u$	0,8					
Zweischeibenverglasung		0,7					
Wärmeschutzverglasung		0,5					
Flächen des beheizten Kellers:	$F_G = F_{bf}$ $F_G = F_{bw}$	0,30 0,40	0,45 0,60	0,25 0,40	0,40 0,60	0,20 0,40	0,35 0,60
Fußboden <sup>3)</sup> auf dem Erdreich ohne Randdämmung	$F_G = F_{bf}$	0,45	0,50	0,40	0,50	0,25	0,35
Fußboden <sup>3)</sup> auf dem Erdreich mit Randdämmung <sup>4)</sup> : 2 m breit, waagrecht 2 m breit, senkrecht	$F_G = F_{bf}$ $F_G = F_{bf}$	0,30 0,25		0,25 0,20		0,20 0,15	
Kellerdecke <sup>5)</sup> : zum unbeheizten Keller mit Perimeterdämmung zum unbeheizten Keller ohne Perimeterdämmung	$F_G$ $F_G$	0,55 0,70		0,50 0,65		0,45 0,55	
Aufgeständerter Fußboden	$F_G$	0,90					
Niedrig beheizte Räume <sup>6)</sup> : Bodenplatte	$F_G$	0,20	0,55	0,15	0,50	0,10	0,35

<sup>1)</sup>  $B' = A_G / (0,5 P)$   
<sup>2)</sup>  $R_f$ : Wärmedurchlaßwiderstand der Bodenplatte;  $R_w$ : Wärmedurchlaßwiderstand der Kellerwand.  
<sup>3)</sup> Bei fließendem Grundwasser erhöhen sich die Temperatur-Abminderungsfaktoren um 15 %.  
<sup>4)</sup> Bei einem Wärmedurchlaßwiderstand der Randdämmung  $> 2 \text{ m}^2\text{K/W}$ ; Bodenplatte ungedämmt.  
<sup>5)</sup> Bei einer Kellerdecke (KD) mit Trittschalldämmung:  $R_{KD} < 0,5 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ; Kellerfußboden ungedämmt.  
<sup>6)</sup> Räume mit Innentemperaturen zwischen  $12^\circ\text{C}$  und  $19^\circ\text{C}$ .

**Tabelle 4:** Wärmeübergangswiderstände für Standardfälle nach DIN EN 6946 [8].

Wärmeübergangswiderstand	Richtung des Wärmestroms		
	aufwärts	horizontal	abwärts
innen $R_{si} = 1/h_i$ [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]	0,10	0,13	0,17
außen $R_{se} = 1/h_e$ [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]	0,04		

Für viele Details sind die für die Beschreibung von Wärmebrücken notwendigen  $\Psi$ - und  $\chi$ -Werte (vgl. Gl. 3) entsprechenden Katalogen und Atlanten [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] zu entnehmen. Die genannten Quellen enthalten jedoch überwiegend Details, welche zu den jeweiligen Veröffentlichungszeitpunkten aktuell waren und sind für die Vor-Ort-Beratung daher eher weniger geeignet. Zudem ist es im Rahmen einer Vor-Ort-Beratung nicht möglich, detailliert alle Konstruktionen zu erfassen. Daher sollte der pauschalisierte Ansatz für Wärmebrückeneffekte [16]

$$\Delta U_{WB} A_{ges} = \sum_j F_j \Psi_j l_j + \sum_k F_k \chi_k \quad (4)$$

verwendet werden. Damit kann die Bestimmung des Transmissionswärmebedarfs unter Berücksichtigung aller Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche und der Wärmebrückeneffekte über den Ansatz

$$Q_{l,T} = F_{Gt} (U_{AW} A_{AW} + U_W A_W + F_D U_D A_D + F_G U_G A_G + U_{DL} A_{DL} + F_{AB} U_{AB} A_{AB} + \Delta U_{WB} A_{ges}) \quad (5)$$

mit

$U$	Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)
$A$	Bauteilfläche
$F_D, F_G, F_{AB}$	Temperatur-Korrekturfaktoren (siehe Tabelle 3)

Indices:

$AW$	Außenwand
$W$	Fenster
$D$	Dach
$G$	gegen Erdreich
$DL$	Decken nach unten gegen Außenluft
$AB$	gegen unbeheizte Räume
$WB$	Wärmebrücke
$ges$	gesamte wärmeübertragende Hüllfläche

vorgenommen werden. Dabei sollte im Rahmen der Vor-Ort-Beratung für  $\Delta U_{WB}$  der Wert 0,1 W/(m<sup>2</sup> K) eingesetzt werden.

### 2.3.2.1.2 Lüftungswärmebedarf

Lüftungswärmeverluste entstehen durch Austausch von erwärmter Innenluft gegen kalte Aussenluft über Fenster und Türen (natürliche Lüftung), Fugen (In- bzw. Exfiltration) oder eine Lüftungsanlage. Der Lüftungswärmebedarf berechnet sich zu

$$Q_{l,V} = F_{Gt} 0,34 n V \quad (6)$$

mit

$V$	beheiztes Luftvolumen
$n$	Luftwechsel(rate).

Dabei kann das beheizte Luftvolumen vereinfacht zu

$$\begin{aligned} V &= 0,76 V_e && \text{bei Gebäuden bis zu 3 Vollgeschossen mit nicht mehr als 2 Wohnungen} \\ V &= 0,80 V_e && \text{in den übrigen Fällen} \end{aligned} \quad (7)$$

berechnet werden.  $V_e$  ist das über Außenmaße berechnete Brutto-Volumen des Gebäudes.

**Tabelle 5:** Für Wärmebedarfsberechnungen anzusetzende interne Wärmegewinne (Auszug aus Anhang 1, Tabelle 2 des Referentenentwurfs zur EnEV [2]).

Zeile	KenngroÙe	Fundstelle der KenngroÙe	Festlegung
Spalte	1	2	3
3	Mittlerer interner Wärmegewinne $Q_i$	DIN EN 832 [3] Gleichung (13)	$\phi_i = q_i A_N$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• bei Wohngebäuden mit dezentraler Warmwasserbereitung <math>q_i = 4,5 \text{ W/m}^2</math></li> <li>• bei anderen Wohngebäuden <math>q_i = 5 \text{ W/m}^2</math></li> <li>• bei Büro- und Verwaltungsgebäuden <math>q_i = 6 \text{ W/m}^2</math></li> <li>• bei allen weiteren Gebäuden <math>q_i = 5 \text{ W/m}^2</math>, soweit hierfür in Regeln der Technik nicht andere Werte festgelegt sind.</li> </ul>

### 2.3.2.1.3 Interne Wärmegewinne

Die Nutzer eines Gebäudes, elektrische Geräte (E-Herd, Küchenmaschinen etc.) sowie Beleuchtungs- vorrichtungen und warmes Wasser (Duschen, Baden etc.) geben Wärme an das Gebäude ab. Diese Wärme wird in Gleichung 2 als "interne Wärmegewinne"  $Q_i$  berücksichtigt. Es muß bei der vereinfachten Festlegung der internen Wärmegewinne anhand von pauschalen Werten unterschieden werden, welche Nutzung des Gebäudes primär vorliegt. In Gebäuden mit büroähnlicher Nutzung sind die internen Wärmegewinne durch Computer und Menschen höher als bei Wohngebäuden.

Bei der Festlegung der internen Wärmegewinne kann angenommen werden, daß die Zunahme der Zahl der Geräte heute gegenüber früher in etwa durch die Abnahme der spezifischen Leistung der moderneren Einzelgeräte aufgehoben wird, d.h. die internen Wärmegewinne insgesamt weitgehend gleich geblieben sind und die Werte aus DIN 4108-6 für den Gebäudebestand übernommen werden können. In Tabelle 5 sind die gem. [2] anzusetzenden Werte wiedergegeben.

Die internen Wärmegewinne werden abhängig vom beheizten Gebäudevolumen (siehe Gleichung 7) angesetzt.

### 2.3.2.1.4 Solare Wärmegewinne

Solare Wärmegewinne tragen zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs bei. Wesentliche Einflußfaktoren sind

- die mittlere solare Einstrahlung auf Bauteiloberflächen (Orientierung, Neigung, Verschattung)
- der Gesamtenergiedurchlaßgrad transparenter Bauteile
- Abminderungsfaktoren durch Sonnenschutzvorrichtungen
- Absorptionsgrad opaker Bauteile.

Sofern keine genauen Werte bekannt sind, ist der Rahmenanteil bei Fenstern zu 30% anzusetzen [4].

Grundsätzlich ist in Zusammenhang mit solaren Wärmegewinnen das Vermeiden der Überhitzung im Sommer zu beachten. Zur Sicherstellung eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes werden in [2] maximal zulässige Sonneneintragskennwerte (g<sub>f</sub>) in Abhängigkeit von der Klimaregion, Bauausführung und der Nutzung vorgegeben.

Im Rahmen der Vor-Ort-Beratung bei Wohngebäuden ist die Problematik der sommerlichen Überhitzung in aller Regel von untergeordneter Bedeutung.

### 2.3.2.2 Jahres-Wärmebedarf für Warmwasser

Die Bewertung des Heizwärmebedarfs bei Gebäuden im Bestand erfordert eine Aufschlüsselung des an Verbrauchsdaten abgleichbaren Heizenergiebedarfs. I.d.R. muß der Wärmebedarf für Trinkwarmwasser anhand einer Abschätzung ermittelt werden. Nur in Ausnahmefällen werden getrennte Verbrauchsdaten vorliegen. Der Jahres-Wärmebedarf für Trinkwarmwasser kann aus

$$Q_W = ((\rho c)_W) V_W (\Theta_W - \Theta_0) \quad (8)$$

mit

$(\rho c)_W$	die volumenspezifische Wärmekapazität des Wassers; $(\rho c)_W = 1,161 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \text{ K})$
$V_W$	die Menge (Volumen, Angabe von Zähler) des warmen Wassers
$\Theta_W$	die Temperatur des abgegebenen Warmwassers
$\Theta_0$	die Temperatur des Wassers vor Eintritt in das Warmwassersystem

ermittelt werden.

Wenn keine Angaben zum Warmwasserverbrauch zu ermitteln sind, können folgende Werte angenommen werden:

$V_W$	=	0,75 m <sup>3</sup> pro Person und Monat
$\Theta_W$	=	50 °C
$\Theta_0$	=	10 °C

Die Energieeinsparverordnung sieht für den anzusetzenden Nutz-Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung im Sinne von DIN V 4701-10 einen Wert von 12,5 kWh/(m<sup>2</sup> a) vor.

### 2.3.2.3 Technische Wärmeverluste

Die in DIN 4701-10 [5] im normativen Anhang C tabellarisch aufgeführten Aufwandszahlen sind auf der Basis einer Heizperiode von 185 Tagen Dauer ermittelt. Für den Gebäudebestand mit Baujahr vor 1984 muß demgegenüber in aller Regel eine längere Heizperiodendauer von ca. 220 bis 275<sup>3</sup> Tagen angesetzt werden. Folglich sind die angegebenen Aufwandszahlen für den Gebäudebestand nicht verwendbar. Dem Rechenverfahren entsprechende Aufwandszahlen für Anlagen im Gebäudebestand liegen nicht vor. Eine konsistente Datengrundlage für die Beurteilung von Alt- und Neuanlagen gemäß DIN 4701-10 liegt damit derzeit nicht vor.

Die im Rahmen der Vor-Ort-Beratung notwendige Gesamtbetrachtung von Gebäude und Anlagentechnik kann beispielsweise auf der Basis von Jahresnutzungsgraden z.B. aus [17] (siehe Tabelle 6) oder mit dem Rechenverfahren nach [6] durchgeführt werden.

Für die in Abschnitt 4 beschriebene Sensitivitätsanalyse wird der Heizwärme- und Warmwasserwärmebedarf gemäß DIN 4108-6 (Monatsbilanzverfahren) bzw. der Energieeinsparverordnung (Warmwasserwärmebedarf 12,5 kWh/(m<sup>2</sup> a)) ermittelt. Die Anlagentechnik wird gem. dem Rechenverfahren aus [6] berücksichtigt.

### 2.3.2.4 Regenerativer Energiebetrag

Der durch regenerative Systeme aufgebrachte Energiebetrag  $Q_r$  umfaßt alle dem Gebäude über Solar Kollektoren und dgl. zugeführte Energie. Die Berechnung für Neuanlagen kann gemäß DIN 4701 Teil 10 [5] erfolgen. Für alte Anlagen gilt entsprechendes wie in Abschnitt 2.3.2.3 erläutert.

Direkte solare Gewinne – solare Gewinne über Fenster etc. – gehen in  $Q_r$  nicht ein; sie werden bei der Berechnung von  $Q_h$  (siehe Abschnitt 2.3.2.1, Gleichung 2 und Abschnitt 2.3.2.1.4) berücksichtigt.

Bei den in Abschnitt 4 beschriebenen Vergleichsrechnungen werden keine regenerativen Systeme berücksichtigt.

<sup>3</sup>vgl. DIN 4108-6, Tabelle A.3, mittlere jährliche Heiztage

**Tabelle 6:** Jahresnutzungsgrade von Heizanlagen bezogen auf die eingesetzte Energie [17].

Jahresnutzungsgrad für	Wärmeerzeugung	Wärmeverteilung	Gesamte Heizungsanlage
	$\eta_a$	$\eta_v$	$\eta_{ges}$
Altanlage: Festbrennstoffe	0,60	0,90	0,54
Altanlage vor 1978: Öl/Gas	0,70	0,90	0,63
Altanlage nach 1978: Öl/Gas	0,75	0,95	0,71
Moderne Anlage mit Niedertemperaturkessel: Öl/Gas	0,90	0,95	0,86
Moderne Anlage mit Brennwertkessel: Gas	1,00	0,95	0,95
Elektro-Speicherheizgeräte	1,00	0,85	0,85

### 2.3.3 Primärenergiebedarf

Der primärenergetisch bewertete Heizenergiebedarf (Primärenergiebedarf) wird gemäß Energieeinsparverordnung durch

$$Q_p = (Q_h + Q_w) \epsilon_P \quad (9)$$

ermittelt. Hierbei ist  $\epsilon_P$  die Anlagen-Aufwandszahl. Diese ist nach DIN 4701-10 [5] zu bestimmen.

Für die weiter unten vorgestellten Vergleichsrechnungen wird aus o.a. Gründen die primärenergetische Bewertung in Anlehnung an das in [6] vorgestellte Rechenverfahren durchgeführt.

## 2.4 Meßverfahren

### 2.4.1 Geometrische Daten

Für die Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes ist neben dem weiter unten behandelten Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils die jeweilige wärmetauschende Fläche zu bestimmen. Bei der Bestimmung von geometrischen Daten – Flächen und Volumen – sind Unsicherheiten aus ganz unterschiedlichen Quellen zu erwarten. Von untergeordneter Bedeutung ist bei Einsatz entsprechender Meßgeräte dabei der Meßfehler der einzelnen Maße selbst<sup>4</sup>. Der für ein Gebäude akkumulierte reine Meßfehler liegt damit in der Regel bei weniger als 1%.

Deutlich größer können Fehler sein, die z.B.

- durch falsche Annahmen hinsichtlich des Verlaufs der wärmeübertragenden Hüllfläche,
- durch falsche Ansätze bei der Bestimmung der Grundmaße oder durch
- das Vergessen einzelner wärmetauschender Flächen

<sup>4</sup>Siehe z.B. Tabelle 8 auf Seite 24, Angaben zur Meßgenauigkeit

entstehen. Typisch sind dabei zum Beispiel die Vernachlässigung eines Kellerabganges mit Flurbereich im Keller und den entsprechenden Bauteilflächen bei Einfamilienhäusern (dieses Beispiel wird in Abschnitt 4 wieder aufgegriffen). Bei Mehrfamiliengebäuden ist häufig die Einordnung des Treppenhauses – "beheizt" oder "nicht beheizt" – schwierig.

In der Regel sind bei der Verwendung pauschaler Temperaturreduktionsfaktoren übliche Treppenhäuser von Mehrfamiliengebäuden als beheizt anzusetzen. Dies gilt auch dann, wenn keine Heizkörper im Treppenhaus vorhanden sind. Ausnahmen bilden hierbei Treppenhäuser, die nicht weitgehend in den Baukörper integriert sind (Standardfall) sondern deutlich auskragen.

## 2.4.2 Wärmetechnische Kenndaten

### 2.4.2.1 Allgemeines

Die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  (früher: k-Wert) von Bauteilen bzw. der Wärmeleitfähigkeit von Materialien ist in vielen Fällen eine wesentliche Hürde bei der Datenaufnahme von Gebäuden im Bestand.

Grundsätzlich bieten sich verschiedene Verfahren an, diese Größen zu bestimmen. Die normativ geregelte meßtechnische Vorgehensweise [18] verlangt eine aufwendige Meßtechnik sowie eine lange Meßdauer und eignet sich daher nicht für die Vor-Ort-Beratung.

Zwei meßtechnisch einfache Methoden zur Ermittlung von Wärmedurchgangskoeffizienten, einmal über die Bestimmung von Oberflächen- und Lufttemperaturen und der Umrechnung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten mit Norm-Wärmeübergängen, zum anderen über die Messung von Lufttemperaturen und des Wärmestromes werden hinsichtlich der mit diesen Methoden zu erwartenden Meßgenauigkeit diskutiert. Von beiden Ansätzen soll jeweils anhand zweier Betrachtungen abgeschätzt werden, welche Unsicherheit das jeweilige Meßergebnis hat. Zum einen ist die Unsicherheit durch die Genauigkeit der Meßwerte bestimmt, zum anderen durch das instationäre thermische Verhalten des untersuchten Bauteils. Ersteres läßt sich einfach anhand der abgeleiteten Bestimmungsgleichungen und den Angaben der Gerätehersteller zur Meßgenauigkeit, zweiteres über eine dynamische Simulation und einer "rechnerischen Messung" abschätzen.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine Stoffkenngroße. Sie ist maßgeblich von der Dichte und Struktur, in geringerem Umfang auch von der Temperatur und Feuchte des Stoffes abhängig. In manchen Fällen kann auch das Alter des Stoffes einen Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit haben. Als Beispiel können hier Extruderschäume genannt werden, die nicht mit Luft als Treibgas geschäumt wurden. Sie gibt diejenige Wärmemenge  $Q$  in [Wh] an, welche im Beharrungszustand durch eine 1 m dicke Schicht eines Stoffes pro Stunde und  $m^2$  bei 1 K Temperaturdifferenz zwischen den zwei Grenzflächen hindurchströmt. Häufig ist für Stoffe die Wärmedurchlaßzahl  $\Lambda$  gegeben. Es besteht dabei die Beziehung

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{s}{\lambda} \quad (10)$$

bzw.

$$\lambda = s \Lambda \quad \left[ \frac{W}{m K} \right] \quad (11)$$

mit der Schichtdicke  $s$  des Stoffes in [m].

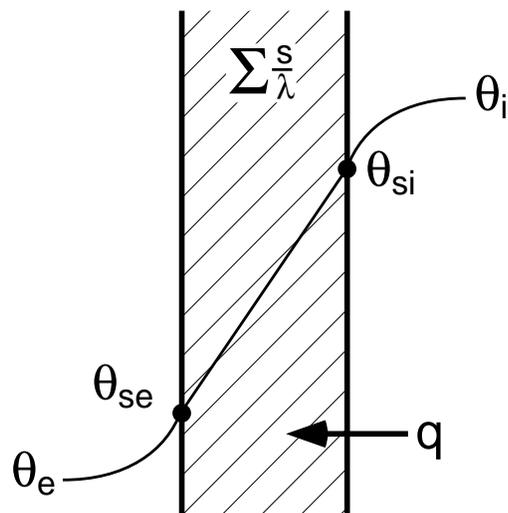
Für die Berechnung des Wärmeschutzes sollten – wie dies auch gemäß Wärmeschutzverordnung vorgeschrieben ist – die in DIN 4108-4 bzw. im Bundesanzeiger [19] veröffentlichten Rechenwerte verwendet werden.

Die Methode, den Wärmedurchgangskoeffizienten über die Ermittlung der Rohdichte des Bauteilmaterials und der dazu gehörigen Wärmeleitfähigkeit aus der Literatur zu Bestimmen, wird ebenfalls hinsichtlich der zu erwartenden Genauigkeit untersucht.

### 2.4.2.2 Verwendete Ansätze

#### 2.4.2.2.1 Fehler durch Meßgeräte

In Bild 1 ist für die Temperatur- und Wärmestrommethoden der allgemeine Ansatz skizziert. Die Auswertung beruht auf der Annahme eines stationären Temperaturprofils im Bauteil. Es gelten



**Bild 1:** Wärmestrom und Temperaturen für die Betrachtung der Wärmeleitung durch eine Wand unter stationären Randbedingungen.

$$q = \frac{\lambda}{s} (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (12)$$

$$q = h_i (\theta_i - \theta_{si}) \quad (13)$$

und für den einfachen Fall eines aus Schichten bestehenden Bauteils im Regelquerschnitt

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_e}} \quad \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (14)$$

mit

- $h_i, h_e$  = Wärmeübergangskoeffizient innen bzw. aussen
- $s_k$  = Schichtdicke der k-ten Schicht
- $\lambda_k$  = Wärmeleitfähigkeit der k-ten Schicht.

Durch geeignete Umformung erhält man damit für Konstruktionen ohne belüftete Schichten zum Beispiel

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \left( 1 + \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\theta_i - \theta_{si}} \right) + \frac{1}{h_e}} \quad (15)$$

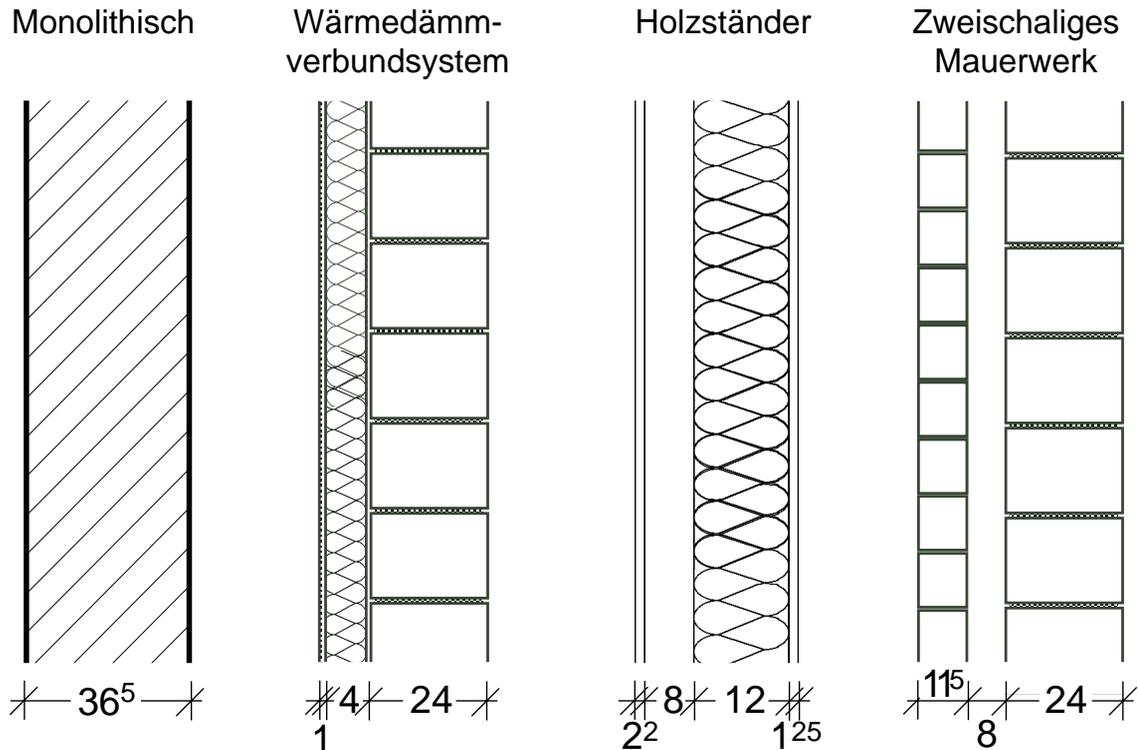
oder auch

$$U = h_i \left( \frac{\theta_i - \theta_{si}}{\theta_i - \theta_e} \right) \quad (16)$$

also eine Bestimmungsgleichung für U die nur von den Wärmeübergangskoeffizienten  $h_i$  und  $h_e$  bzw. nur  $h_i$  sowie drei relativ leicht meßbaren Temperaturen abhängt. Für den inneren bzw. äußeren Wärmeübergangskoeffizient wird jeweils der Norm-Wert eingesetzt. Bietet das zur Verfügung stehende Meßgerät die Funktion "Wärmestrom" an (siehe Abschnitt 3.2.7), kann der U-Wert alternativ über den Ansatz

$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad (17)$$

bestimmt werden.



**Bild 2:** Wandaufbauten für die Untersuchung des Einflusses instationärer Temperaturprofile auf die Genauigkeit von einfachen Meßverfahren des Wärmedurchgangskoeffizienten.

#### 2.4.2.2 Fehler durch instationäres Verhalten

Für die in Bild 2 dargestellten Konstruktionen wird anhand von "rechnerischen Messungen" untersucht, welche Unsicherheit infolge instationärer Temperaturprofile in den Wandaufbauten bei der einfachen Messung des Wärmedurchgangs zu erwarten ist.

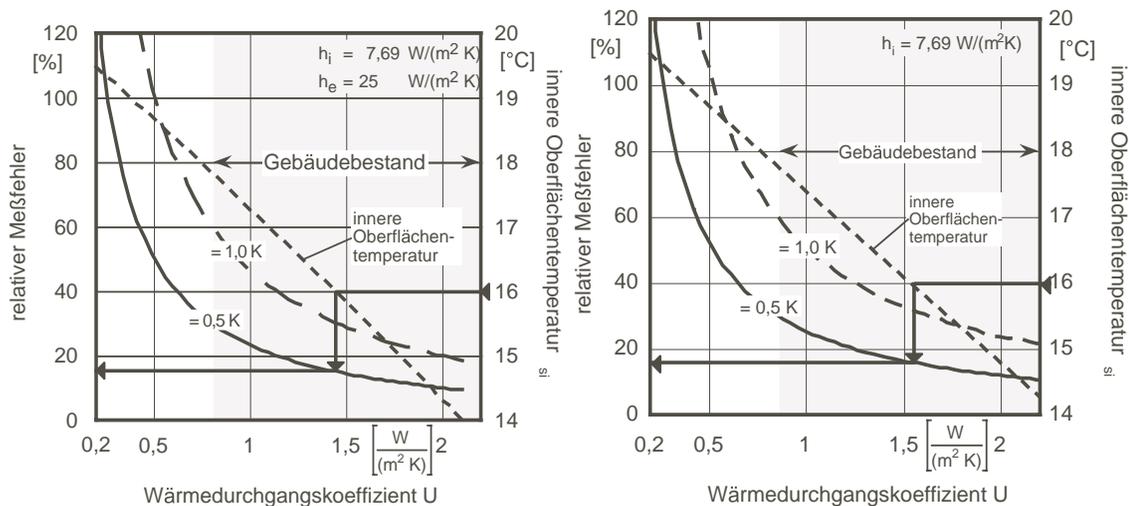
#### 2.4.2.3 Wärmedurchgangskoeffizient über Temperaturen

Es werden drei Temperaturen  $\theta_k$  mit den – auf die Meßtechnik zurückzuführenden – Einzelfehlern  $\delta\theta_k$  ermittelt. D. h., die Unsicherheit im U-Wert  $\Delta U$  kann durch einfache Fehlerfortpflanzung gemäß

$$\Delta U = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial U}{\partial \theta_k} \delta\theta_k \right)^2} \quad (18)$$

bestimmt werden. Hierbei ist stillschweigend angenommen worden, daß die gem. Gleichung 15 in die Auswertung eingehenden Wärmeübergangskoeffizienten tatsächlich vorliegen.

In Bild 3 sind für verschiedene genaue Meßgeräte ( $\delta\theta = 0,5$  bzw. 1 K) die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten zu erwartenden relativen Unsicherheiten aufgetragen. Das in Bild 3 eingezeichnete **Beispiel** ist wie folgt zu lesen: Bei  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $\theta_e = 0^\circ\text{C}$  und der inneren Oberflächentemperatur  $\theta_{si} = 16^\circ\text{C}$  ist der gerätebedingte Meßfehler mit ca. 17 % anzusetzen (besseres Luft- bzw. Oberflächentemperaturmeßgerät mit  $\delta\theta = 0,5$  K). Dabei ist für die äußere Luft- bzw. Oberflächentemperatur als Meßunsicherheit die Reproduzierbarkeit angesetzt ( $\delta\text{Repro.} \approx 0,2 \delta\theta$ ).



**Bild 3:** Meßunsicherheit bei unbelüfteten Konstruktionen infolge der Geräteungenauigkeit bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Temperaturmessungen. Links gem. Gl. 15, rechts gem. Gl. 16, jeweils unter Annahme stationärer Bedingungen ( $\theta_i = 20^{\circ}C, \theta_e = 0^{\circ}C$ ).

## 2.4.2.4 Wärmedurchgangskoeffizient über die Wärmestromdichte

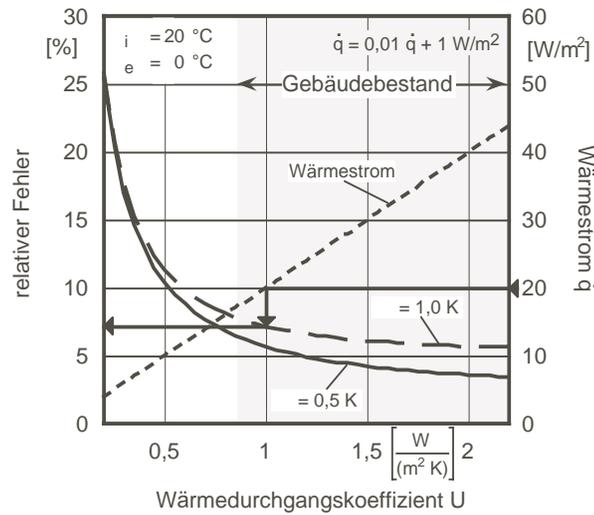
### 2.4.2.4.1 Stationärer Fall

Bild 4 zeigt für  $U$ -Werte, die aus der Messung der Lufttemperaturen im Raum und in der Umgebung sowie der Messung der Wärmestromdichte ermittelt werden, den unter der Annahme stationärer Bedingungen zu erwartenden relativen Fehler. Dabei ist für die Wärmestromdichte  $q$  die Meßunsicherheit zu  $\delta q = 0,01 q + 1 \text{ W}/(m^2 K)$  gesetzt (Herstellerangaben eines auf dem Markt erhältlichen Meßgerätes). Für die Meßunsicherheit der Lufttemperatur außen wird angenommen, daß sie in etwa der Reproduzierbarkeit des Meßgerätes entspricht. In Bild 4 ist wiederum ein **Beispiel** gegeben: Bei  $\theta_i = 20^{\circ}C, \theta_e = 0^{\circ}C$  und einem Wärmestrom an der Oberfläche von  $20 \text{ W}/(m^2)$  ist der gerätebedingte Meßfehler mit ca. 7 % anzusetzen (einfaches Lufttemperaturmeßgerät mit  $\delta\theta = 1,0 \text{ K}$ ). Der Vergleich der in den Bildern 3 und 4 gegebenen Beispiele zeigt sofort, daß die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten über die Wärmestromdichte und die Lufttemperaturen im stationären Fall eine wesentlich geringere Meßunsicherheit aufweist. Zudem muß bei dieser Methode keine Annahme zu den Wärmeübergangskoeffizienten getroffen werden.

### 2.4.2.4.2 Instationärer Fall

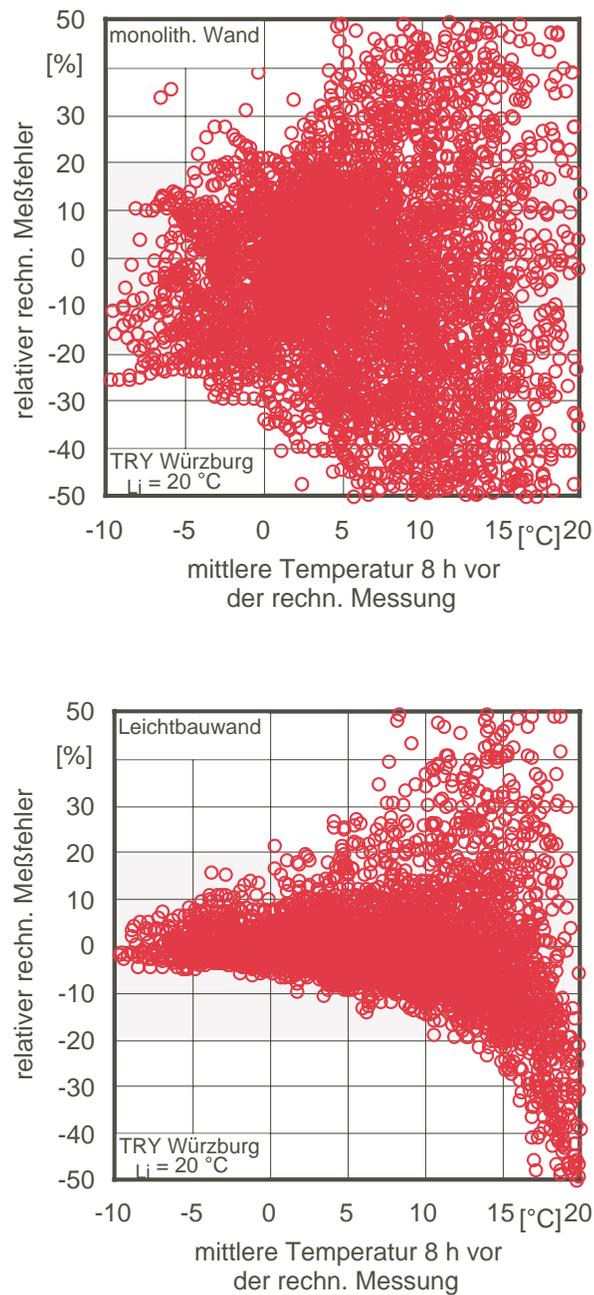
Neben der o.a. Meßunsicherheit infolge der Geräteungenauigkeit muß auch die mögliche Ungenauigkeit einer solchen Messung durch ein nicht-stationäres Temperaturprofil im Wandquerschnitt infolge von Temperaturschwankungen innen und insbesondere in der Umgebung sowie durch Strahlungseinflüsse betrachtet werden. Hierzu werden dynamische Simulationen des thermischen Verhaltens der in Bild 2 dargestellten Wandaufbauten durchgeführt. Im Rahmen der Simulationen wird nach einer notwendigen Vorlaufperiode zu jedem Zeitschritt berechnet, zu welchem "Meßergebnis" eine Auswertung der entsprechenden Temperaturen und des Wärmestroms gem. Gleichung 17 führt.

In Bild 5 ist für den monolithischen Wandaufbau sowie die Holzständerwand gem. Bild 2 dargestellt, wie die Genauigkeit dieser "rechnerischen Messungen" von der mittleren Umgebungstemperatur der letzten acht Stunden vor dem jeweils betrachteten "Messzeitpunkt" abhängt. Dabei ist eine konstante Temperatur im inneren sowie eine Standardabweichung des Mittelwertes der Umgebungstemperatur in den jeweils vorangegangenen acht Stunden kleiner 2 K vorausgesetzt. Strahlung wird nicht berücksichtigt. Die genannten Randbedingungen entsprechen z.B. der Messung an einer nach Norden ausgerichteten Wand nach acht Stunden mit nur geringen Schwankungen der Lufttemperatur, beispielsweise an einem trüben Wintertag. Die (Stunden-) Werte für die Lufttemperatur außen sind dem Testreferenzjahr (TRY) "Würzburg" entnommen. Bild 6 gibt diesen Zusammenhang für die betrachteten Konstruktionen mit Wärmedämmverbundsystem bzw. Vormauerschale wieder.

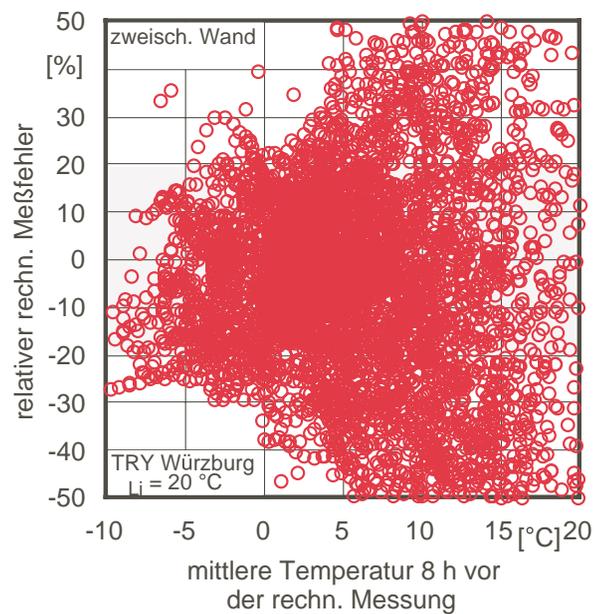
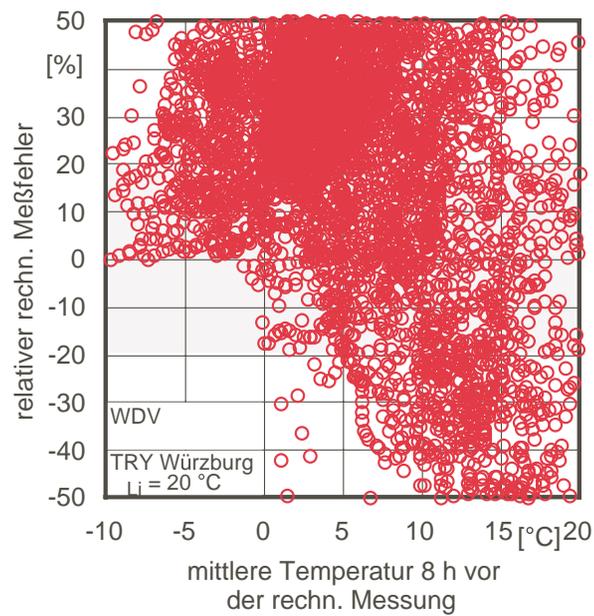


**Bild 4:** Meßunsicherheit bei unbelüfteten Konstruktionen infolge der Geräteungenauigkeit bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen und außen sowie des Wärmestroms (unter Annahme stationärer Bedingungen,  $\theta_i=20\text{ °C}$ ,  $\theta_e=0\text{ °C}$ ).

Es ist den Bildern 5 und 6 leicht zu entnehmen, daß die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand der hier beschriebenen Methode bei massiven Konstruktionen in aller Regel mit einer Meßunsicherheit von deutlich über 20% behaftet ist. Demgegenüber kann die Methode bei leichten Konstruktionen durchaus zu zufriedenstellenden Meßergebnissen führen.



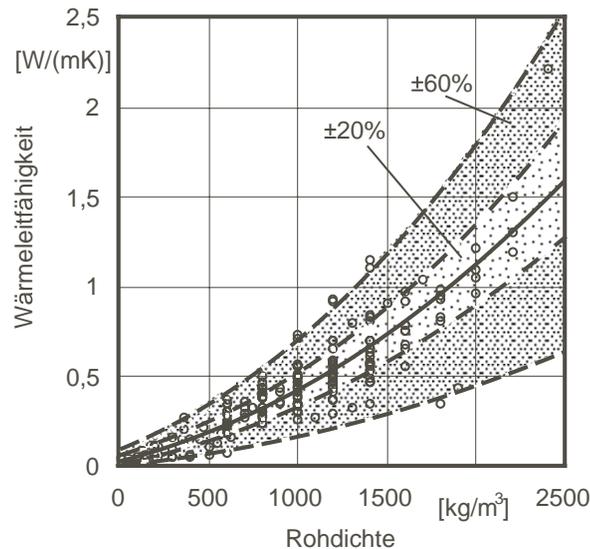
**Bild 5:** Meßunsicherheit infolge instationärer Bedingungen. Dargestellt ist die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen (konstant 20°C) und außen (TRY Würzburg) sowie des Wärmestroms rechnerisch ermittelte Meßunsicherheit. Oben der monolithische Wandaufbau, unten die betrachtete Holzständerwand.



**Bild 6:** Meßunsicherheit infolge instationärer Bedingungen. Dargestellt ist die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen (konstant  $20\text{ °C}$ ) und außen (TRY Würzburg) sowie des Wärmestroms rechnerisch ermittelte Meßunsicherheit. Oben der Wandaufbau mit Wärmedämmverbundsystem, unten die betrachtete zweischalige Wand.

### 2.4.2.5 Wärmedurchgangskoeffizient über die Dichte

Soll der Wärmedurchgangskoeffizient anhand einer Rohdichtebestimmung erfolgen, ist zusätzlich zu der Rohdichte nach Möglichkeit auch die Stoffgruppe des Baumaterials zu bestimmen. Die Wärmeleitfähigkeit kann sich zwischen zwei Stoffgruppen bei gleicher Rohdichte durchaus deutlich unterscheiden. In Tabelle 9 auf Seite 36 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffgruppen in Abhängigkeit von der Rohdichte zusammengefaßt. In Bild 7 ist für diese Materialien die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte graphisch dargestellt. Eine aus den Daten berechnete Näherungsgleichung sowie deren  $\pm 20\%$ - und  $\pm 60\%$ -Schranken sind angegeben. Es ist gut zu erkennen, daß innerhalb einer Rohdichteklasse deutliche Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit bestehen können.



**Bild 7:** Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit von der Rohdichte des Materials.

### 2.4.2.6 Folgerungen

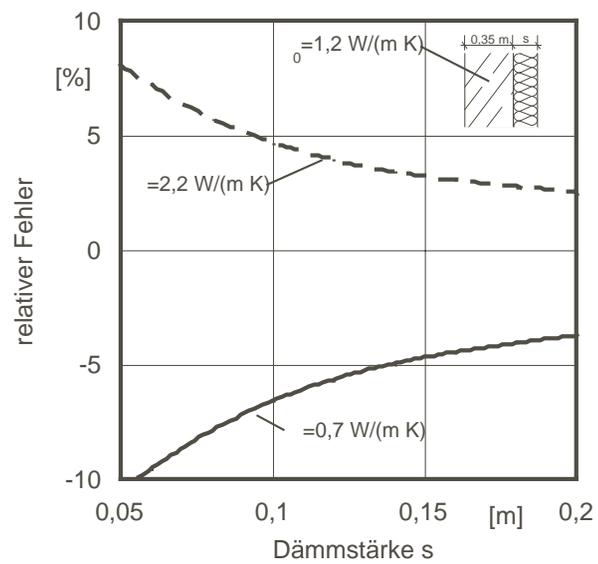
Die Bestimmung des U-Wertes einer Konstruktion anhand einfacher Temperatur- bzw. Temperatur- und Wärmestrommessungen ist kaum praxistauglich. Ursache hierfür ist in erster Linie die instationäre Temperaturverteilung in Bauteilen. Diese Temperaturverteilung führt dazu, daß gemessene Oberflächentemperaturen und Wärmeströme nicht zu den zum Meßzeitpunkt vorgefundenen Lufttemperaturen "passen" und infolge dessen die Berechnung eines U-Wertes auf der Basis derartiger Ein-Punkt-Messungen i.d.R. zu großen Fehlern im Ergebnis führen wird.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gem. DIN EN 12494 [18] berücksichtigt die genannte Problematik durch die Vorgabe langer Meßperioden. Diese Vorgehensweise ist jedoch für den Einsatz im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung zu aufwendig.

Soll ein Bauteil nachträglich gedämmt werden, ist die genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bzw. des U-Wertes im Ausgangsfall aber auch nicht entscheidend. Nach einer entsprechenden Dämmmaßnahme dominiert der Wärmedurchgangswiderstand der Dämmschicht das gesamte Bauteil. In Bild 8 ist ein Beispiel gegeben, wie sich die Fehleinschätzung eines Bauteils im Ausgangszustand auf die Beurteilung des Bauteils nach der Dämmmaßnahme in Abhängigkeit von der gewählten Dämmstärke auswirkt.

Als Ausgangsfall liegt der Darstellung in Bild 8 eine Wand aus Kiesbeton mit einer Rohdichte von  $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$  vor. Aus Tabelle 9 ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  zu entnehmen. Ein Vor-Ort-Energieberater nimmt an, der Baustoff sei Kiesbeton mit einer Rohdichte von  $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ , ein anderer, der Baustoff sei Porenbeton mit Quarzsand mit einer Rohdichte von  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  (es ist kein Material zu entnehmen, die Baubeschreibung gibt keine nähere Information, der Hausherr ist nicht aus der Branche).

Die genannten Annahmen sind bereits mit Fehlern der Wärmeleitfähigkeit von 54 bzw. rund 70 % behaftet. Bild 8 ist zu entnehmen, daß der Fehler im U-Wert nach einer Dämmmaßnahme mit 12 - 15 cm Dämmstärke nur noch ca. 5 % beträgt und damit völlig akzeptabel ist.



**Bild 8:** Reduktion des Fehlers bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines zu sanierenden Bauteils in Abhängigkeit von der aufgetragenen Dämmstoffstärke.

## **3 Hilfsmittel und Geräte zur Aufnahme von Gebäudekenndaten**

### **3.1 Geometrische Kenndaten**

#### **3.1.1 Allgemeines**

Bei der Ermittlung der wärmeübertragenden Hüllfläche und des beheizten Gebäudevolumens ergeben sich häufig Probleme. Sind Bauzeichnungen vorhanden, hat der Vor-Ort-Berater eine gute Basis für die Gebäudeaufnahme. Allerdings sollten in jedem Fall stichprobenartig die in den Bauzeichnungen enthaltenen Maßangaben mit dem gebauten Objekt verglichen werden. Ebenso ist eine Überprüfung des Raumprogramms empfehlenswert.

Sollten keine Bauzeichnungen des zu untersuchenden Gebäudes vorhanden sein, müssen alle nötigen Maße vor Ort aufgenommen werden. Um die Flächen einzelner Bauteile vor Ort ermitteln zu können, ist in der Regel ein grosser Zeitaufwand nötig. Fast immer sind in einem Gebäude Fenster verschiedener Grössen eingebaut, Bauteile sind oft durch Bewuchs schwer zugänglich oder in bestimmten Bereichen nur über Leitern zu erreichen und Dachflächen lassen sich schwer ausmessen.

Nachfolgend werden verschiedene Werkzeuge und Möglichkeiten vorgestellt, die sich dem Vor-Ort-Berater bei der Maß- und Flächenermittlung bieten.

#### **3.1.2 Bauzeichnungen**

Die Praxis zeigt, dass in der Regel beim Hauseigentümer Bauzeichnungen des Gebäudes vorhanden sind. Sollte er nicht mehr über Planungsunterlagen verfügen, kann man evtl. aus Archiven des zuständigen Bauamtes Zeichnungen erhalten. Durch vorhandene Bauzeichnungen lassen sich bequem die Flächen der einzelnen Bauteile bestimmen. Die Maße sind allerdings immer vor Ort zu überprüfen.

Sind keine Zeichnungen verfügbar, müssen alle Maße neu ermittelt werden.

#### **3.1.3 Zollstock und Bandmaß**

Klassische Maßnahmen der Flächen- bzw. Längenmessung sind die Ermittlung mit Zollstock und Bandmaß. Die Anschaffungskosten dafür sind sehr gering, der Zeitaufwand jedoch entsprechend hoch. Durch zu hohe oder unzugängliche Fassaden bzw. im Dachbereich stösst man schnell an die Grenzen dieses Messverfahrens. In manchen Bereichen ist es erst gar nicht möglich, mit dem Bandmaß oder Zollstock zu messen.

Bei grösseren Längen können bei der Zollstock-Messung Ungenauigkeiten durch viele 2m-Segmente auftreten. Zum schnellen Messen von Fensterlaibungen und anderen kleinen Maßen ist der Zollstock ein sehr gutes Hilfsmittel. Bei Messungen mit dem Bandmaß benötigt man einen Messgehilfen; es kommt zu erhöhten Lohnkosten.

Eine Erweiterung des Zollstocks bzw. eine Alternative zum Bandmaß bieten Teleskop-Meßstäbe. Derartige Meßstäbe gibt es in verschiedenen Längen, ab ca. 5 m bis hin zu 15 m. Für die schnelle und präzise Maßbestimmung sind Modelle mit integriertem Maßband vorteilhaft. Die Kosten von ca. 100 € bis 660 € liegen jedoch deutlich über denen eines einfachen Bandmaßes bis in die Größenordnung der besseren Laser-Entfernungsmessgeräte (siehe Abschnitt 3.1.4). In Tabelle 7 sind einige Beispiele für auf dem Markt erhältliche Produkte angegeben. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

#### **3.1.4 Laser-Entfernungsmessgerät**

##### **3.1.4.1 Allgemeines**

Laser-Entfernungsmessgeräte ermöglichen es, Längenmessungen schnell und bequem durchzuführen.

Mit einem sichtbaren roten Laserpunkt wird der Messort angezielt. Durch einen Knopfdruck wird die Streckenlänge zwischen dem Laser-Entfernungsmessgerät und dem Punkt in Sekundenbruchteilen gemessen und digital angezeigt. Der Messbereich handelsüblicher Geräte liegt zwischen 0,30 m bis ca. 100 m. Zum Messen ist im allgemeinen kein Helfer nötig.

**Tabelle 7:** Übersicht über einige handelsübliche Teleskopmeßstäbe [20, 21].

Firma	Modell	Länge [m]	Maßband	Gewicht [kg]	Preis ca.
geo-Fennel	TM 5	5,0	Nein	1,0	100 €
	Telefix 8	8,0	Ja	3,5	320 €
	TM 15	15,0	Nein	5,0	660 €
Sokkia	SK202	8,0	Ja	1,95	290 €

Ausser der Streckenmessung haben derartige Gerät häufig weitere praktische Funktionen wie (siehe Bild 9 für weitere Beispiele)

- Höhe (Breite) aus 3 Messungen
- Detailmaß aus Fassade, z.B. Stockwerkshöhe
- Dauermessung, Minimumwert (zum rechtwinkligen Messen) Höhe (Breite) aus 2 Messungen
- Mittelwert aus mehreren Messungen (höhere Übertragungsgenauigkeit) Dauermessung, Maximalwert (zum Messen einer Raumdiagonalen).
- Gruppenbildung innerhalb des zur Verfügung stehenden Speichers.
- usw.

Ein Laser-Handmessgerät sollte mehrere Messwerte speichern können und über eine Schnittstelle zu einem PC verfügen. In Tabelle 8 ist ein Überblick über erhältliche Geräte, deren Funktionsumfang und Anschaffungskosten gegeben. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Mit wenig Übung bringt ein Laser-Entfernungsmeßgerät gegenüber den "klassischen" Messverfahren (Zollstock und Bandmass) eine erhebliche Zeitersparnis. Dies kann beispielsweise für die Aufnahme von Gebäuden, für die jegliche Unterlagen fehlen oder die aus einem anderen Grund vollständig neu aufgenommen werden sollen, durch den kombinierten Einsatz eines Laser-Entfernungsmeßgerätes und einer entsprechenden Software zu einem deutlichen Synergieeffekt führen.

### 3.1.4.2 Laser-Entfernungsmeßgerät mit CAD-Schnittstelle

#### 3.1.4.2.1 Allgemeines

Mit der Meßsoftware miniCASOB von aadiplan int'l [22] steht eine Software zur Verfügung, welche die präzise Lasermessung des Leica Disto (memo und pro) mit einer CAD-Software verbindet. Mit Hilfe von miniCASOB ist es möglich, direkt bei der Messung ein 3-dimensionales Modell einer Etage eines Gebäudes zu erstellen, dieses etagenweise in eine CAD Software zu exportieren und dort ein Gesamtmodell zu erzeugen. Exportschnittstellen erlauben sowohl die Ausgabe der Daten als 3d - \*.dxf Datei, als auch die Ausgabe der einzelnen Bauteildaten als Access - Datenbank. Aufbauend auf dem ersten Raum kann hier etagenweise das ganze Gebäude erfaßt werden.

#### 3.1.4.2.2 Einrichtung

Der über das mitgelieferte Kabel an ein Notebook angeschlossene Disto wird per Hyperterminal (Windows) mit dem Notebook abgestimmt, d.h. das Übertragungsformat wird angeglichen. Mit dem Hyperterminal kann der Disto dann Online betrieben werden. Nachdem der Disto eingerichtet wurde kann mit der Arbeit in miniCASOB begonnen werden. Dazu ist es ratsam, das Notebook mit Disto auf einem "Bauchladen" am Mann zu haben. Vorsicht ist bei der Wahl der Meßweise geboten, da der Disto zwischen Messung ab Vorder- und Hinterkante unterscheidet und im miniCASOB diese beiden Schaltflächen sehr eng beieinander liegen.

Tabelle 8: Marktübersicht Laser-Entfernungsmeßgeräte.

Hersteller Modell	DUS 20 <sup>1)</sup>	Bosch DLE 30 PLUS	geo-Fennel DMP <sup>1),2)</sup>	Hilti PD 20	Hilti PD 25	Jenoptik LEM 30	Leica		RoboToolz Ropo Tape	Sokkia	
							Disto Classic	Disto Memo		MM30	MM30R
Meßbereich von bis (reflektorlos)	0,6 20	0,3 max. 30 <sup>3)</sup>	0,5 18	0,3 ca. 50	0,3 ca. 50	0,2 30	0,3 30	0,2 30	90	0,2 30	0,2 30
bis (mit Reflektorf.)	–	k.A.	–	100	100	100	100	100	–	100	100
Auflösung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	1	1	k.A.	1	1
Genauigkeit	±0,5%	±3	±0,5%	±3	±3	±3	±3 - 5	±3 - 5	±3	≥ ±3 <sup>4)</sup>	≥ ±3 <sup>4)</sup>
Meßzeit	k.A.	typ. <0,5 max. 4	k.A.	k.A.	k.A.	<1	0,5 - 4	0,5 - 4	k.A.	1	1
Speicher (Meßwerte)	6	–	–	1000	1000	100	1000	1000	1000	–	–
Schnittstelle	–	–	–	RS 232	RS 232	RS 232	RS 232	RS 232	–	–	RS 232
Funktionen	–	Pythagoras, Flächen, Dauer	Rechner	Pythagoras, +, -, *	Pythagoras, +, -, *	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Flächenber.	Min, Max, Flächen, Volumen, Selbsttausl.	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Gruppen, Selbsttausl.	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Gruppen,	Flächen, Volumen	Flächen, Volumen
Stromversorgung	4 x AA	4 x AA	4 x AA	2 x AA	2 x AA	4 x AA	4 x AA	4 x AA	5 x AA	NiCd-Ak.	NiCd-Ak.
Betriebsd. (Mess.)	k.A.	k.A.	k.A.	4000	4000	5000	>3000	k.A.	2000	850	850
Gewicht	k.A.	480	170	k.A.	k.A.	360	360	670	k.A.	580	580
Preis (Liste) ca.	50 €	460 €	140 €	560 €	820 €	690 €	510 €	870 €	660 €	720 €	950 €

1) Ultraschall-Entfernungsmeßgerät

2) "Dimension Master Plus"

3) innen, außen bewölkt mind. 15 m, außen sonnig mind. 6 m

4) ±3 + 50 ppm der gemessenen Distanz [mm]

### 3.1.4.2.3 Erstellen des Projektes

Zu Beginn der Arbeit an einem Projekt werden die gesamten Projektdaten in vorgesehene Masken eingegeben. Die Meßdaten selbst werden danach raumweise erfaßt. Dabei werden die Wände mittels Distomessung nach ihrer Ausrichtung (Nord, Süd ...) gemessen. Die Daten werden, nach Eingabe der Raumhöhe, sofort im Display sichtbar. Mittels Abzug- und Zuzugfunktionen können im Raum eventuelle Wandvorsprünge oder Nischen generiert werden. Fenster und Türen werden über ihre Lage zur nächsten Raumecke (die frei gewählt werden kann) eingegeben. Dabei wird festgelegt, an welchen Raum diese Türe anschließt. Auch schiefwinkelige Räume sind kein Problem. Ein Raum, der, aufgrund eines komplizierten Grundrisses im Ganzen nicht erfaßt werden kann, kann im Skizzenmodus grob vorgezeichnet werden und später durch Messungen konstruiert werden. Falls das Zimmer möbliert ist und nicht alle Wände direkt zu messen sind, können diese über Hilfspunkte eingemessen werden. Über die Definition der Wandstärken wird nach diesem Verfahren ein Raum an den anderen gehängt. In Bild 10 ist ein Beispiel dargestellt. Vorhandene Säulen im Raum, sowie Leitungskanäle etc. können nach dem gleichen Prinzip angelegt werden. Jeder Fläche können Eigenschaften, z.B. Positionen eines Leistungsverzeichnisses, zugewiesen werden (siehe Bild 11).

### 3.1.4.2.4 Export

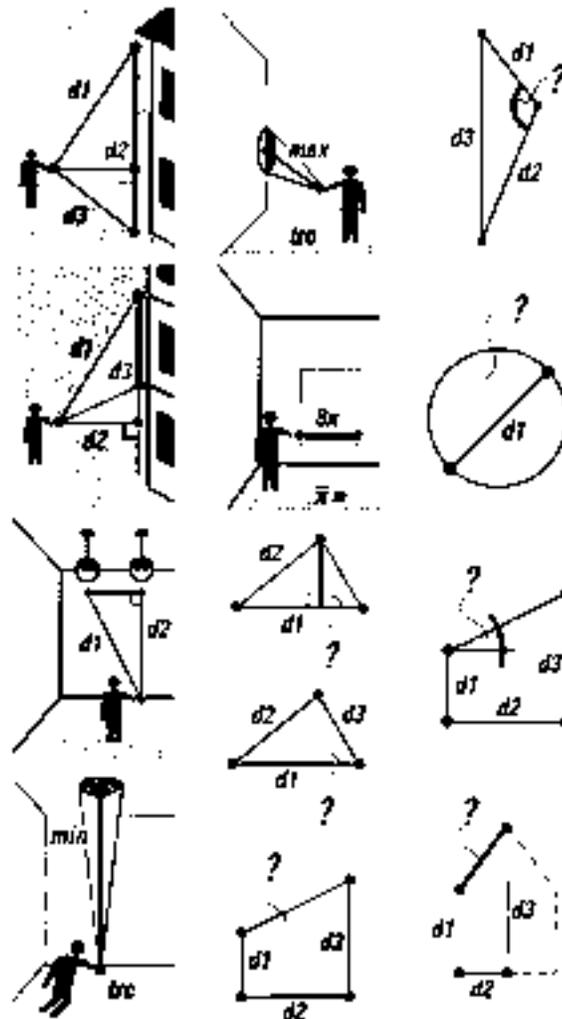
Der Datenexport nach 3d DXF-Dateien ist sehr einfach möglich. Alle Daten werden problemlos übernommen, es besteht nicht die Möglichkeit benutzerdefinierter Einstellungen. Auch die Ausgabe der Daten im Datenbankformat funktioniert reibungslos. In Microsoft Access eingelesen bietet sich die Möglichkeit einer eventuellen Nachbearbeitung der Daten, daß diese gut übersichtlich strukturiert sind. Die direkte Ausgabe bzw. Erstellung eines Raumbuches ist vorgesehen, jedoch leider noch nicht vorhanden.

### 3.1.4.2.5 Fazit

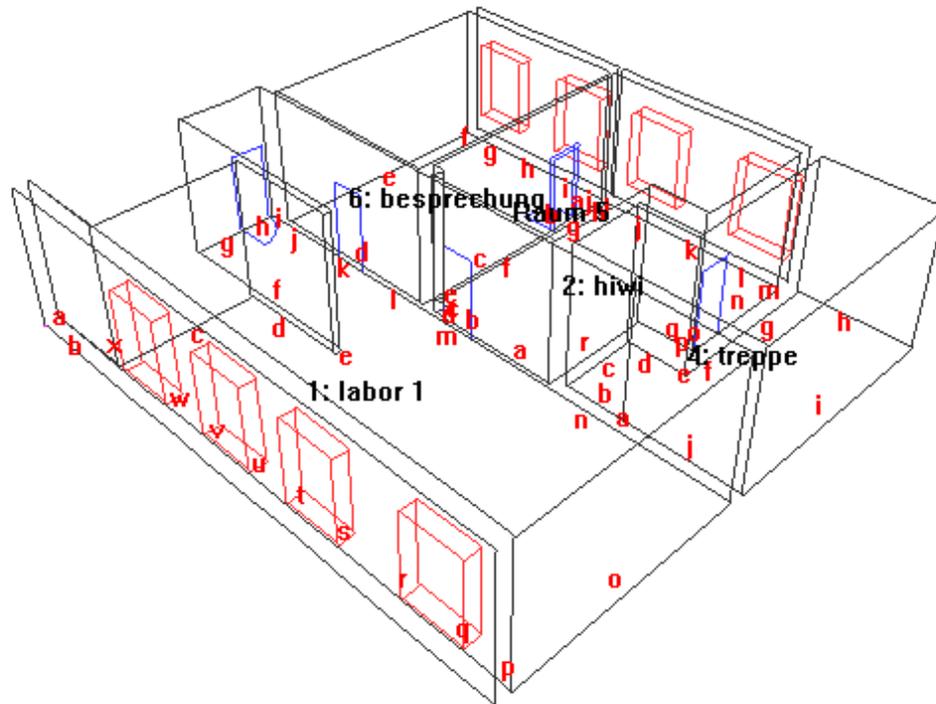
Die Einarbeitung in miniCASOB ist, wie es der Anbieter verspricht, sehr leicht und im Handbuch gut erklärt bzw. selbsterklärend. Das Programm ist von Praktikern für Praktiker gemacht. Das Zusammenspiel des Programmes mit dem Display, also der integrierten CAD-Oberfläche, erscheint etwas unabgestimmt.

Programmabstürze, oft schon Resultat einer falschen Eingabe, bleiben im allgemeinen ohne größere Folgen, da jede Dateneingabe automatisch sofort in die Datei geschrieben wird. Sollte ein Absturz die Datei beschädigt haben, so wird diese beim nächsten Start des Programmes automatisch repariert. Grundsätzlich ist miniCASOB ein brauchbares Utensil zur schnellen Erfassung von Gebäudedaten. Allerdings macht es den Eindruck, noch nicht ganz ausgereift zu sein. miniCASOB ist nicht als CAD Oberfläche aufzufassen, auf diesem Sektor bietet es kaum Möglichkeiten. Allerdings ist eine präzise Aufnahme eines evtl. auch schiefwinkligen Raumes innerhalb weniger Minuten möglich. Der Gebäudeteil in Bild 10 wurde mit miniCASOB im Laufe von 30 min. erstellt. Flächen (z.B. Fassadenflächen) können mit miniCASOB sehr schnell erfaßt werden. Allerdings sind Volumen erst durch eine Nachbearbeitung exportierter Daten zu erfassen.

Preislich liegt miniCASOB je nach Ausstattung zwischen 2 510 € und 3 270 € einschließlich Disto memo oder Disto pro.



**Bild 9:** Funktionsumfang eines hochwertigen Laser-Entfernungsmeßgerätes. Von oben nach unten und von links nach rechts: Höhe (Breite) aus drei Messungen; Detailmaß aus einer Fassade; Höhe (Breite) aus zwei Messungen (Pythagoras); Dauermessung Minimum; Dauermessung Maximum; Mittelwert aus acht Messungen; Dreiecksfläche aus Grundlinie und Höhe; Dreiecksfläche aus drei Seiten; Seitenwandfläche Pultdach; Eingeschlossener (stumpfer) Winkel aus drei Seiten; Kreisfläche aus Durchmesser; Winkel einer geneigten Decke und Länge einer Dachschräge (Disto Pro, Leica).



**Bild 10:** Beispiel für die Kombination eines Laser-Entfernungsmessgerätes mit einem speziellen Programm zur direkten Datenverarbeitung [22].



**Bild 11:** Zuweisung von Eigenschaften in miniCASOB [22].

### 3.1.5 Photogrammetrie

#### 3.1.5.1 Allgemeines

Photogrammetrie ist ein computerunterstütztes Verfahren, welches die Längenmessung von Fassaden auf der Basis von photographischen Aufnahmen ermöglicht. Mittels Software werden von einem bzw. mehreren Photos der Fassaden eines Gebäudes die Längen der Gebäudekanten und einzelner Fassadenbauteile (Fenster, Mauerwerk usw.) ermittelt. Hierzu ist es zunächst notwendig, die photographischen Aufnahmen anhand bekannter eingemessener Punkte zu entzerren. Die entzerrten, maßstabsgerechten Bilder werden anschließend üblicherweise in ein CAD-System eingelesen und können entsprechend weiterverarbeitet werden. Es gibt 2- und 3-dimensionale Systeme.

Um eine möglichst hohe Maßgenauigkeit des Bildes zu erhalten, ist es nötig, mehrere Punkte bzw. Strecken zu messen und entsprechend zu markieren. Es ist somit fraglich, ob sich der Aufwand der Photogrammetrie bei Einfamilienhäusern lohnt, wenn ohnehin zur Vorbereitung mehrere Punkte von Hand gemessen werden müssen. Bei Mehrfamilienhäusern oder grossen, komplexen Gebäuden kann sich dieses Verfahren jedoch möglicherweise auch im Rahmen der Vor-Ort-Beratung wirtschaftlich einsetzen lassen.

Allgemeine Systemvoraussetzungen für das Verfahren der Photogrammetrie sind

- Fotoapparat oder Digitalkamera
- Gut ausgestatteter Computer
- Photogrammetrie-Software
- Scanner zum Einlesen nicht digitaler Photos
- CAD-Programm zur weiteren Bearbeitung der Bilder

Es ist empfehlenswert, zusätzlich ein Laser-Entfernungsmeßgerät (siehe Abschnitt 3.1.4) einzusetzen, um zu den Bildern eines Objektes die notwendigen Grundmaße ermitteln bzw. charakteristische Punkte einmessen zu können.

Insgesamt ist (noch) zu dem Ergebnis zu kommen, daß sich die (2-D) Photogrammetrie in Zusammenhang mit der Vor-Ort-Beratung nur bedingt als Instrument zur Flächenermittlung eignet. Der hohe technische Aufwand sowie der Bearbeitungsaufwand steht oft nicht in Relation zum gelieferten Ergebnis [23]. Die 3-D Photogrammetrie kann als vielversprechend betrachtet werden, ist derzeit aber ebenfalls in der Anwendung noch zu aufwendig, um in der Vor-Ort-Energieberatung als Standardwerkzeug gelten zu können.

#### 3.1.5.2 Beispiel-Software EDDI (2D) [24]

Bei diesem Produkt sind laut Softwarehersteller nur vier Punkte (zwei Strecken) für die Entzerrung erforderlich. Die Erfahrung bei der Anwendung der Software zeigt, dass bei Bildern, die aus zwei Strecken entzerrt werden, zu hohe Massungenauigkeiten auftreten. Es ist ausserdem wichtig, dass das Objekt direkt von vorne, mittig fotografiert wird. Schräg aufgenommene Fassaden benötigen wesentlich mehr vor Ort gemessene Strecken, um optimal entzerrt zu werden.

Wenig Probleme bereitet die Entzerrung einer Aufnahme einer Giebelseite eines Gebäudes, welche keine Vorsprünge oder dgl. aufweist. Man kommt durch das Messen von zwei Strecken auf ein gutes Ergebnis in der entzerrten 2-D Darstellung. Bei einer Aufnahme, die Vorsprünge enthält, stösst das Programm an seine Grenzen. Um ein befriedigendes Ergebnis zu erhalten, wäre der Aufwand zum Einmessen der Punkte weitaus höher als die nötige Messung der Bauteile.

##### 3.1.5.2.1 Beispiel 1

Ein Mehrfamiliengebäude wurde giebelseitig aufgenommen. Zum Entzerren des Bildes sind zwei Strecken gemessen worden.

Die Entzerrung dieses (relativ einfachen) Gebäudes liefert ein gutes Ergebnis. Alle fehlenden Masse können aus dem massstäblichen Bild 12 rechts (Massstab 1:100), entnommen werden.



**Bild 12:** Photographie original (links) und entzerrt (rechts). Das Objekt ist ein Mehrfamiliengebäude mit sehr einfacher Fassade.

### 3.1.5.2.2 Beispiel 2

Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein Zweifamilienhaus mit aufgesetzten Dacherkern und einem Treppenhaus als Fassadenvorsprung. Das Gebäude wurde dachseitig aufgenommen.



**Bild 13:** Photographie original (links) und entzerrt (rechts). Das Objekt ist ein Zweifamilienhaus.

Trotz intensiver Bemühungen bei der Streckeneingabe liefert die Entzerrung des Gebäudes kein befriedigendes Ergebnis. Das Programm hat Schwierigkeiten bei der Erkennung des Fassadenvorsprungs, obwohl er als solcher eingegeben wurde. Weiterhin war es nicht möglich, das Dach als eine 2-dimensionale Darstellung zu entzerren.

### 3.1.5.3 Beispielsoftware PhotoModeler Pro (3D) [25]

#### 3.1.5.3.1 Allgemeines

Die Photogrammetrie-Software "PhotoModeler Pro (3D)" ist relativ kostengünstig und bietet ab der aktuellen Version 4.0 wichtige Funktionen, die es ermöglichen, mit wenigen Photos ein dreidimensionales Modell eines Gebäudes zu erstellen. Diese Funktionen sind insbesondere sog. "Constraints", die Angaben wie "diese Kanten sind parallel" und "diese Kanten sind orthogonal" (bzw. stehen in einem frei festlegbaren Winkel zueinander). Durch die Angabe der Koordinaten einzelner Punkte bezogen auf einem frei wählbaren Ursprung kann der Maßstab eines Modells festgelegt werden. Damit kann – theoretisch – aus zwei Aufnahmen eines (einfachen) Gebäudes ein vollständiges, maßstabsgerechtes dreidimensionales Modell erstellt werden. Die Software bietet Möglichkeiten, Flächen und Volumen zu berechnen.

#### 3.1.5.3.2 Kamera

Die Software kann Bilder u.a. im JPEG-Format sowie im TIFF-Format einlesen und ermöglicht es, praktisch alle gängigen Digitalkameras für die Bildaufnahme zu verwenden. Bei Kameras mit Zoom ist für Bilder, die gemeinsam verarbeitet werden sollen, eine feste Brennweite (eine einzige Zoom-Einstellung) zu wählen, da der PhotoModeler innerhalb eines Projektes allen Fotos nur eine Brennweite zuordnen kann.

Die verwendete Kamera muß dem Programm vor der Verwendung mit ihren technischen Daten "bekannt gemacht" und kann zusätzlich mit dem Programm kalibriert werden. Der Benutzer wird gut durch die Kamerainstallation geführt. Zu beachten ist hierbei, daß die Genauigkeit der Daten bzw. der Kalibration entscheidend zur Präzision des Modells beiträgt. Weiterhin ist zu beachten, daß eine hohe Auflösung der Kamera zu einer erhöhten Genauigkeit bei der Einmessung von Bildpunkten führt. D.h., es ist vorteilhaft, eine Digitalkamera mit hoher Pixelzahl einzusetzen.

#### 3.1.5.3.3 Markieren von Punkten

Sind die Objektphotos (in unserem Falle 2) eingelesen, kann mit der Markierung von Punkten begonnen werden (siehe Bild 14). Dabei ist bereits zu beachten, daß Linienzüge wohl durchdacht angesetzt werden müssen, um später Probleme bei der Berechnung des Modells zu vermeiden. Wichtig ist, daß möglichst viele Punkte auf beiden Bildern zu erkennen sind. Die Lage von Punkten, die nicht auf den Photos zu sehen sind, sollte dabei nicht geschätzt werden, da dies die Genauigkeit des Modellierungsergebnisses verringert. Es ist ungünstig, zu kleine Details zu markieren, da hierbei optische Täuschungen Probleme bereiten können (z.B. werden zwei Punkte als in einer Ebene liegend erachtet, sind real aber auf unterschiedlichen Ebenen). Auch hier hilft eine hohe Auflösung der verwendeten Digitalkamera, da auch bei starker Vergrößerung bei der Bearbeitung die Bildschärfe das genaue Erkennen von Details und damit das präzise Setzen von Punkten erleichtert.



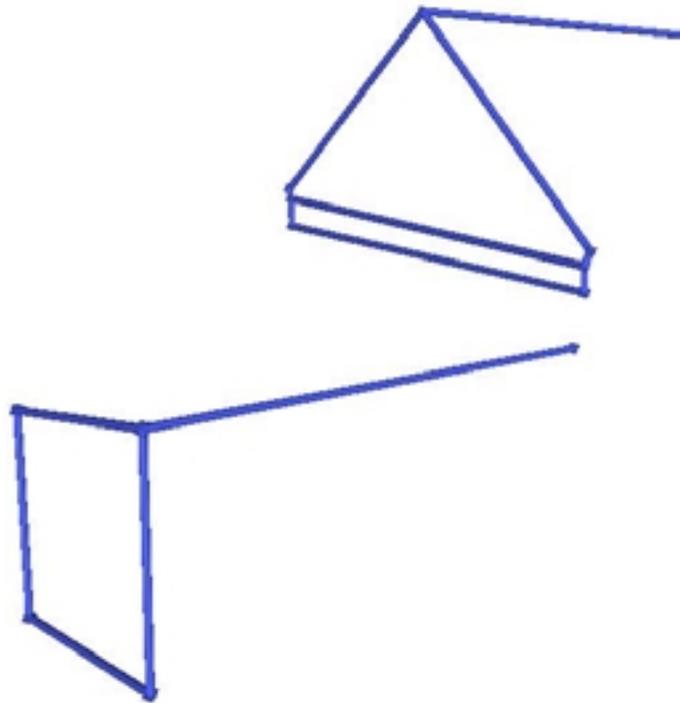
**Bild 14:** Die Photos zur Photogrammetrie mit "Photomodeler".

### 3.1.5.3.4 Referencing & Processing

Sind hinreichend viele Punkte markiert, werden die Punkte der beiden Bilder verglichen, d.h. gleiche Punkte werden dem Programm als solche definiert. PhotoModeler identifiziert dabei auch gleich ganze Linienzüge. Dieser Vorgang, das "referencing", ist nur durch das Löschen eines Punktes in einem Bild rückgängig zu machen.

Zur Generierung eines Modells erfolgt im Anschluß an die Referenzierung direkt das sogenannte "processing", das Berechnen und Entzerrern des Modells. Dabei können jedoch zunächst nur Punkte dargestellt werden, die auf beiden Photos zu sehen sind, und auch diese nur, wenn sie durch Linien verbunden ein System ergeben (siehe Bild 15).

Um mit nur zwei Photos ein besseres Modell zu erhalten, sind die "Constraints" nötig.



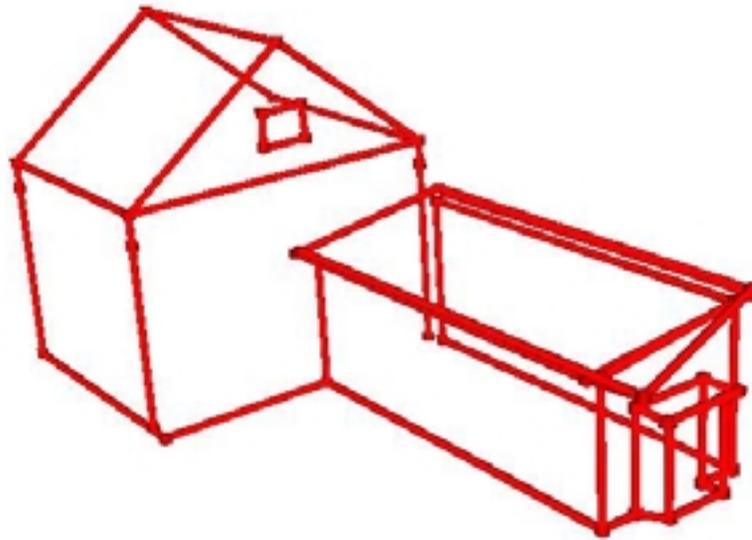
**Bild 15:** Mit 2 Fotos ohne Anwendung von Constraints darstellbares Modell.

### 3.1.5.3.5 Constraints

Mit Hilfe der Programm-Elemente "Constraints" können einzelnen Objekten (Punkten, Linien) verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden. PhotoModeler unterscheidet zwischen koordinatenabhängigen – d.h. absoluten – und geometrischen, also relativen, Constraints. Absolut heißt dabei, dem Objekt (einer Linie) wird z.B. die Lage auf einer Achse zugeordnet. Relativ bedeutet, das Objekt wird in seiner Lage zu einem anderen Objekt beschrieben (im Winkel zu ..., parallel zu ..., etc.). Hierbei ist zu beachten, dass man Objekte eindeutig definieren und dabei sich widersprechende Einschränkungen vermeiden muß (d.h. zum Beispiel, daß 2 Linien, die parallel sind nicht gleichzeitig im 90°-Winkel aufeinander stehen können). Da diese Definitionen sich auf den 3d-Raum beziehen, ist dieser Schritt deutlich schwieriger als das Beispiel zunächst vermuten läßt. Für die absoluten Constraints ist es nötig, ein Koordinaten-System zu definieren. Dies erfolgt mit 4 Kontrollpunkten.

Man muß bei den Constraints beachten, das u.U. ein erstelltes Constraint-System nicht mehr stabil ist, d.h. eine Berechnung das System verzerrt. Man sollte also möglichst sparsam mit den Constraints umgehen. Der Aufwand, ein System mit Constraints zu bearbeiten, kann schnell so groß werden, dass das direkte Messen am Objekt und die Berechnung von Hand oder die Eingabe in eine CAD-Software schneller sind.

In Bild 16 ist das auf der Basis von zwei Photos und Constraints berechnete Gebäudemodell dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass das Modell deutlich weitergehend ist, als das ohne Constraints mögliche (Bild 15).



**Bild 16:** Modell wie oben, nur mit Anwendung von Constraints nach 2. Berechnungsgang.

### 3.1.5.3.6 Messen

Nach dem erfolgreichen "processing" auf der Basis weniger vorgegebener Abmessungen sowie der notwendigen Constraints können die in einem Modell vorhandenen Strecken und Flächen vermessen werden. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, mit dem Programm Volumen zu bestimmen. Allerdings sind Volumen nur über der (x,y)-Ebene definiert. Diese Ebene ist also geschickt zu wählen, um nach der Modellierung auch tatsächlich alle benötigten Volumen ermitteln zu können. In Bild 17 ist ein Beispiel für die Ermittlung einer Fläche und dem zugehörigen Volumen dargestellt. Einfache Strecken und Flächen sind mit Fotomodeller gut zu messen und können auf einfache Weise auch addiert werden.

### 3.1.5.3.7 Fazit

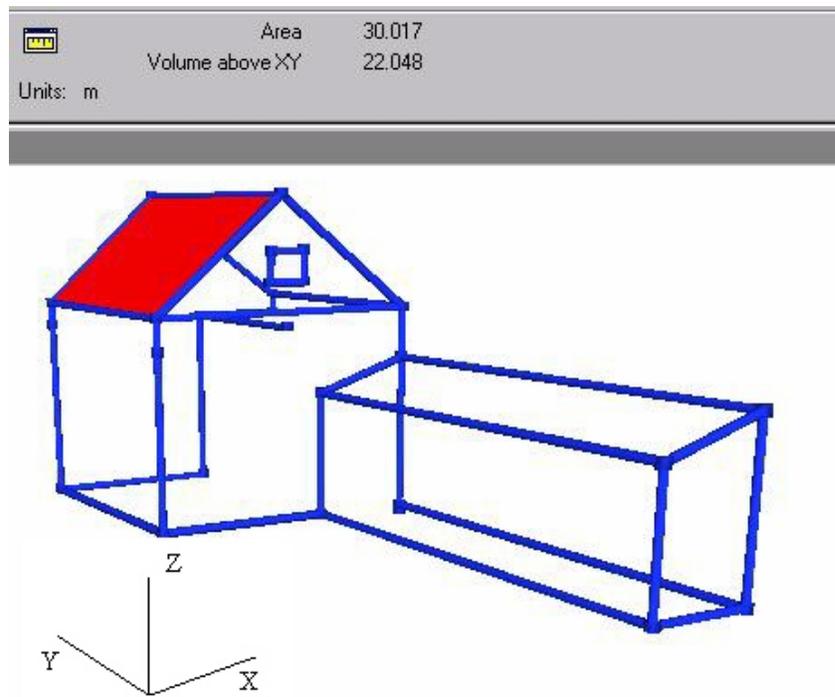
Unter der Voraussetzung, daß die Grundfunktionen des Programmes beherrscht werden und die verwendete Kamera dem Programm bereits bekannt ist, kann man auf der Basis von 3 Aufnahmen ohne Constraints ein "normales (Einfamilien-) Wohnhaus" in ca. 1/2 h bearbeiten und Flächen berechnen.

Werden (können) nur 2 Photos aufgenommen (werden) oder soll mit möglichst wenigen Photos gearbeitet werden, müssen Constraints angewendet werden. Eine Bearbeitung ist dann deutlich aufwendiger und benötigt auch bei guter Kenntnis des Programms für ein einfaches Gebäude ca. 1-1/2 bis 2 h.

Das Programm "PhotoModeler" bietet viele interessante und nützliche Funktionen. Bei der Anwendung ist jedoch festzustellen, daß die Umsetzung noch nicht ausgereift ist. Das Programm läuft manchmal ziemlich instabil und stürzt ohne Fehlermeldung ab.

Nicht beendete Berechnungen im Rahmen des processing scheinen sich auf die in der Projektdatei gespeicherten Daten auszuwirken, d.h. die Grunddaten sind nach einem processing verändert. Z.B. führt mehrfaches, hintereinander ausgeführtes processing u.U. zu einer immer größeren Verzerrung des errechneten Modells. Werden Eingaben – beispielsweise Constraints – wieder rückgängig gemacht, bedeutet dies leider nicht immer, dass das zuvor erfolgreich berechnete Modell wieder hergestellt werden kann.

Insgesamt erscheint die Photogrammetrie mit einem derartigen Programm derzeit für die Vor-Ort-Energieberatung als noch nicht hinreichend ausgereift. Grundsätzlich ist das Verfahren jedoch gerade bei



**Bild 17:** Berechnungsergebnisse, die rote (bzw. graue) Fläche ist vermessen.

größeren Objekten mit beispielsweise sehr unterschiedlich großen Fenstern eine interessante Möglichkeit, eine Fassade geometrisch zu vermessen.

### 3.1.6 Theodolit

Der Theodolit ist ein optisches Vermessungsgerät zur Bestimmung von Winkeln (horizontal und vertikal). Im allgemeinen enthalten moderne Theodoliten einen integrierten Tachymeter zur präzisen Entfernungsbestimmung. Bei Theodoliten ist zwischen einfachen Bautheodoliten (Preislage ab ca. 660 €) und koaxial messenden Totalstationen (Kombination aus Theodolit und Distanzmesstation) zu unterscheiden (Preis z.B. Leica ca. 8 490 €).

Die in einigen Theodoliten enthaltenen Distanzmeßstationen benötigen einen Reflektor, daher muß der Meßpunkt zugänglich sein. Der Theodolit verlangt ein präzises Vorgehen, da man die Messung polar am Horizontalkreis ( $360^\circ$  oder  $400^{gon}$ ) durchführt, und danach die gesuchten Punkte einschneidet. Die genaue Dokumentation der Meßpunkte ist auch bei einem Theodoliten unumgänglich.

Zur Vermessung von möblierten Räumen scheint der Theodolit in Verbindung mit einer Entfernungsmessung eine geeignete Lösung zu sein, da viele Wandabschnitte nicht ohne Mehraufwand direkt meßbar sind. Der Preis eines Theodoliten macht dieses Verfahren im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung jedoch unwirtschaftlich.

Ein von den Funktionen in diesem Zusammenhang interessantes Produkt CASOB(r)™ der Firma aadiplan int'l [22] liegt preislich inkl. Meß- und CAD-Software sowie der benötigten meßtechnischen Hardware zwischen 10 230 € und 20 450 €.

### 3.1.7 Akustische Mikroskopie

Durch die Einkopplung hochfrequenter Ultraschall- oder Mikrowellen in einen Probekörper und die Messung der Reflexions- und Rückstreusignale werden tiefenaufgelöste Schnittbilder erzeugt. Die zur Anwendung kommenden Frequenzen liegen zwischen 20 MHz und 2 GHz für Ultraschall- und zwischen 1 und 90 GHz für Mikrowellen.

Die Eindringtiefe von Mikrowellen in Materialien ist abhängig von der Wellenlänge, der Intensität der Strahlung und der Streuung im Material. Je größer die Frequenz, desto besser wird zwar die Auflösung, jedoch desto geringer die Eindringtiefe. Typische Frequenzen liegen im Bereich 6 GHz.

Denkbare Anwendungen derartiger Meßverfahren sind z.B. die Bestimmung der Dicke eines WDV-Systems, die Ermittlung des Schalenabstands bei zweischaligem Mauerwerk und andere.

## 3.2 Wärmetechnische Kenndaten

### 3.2.1 Allgemeines

Die Bestimmung des U-Wertes einer vorhandenen Konstruktion erfordert die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien. Es ist daher notwendig, für Bauteile nicht nur die Schichtdicken sondern auch die verwendeten Materialien zu ermitteln. Aufschluss können hierbei Baubeschreibungen, Materialreste, sowie freiliegende Wandbereiche und Putz-Fehlstellen geben. Es lassen sich Kernbohrungen des zu prüfenden Bauteils anfertigen. Ausserdem ist es möglich, über Labor- und Handmessgeräte wärmetechnische Kenndaten zu ermitteln.

Auf den folgenden Seiten wird gezeigt, welche grundsätzlichen Möglichkeiten sich dem Vor-Ort-Berater zur Ermittlung wärmetechnischer Gebäudekenndaten bieten.

### 3.2.2 Materialdaten in der Literatur

Sind Baubeschreibungen (z.B. Ausführungszeichnungen von Grundriss, Schnitt, Ansicht) vorhanden, lassen sich daraus Schichtdicke und verwendete Materialien leicht entnehmen. Sind keine Unterlagen über die Bauteilaufbauten verfügbar, muss vor Ort eine Analyse vorgenommen werden. Wünschenswert ist die einfache Bestimmung des U-Wertes bei der Vor-Ort-Beratung, ohne den Einsatz aufwendiger – und teilweise wenig genauer – technischer Untersuchungsmethoden (z.B. Kernbohrung, Temperaturfühler-Messgerät, Infrarot-Temperaturmessgerät).

In DIN 4108 Teil 4 sind wärmetechnische Kenndaten einzelner Materialien tabelliert. Die Kenndaten neuer Materialien werden regelmäßig im Bundesanzeiger veröffentlicht. Kenndaten alter Materialien können aus verschiedenen Literaturstellen gewonnen werden.

Eine Vielzahl von Konstruktionen und verwendeten Materialien aus den Jahren 1860 bis 1960 sind in [26] und [27] dargestellt. Beispielsweise geben Tafel 9 und Tafel 10 in [26] Mindestwanddicken für unterschiedliche Gebäudetypen (belastete Außenwände von Gebäuden mit mehr als drei Etagen bzw. belastete Außenwände im Kleinhausbau), Obrigkeitsbereiche (z.B. Bayern, Preußen, Ruhr, Sachsen) und Baujahre an. Weitere Zusammenstellungen verschiedener Konstruktionen älterer Bauart sind z.B. in [28, 29] zu finden. Leider fehlen in diesen Veröffentlichungen zu den detailliert beschriebenen Aufbauten ergänzende Angaben dazu, in welchen Baujahren die gegebenen Grundkonstruktionen üblich waren. Die genannten Hilfen sollten aber lediglich als Anhaltspunkte betrachtet und durch eine Begutachtung vor Ort bestätigt werden.

Es scheint in diesem Zusammenhang unmöglich, eine systematische – und dabei noch übersichtliche – Darstellung der im letzten Jahrhundert verwendeten Konstruktionen bereitzustellen. Dazu findet sich in [26] beispielhaft folgendes: *„Die Deutsche Bauakademie schätzte 1954 ein, dass bis zu diesem Zeitpunkt etwa 2000 verschiedene Deckensysteme entwickelt und eingebaut worden waren.“* Gründe für diese Vielfalt sind in der fortschreitenden technischen Entwicklung von Konstruktionen und Materialien, regionale oder allgemeine (Nicht-) Verfügbarkeit bestimmter Baustoffe (z.B. nach dem 2. Weltkrieg) und örtlich unterschiedliche Bauordnungen bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts hinein (z.B. Berliner Bauordnung) begründet. Zudem führte die bereits erwähnte Knappheit bestimmter Rohstoffe (z.B. Holz, Stahl, Zement) zu einer nur schwer zu überblickenden Vielfalt an Sonderbauweisen und Mischformen.

Es muss also jedes Gebäude bzw. Bauteil gesondert vor Ort auf die dort verwendeten Materialien hin untersucht werden. Hierzu bietet es sich z.B. an, an leicht zugänglichen Stellen (an einer unverputzten Kellerwand, durch Entfernen von Bodendielen) Baustoffe und Konstruktionen zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse für das übrige Gebäude zu ziehen.

Die aufmerksame Bestimmung der Baustoffe und örtlicher Besonderheiten ist Grundlage der wärmetechnischen Beurteilung der vorhandenen Konstruktion. Zahlreiche der früher verwendeten Baustoffe haben aufgrund ihrer Eigenschaften an Bedeutung verloren oder sind ganz vom Markt verdrängt worden. Sie sind daher nicht oder nur noch implizit im Teil 4 der DIN 4108 enthalten, so dass sich die Ermittlung der Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit u.U. schwierig gestaltet.

In Tabelle 9 sind Werte der Wärmeleitfähigkeit aus einer älteren Ausgabe der DIN 4108 [30] und ergänzender Literatur zusammengetragen. Tabelle 10 gibt einen Überblick über Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von Türen und Fenstern. Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen, die noch in der aktuellen DIN 4108 (Teil 4) enthalten sind, sind in Tabelle 9 nicht aufgeführt. Wegen der möglichen Streuung der Bauteilabmessungen (z.B. Schichtdicken, Abstände) und Unkenntnis über den Feuchtegehalt der Baustoffe sind die anhand der angegebenen Wärmeleitfähigkeiten errechneten U-Werte für ein älteres Bauteil in jedem Falle als Näherungsgröße zu betrachten. Bezüglich der Rohdichte ist es ratsam, im Zweifel auf der "sicheren Seite" zu rechnen, also eher die zu einer größeren Rohdichte gehörende Wärmeleitfähigkeit zur Berechnung des U-Wertes zu verwenden. Damit ist sichergestellt, dass der bei einer Sanierung angestrebte U-Wert nicht überschritten wird. An dieser Stelle ist noch einmal deutlich darauf hinzuweisen, daß bei Bauteilen, die in nennenswertem Umfang gedämmt werden sollen, die genaue Bestimmung der Ausgangssituation von untergeordneter Bedeutung ist (siehe auch Abschnitt 2.4.2.6 bzw. Bild 8 auf Seite 21).

In älterer Literatur ist der Begriff der Wärmeleitzahl für die heute übliche Bezeichnung Wärmeleitfähigkeit gebräuchlich. Außerdem ist auf die Angabe der Einheit zu achten.

Es gilt:  $1 \text{ kcal/h} = 1,163 \text{ W}$

Bei Steinen ist die Steinrohichte – also unter Berücksichtigung der Hohlkammern – angegeben. Wird die Rohdichte anhand von Materialresten ermittelt, entspricht diese der Material(Scherben)-Rohdichte und liegt entsprechend höher.

In [31] ist der Wert der Wärmeleitzahl, den Bauverhältnissen nach, gesondert angegeben. Je nach Feuchtegehalt wird dabei in sehr günstige, in mittlere und in ungünstige Bauverhältnisse unterteilt. In Tabelle 9 sind, soweit in [31] angegeben, die Werte für mittlere Verhältnisse übernommen. Die Streuung der angegebenen Wärmeleitfähigkeit liegt nach oben (ungünstige Bauverhältnisse) und unten (günstige Bauverhältnisse) bei bis zu 25 %.

Tabelle 9: Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte früher gebräuchlicher Baustoffe. Werte aus [30] (Quelle A) und [31] (Quelle B).

Quelle	Stoff	(Stein-)Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
<b>Steine</b>			
B	Bimssteine, Kesselschlackensteine 25 12 9,5 cm <sup>3</sup>	600	0,31
		800	0,41
		1000	0,49
		1200	0,57
		1400	0,66
B	Hochofenschlackensteine, Hüttenbimssteine 25 12 9,5 cm <sup>3</sup>	800	0,38
		1000	0,44
		1200	0,50
		1400	0,57
B	Gas- und Schaumbetonsteine mit amorphem Sand 33 25 20cm <sup>3</sup>	600	0,37
		800	0,47
		1000	0,57
		1200	0,70
		1400	0,83
B	Gas- und Schaumbetonsteine mit Quarzsand 33 25 20cm <sup>3</sup>	1000	0,73
		1200	0,92
		1400	1,11
B	Gas- und Schaumbetonsteine mit Flugasche 33 25 20cm <sup>3</sup>	600	0,31
		800	0,38
		1000	0,49
		1200	0,59
		1400	0,70
B	Gas- und Schaumbetonsteine mit Hochofenschlacke 33 25 20cm <sup>3</sup>	600	0,26
		800	0,33
		1000	0,38
		1200	0,44
		1400	0,54
B	Hohlsteine (aus Ziegel, porösem Ziegel, Beton, usw.) <sup>1</sup>	800	0,42
		1000	0,50
		1200	0,58
		1400	0,70
A	Steinkohlenschlacke		0,19
A	Hochofenschaumschlacke		0,14
A	Ziegelsplitt		0,41
A	Leichtbeton-Vollsteine	800	0,41
		1000	0,47
		1200	0,52
		1400	0,64
		1600	0,79
B	Leichtkalksandstein	600	0,19
		800	0,24
		1000	0,31
		1200	0,37
		1400	0,47
A	Leichtbeton-Hohlblocksteine Zweikammerstein	1000	0,44

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung Tabelle 9			
Quelle	Stoff	(Stein-)Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
		1200	0,49
		1400	0,56
	Dreikammerstein	1400	0,49
		1600	0,56
A	Gas-, Schaumbeton- und Leichtkalkbeton- steine dampfgehärtet	600	0,35
		800	0,41
		1000	0,47
	luftgehärtet	800	0,44
		1000	0,56
		1200	0,70
B	Gebrannter Kieselgurstein, z.B. Mikroporit	220	0,11
	Thermalit	450	0,15
	Libagit	570	0,19
A	Steine aus Holzbeton	800	0,44
		1000	0,56
<b>Beton, Mörtel</b>			
A	Ziegelsplittbeton mit geschlossenem Gefüge	1600	0,76
		1800	0,93
B	Kiesbeton	1800	0,95
		2000	1,22
		2200	1,50
		2400	2,21
B	Holzmullmörtel	500	0,11
A	Ziegelsplittbeton für Stahlbeton	2000	1,05
B	Bims-, Kesselschlackenbeton	600	0,19
		800	0,27
		1000	0,35
		1200	0,47
		1400	0,57
B	Hochofenschlacken-, Hüttenbimsbeton	800	0,24
		1000	0,31
		1200	0,37
		1400	0,47
B	Gas- und Schaumbeton mit amorphem Sand <sup>2</sup>	600	0,29
		800	0,40
		1000	0,51
		1200	0,66
		1400	0,81
B	Gas- und Schaumbeton mit Quarzsand	600	0,35
		800	0,51
		1000	0,71
		1200	0,93
		1400	1,15
B	Gas- und Schaumbeton mit Flugasche	600	0,23
		800	0,31
		1000	0,42
Fortsetzung nächste Seite			

Fortsetzung Tabelle 9			
Quelle	Stoff	(Stein-)Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
		1200	0,54
		1400	0,66
B	Gas- und Schaumbeton mit Hochofenschlacke	600	0,19
		800	0,24
		1000	0,31
		1200	0,37
		1400	0,47
B	Klinker-(Blähton-) beton <sup>3</sup>	1000	0,34
		1200	0,42
		1400	0,54
		1600	0,66
		1800	0,83
B	Ziegelbruch(isolier-)beton (rein), gegossen	1000	0,26
		1100	0,28
		1200	0,30
		1300	0,33
		1400	0,35
B	Ziegelbruchbeton (rein), gestampft oder gerüttelt <sup>4</sup>	1000	0,35
		1200	0,45
		1400	0,61
		1600	0,92
A	Ziegelsplittbeton und Steinkohlenschlackenbeton, haufwerksporig	1200	0,47
		1400	0,58
		1600	0,76
A	Dampfgehärteter Gas- und Schaumbeton, Leichtkalkbeton	600	0,23
		800	0,29
		1000	0,35
A	Holzbeton	800	0,41
		1000	0,52
B	Isoliermörtel (z.B. Lavapor)	630	0,16
B	Schlackengips (Hartgips) <sup>5</sup>	1300 <sup>6</sup>	0,80
		1400 <sup>7</sup>	0,84
		1500 <sup>8</sup>	0,91
		1600	0,98
		1700 <sup>9</sup>	1,04
<b>Bauplatten</b>			
A	Asbestzementplatten	1800	0,35
B		1900	0,44
B	Porengipsplatten (z.B. Porolyt)	470	0,22
B	Gipsschlackenleichtplatten	900	0,44
B	Holzfaserplatten (z.B. Insulite, Hermaltext, Isotex)	200	0,047
		300	0,050
		400	0,054
		500	0,062
		600	0,074
B	Kieselgur-Kalk-Sägespäne (z.B. KB)	600	0,24
B	Zement-Sägespäne (Zementholz, Steinholz, z.B. Xylolith)	700	0,27
		800	0,31
Fortsetzung nächste Seite			

Fortsetzung Tabelle 9			
Quelle	Stoff	(Stein-)Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
		900	0,35
B	Kork mit Gips (z.B. Kofag)	550	0,13
B	Reinkork und imprägnierter Kork	100 200 300	0,040 0,050 0,059
B	Holzschliffplatten (z.B. Diazell)	150	0,051
B	Michelplatten	225	0,065
B	Schilfplatten (z.B. Neusiedler)	300	0,094
B	Wellpappeplatten pechimpr. (z.B. Mödlit)	176	0,063
A	Torfplatten	200	0,047
A	Platten aus Wellpappe, bitumengetränkt	55	0,047
B	Zellenbetonleichtplatten (z.B. Thermazell)	350	0,15
Hohlraumverfüllstoffe			
B	Kesselschlacke	750	0,33
B	Hochofenschlackschlacke (Kunstabims, z.B. Thermosit) 2-5mm	300	0,16
	30mm	360	0,21
		360	0,28
B	Bimskies	600	0,35
B	Synthoporit (0-30mm)	700	0,33
B	Kieselgur	200 400 600	0,11 0,15 0,21
B	Schlacken-, Stein- und Glaswolle <sup>10,11</sup>	100 200 300 400	0,059 0,052 0,058 0,070
B	Kunstharzschaumstoff (Iporka) <sup>10</sup>	15	0,044
B	Sägemehl <sup>10</sup>	200	0,116
	Hobelspäne <sup>10</sup>	120	0,093
	Holzmull <sup>10</sup>	130	0,092
B	Strohfasern <sup>10</sup>	140	0,070
B	Korkschröt	35-55	0,038
	Torfmulle <sup>10</sup>	150-200	0,116
Wärmedämmstoffe			
A	Steinige Fasern (Stein-, Glas-, und Schlackenwolle) lose oder in Matten unter schwimmenden Estrich, verdichtet <sup>12</sup>		0,041 0,087
A	Bau- Schlackenwolle, lose		0,070
A	Pflanzliche Fasern (Seegras, Kokosfasern) lose oder in Matten unter schwimmenden Estrich, verdichtet <sup>12</sup>		0,041 0,087
A	Korkparkett	450	0,064
A	Kunstharzschaum in Platten und Flocken		0,041
Sonstige			
A	Steinholzunterböden und Unterschicht von 2-lagigen Böden		0,47
A	Industrieböden und Gehschicht		0,70
Fortsetzung nächste Seite			

Fortsetzung Tabelle 9			
Quelle	Stoff	(Stein-)Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
A	Bronze, Rotguss		70

<sup>1</sup> Die Durchschnittswerte gelten für ein Raumgewicht einschliesslich der Hohlräume und geben nur ungefähre Anhaltspunkte, da der Wärmeschutz stark von der Hohlraumanordnung abhängig ist. Raumgewicht einschliesslich der Hohlräume.

<sup>2</sup> In diese Gruppe passen sehr gut Messungen über den Wärmeschutz von Porenbeton sowie an Iporitbeton.

<sup>3</sup> Blähton-Beton hat als Zuschlagstoff gebrannten Ton, bei dem die äussere gesinterte Haut den aufgeblähten Tonkern umgibt. Siehe dazu [32].

<sup>4</sup> Für Ziegelbruch, der nicht aus reinen Ziegeln, sondern z.B. aus zerstörten Häusern durch Aufbereitung des Bauschuttes gewonnen ist, ergeben sich auch höhere Wärmeleitzahlen. Die Erhöhung ist abhängig vom Mengenanteil des mitverarbeiteten Mörtels usw.

<sup>5</sup> Aus Hartgips. Der verwendete Schlackensand war ziemlich feinkörnig, so dass der Gipsstein dazwischen zusammenhängende Wärmebrücken (ohne zu grossen Umweg um die Körner) von einer zur anderen Wandseite bildete.

<sup>6</sup> Mischungsverhältnis (Gewichtsteile): Gips 30% : Schlacke 70%.

<sup>7</sup> Mischungsverhältnis (Gewichtsteile): Gips 50% : Schlacke 50%.

<sup>8</sup> Mischungsverhältnis (Gewichtsteile): Gips 70% : Schlacke 30%.

<sup>9</sup> Mischungsverhältnis (Gewichtsteile): Gips 100% : Schlacke 0%.

<sup>10</sup> Angabe für sehr günstige Bauverhältnisse nach (B).

<sup>11</sup> Angegebene Werte gelten vorzugsweise für Glaswolle mit Faserlagerung normal zum Wärmestrom. Schlacken- und Steinwollen mit regelloser Faserlagerung haben durchschnittlich um etwa 25% höhere Wärmeleitzahlen.

<sup>12</sup> Für die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes ist die ursprüngliche Dicke einzusetzen (Anlieferungszustand).

**Tabelle 10:** Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) früher gebräuchlicher Türen und Fenster. Werte aus [30] (Quelle A) und [31] (Quelle B).

Quelle	Bauteil	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Aussentüren</b>		
B	Aussentüre, Eisen	7,6
B	Aussentüre, Holz	4,1
B	Einfache Balkontüre, Holz mit Glasfüllung	5,8
B	Doppelte Balkontüre, Holz mit Glasfüllung	2,9
B	Innentüre	2,9
<b>Aussenfenster</b>		
B	Einfachfenster, Eisen und Stahl	7,6
B	Einfachfenster, Holz	7,0
B	Doppelverglasung, Eisen und Stahl	4,4
B	Doppelverglasung, Holz	3,5
B	Doppelfenster, Eisen und Stahl	3,8
B	Doppelfenster, Holz	3,3
B	Schaufenster, Hallenwände	7,6
<b>Innenfenster</b>		
B	Einfachfenster	3,5

### 3.2.3 Materialreste

Durch ein Gespräch mit dem Hausbesitzer lassen sich unter Umständen Hinweise auf verbaute Materialien finden. Manchmal sind noch Restmaterialien (Ziegelsteine, Dämmstoffe) aus der Bauphase vorhanden.

Aus der Kenntnis des Materials lässt sich in vielen Fällen die Wärmeleitfähigkeit mit hinreichender Genauigkeit abschätzen. Um die für das Material zu verwendende Wärmeleitfähigkeit in Tabellen zu finden, ist es meist nötig, die Rohdichte zu kennen.

Die Bestimmung der Rohdichte kann mit hinreichender Genauigkeit durch einfaches Wägen sowie einer Volumenbestimmung durch "Verdrängungsmessung" erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Bestimmung der Rohdichte von Mauersteinen mit Hohlkammern mit dem Volumen der Hohlkammern erfolgt. Für feste Materialien eignet sich hierfür das Einschweißen der Materialprobe mit Hilfe eines haushaltsüblichen "Gefrierbeutel-Vakuumgerätes". Anschließend kann durch die Bestimmung des Verdrängungsvolumens die Rohdichte ermittelt werden. Bei Probenbruchstücken muß der Hohlkammeranteil entsprechend geschätzt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

### 3.2.4 Baubeschreibung

In der Baubeschreibung sind in der Regel Materialien angegeben, aus denen das Gebäude gefertigt wurde. Aus Tabellen (vgl. 3.2.2) lässt sich anhand der Materialangaben die Wärmeleitfähigkeit bestimmen. Dies ist der denkbar günstigste Fall.

Häufig existiert die Baubeschreibung jedoch nicht mehr oder die tatsächlich verwendeten Materialien stimmen nicht mit den angegebenen überein. Es können am Gebäude bereits nicht dokumentierte Sanierungs- und Umbaumaßnahmen durchgeführt worden sein. In solchen Fällen müssen andere Verfahren zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Bauteile angewendet werden.

### 3.2.5 Kernbohrung

Kernbohrungen dienen der Entnahme von Material. Mit der Materialprobe kann das Material bzw. der Zustand des Materials im Labor analysiert werden (siehe 3.2.3). Eine Kernbohrung ist eine zerstörende Methode. Ein bleibender optischer Makel im Aussen- und Innenbereich ist unvermeidlich.

Die Kernbohrung zur Bestimmung von Materialeigenschaften ist für die einfache Vor-Ort-Beratung ungeeignet.

### 3.2.6 Temperaturfühler-Messgerät

Mit diesen Meßgeräten wird die Oberflächentemperatur durch den Kontakt zwischen dem Messfühler und der zu untersuchenden festen Oberfläche ermittelt.

Aus den Meßergebnissen Raumluft-, Aussenluft- und Wandtemperatur auf der Innenseite eines Bauteils kann der U-Wert für stationäre Bedingungen errechnet werden. In Abschnitt 2.4.2.1 wird detailliert auf Einschränkungen dieses Meßprinzips eingegangen.

Grundsätzlich gilt, daß die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen mindestens 10 K betragen sollte. Je größer der Unterschied zwischen der äußeren- und der inneren Lufttemperatur ist, desto genauer wird – vorbehaltlich eines annähernd linearen (stationären) Temperaturprofils in dem Bauteilquerschnitt – das Messergebnis ausfallen. Als ideal kann ein kalter Wintermorgen nach einer trüben Nacht ohne nennenswerten Strahlungsaustausch, ohne Sonneneinfluss und mit wenig Wind (nicht mehr als 1-2 m/s) erachtet werden.

### 3.2.7 Infrarot-Temperaturmessgerät

Mit Infrarot-Temperaturmeßgeräten wird die von festen Körpern ausgehende Strahlungsenergie im infraroten Bereich (Wärmestrahlung) gemessen. Die Oberfläche des zu vermessenden Körpers darf keine Infrarotstrahlung reflektieren, die von anderen Körpern ausgesandt wird. Eine Messung an metallischen Oberflächen ist daher im allgemeinen nicht möglich. Sollen metallische Oberflächen gemessen

werden, können diese mit einem schwarzen Papierstreifen beklebt werden. Mittels dieses "Tricks" ist es beispielsweise möglich, metallische Fensterrahmen oder Fassaden zu vermessen.

Je höher die Masse und damit die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils ist, desto länger ist die Einstellzeit für das thermische Gleichgewicht. Für massearme Bauteile (z. B. Fenster) genügen einige Minuten, während sich in dicken Aussenwänden der Gleichgewichtszustand erst nach mehreren Stunden einstellt. Für die Messung besonders geeignet sind kalte, trübe Tage oder die Stunden vor Sonnenaufgang. Weiterhin ist darauf zu achten, dass sich innerhalb des Bauteils keine Wärmequellen oder -senken wie Heizungs- oder Kaltwasserrohre befinden. Sie würden das Messergebnis sehr stark verfälschen. Auf keinen Fall darf in der Nähe von Heizlüftern oder Heizkörpern gemessen werden, da die von ihnen verursachte Strömung warmer Luft und die daraus resultierende Änderung der Oberflächentemperatur im überströmten Bereich die Messung ebenfalls stark verfälschen würde (siehe auch Abschnitt 2.4.2.1).

In Tabelle 11 ist ein Überblick über einige erhältliche Geräte gegeben. Bei der Zusammenstellung der Übersicht wurden nur einfache Geräte bis max. ca. 770 € berücksichtigt. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich der Hersteller bzw. Vertreiber entsprechender Geräte.

Angaben in Tabelle 11 zur Meßgenauigkeit sind den jeweiligen Hersteller- bzw. Vertreiberunterlagen entnommen. Die Angaben beziehen sich i.d.R. auf Messungen an Oberflächen mit einem Emissionsgrad  $\epsilon$  von ungefähr eins.

### 3.2.8 Wärmestrommeßgeräte

Wärmestrommeßgeräte können gemäß DIN EN 12494 [18] zur in situ Bestimmung des U-Wertes eingesetzt werden. Das hierin beschriebene Verfahren führt zu Meßergebnissen mit einer Gesamtunsicherheit im Bereich von 5 bis 10 %. Der meßtechnische Aufwand sowie die notwendige Dauer der Messung von mindestens 48 h führt jedoch dazu, daß die Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstandes nach DIN EN 12494 im Rahmen der Vor-Ort-Beratung kaum wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

Ein Wärmeleitfähigkeitsmeßgerät mit zwei Meßbereichen, einmal von 0,015 bis 0,055 W/(m K) sowie von 0,035 bis 0,25 W/(m K) bietet für alle in diesen Bereich fallenden Bauteile eine einfache Möglichkeit, die gesuchten Daten zu ermitteln. Das Meßprinzip beruht auf dem Patent DD 149962 [33]. Es muß bei diesem Gerät jedoch ein kleines Loch in das zu untersuchende Bauteil gebohrt werden. Das Meßgerät ist mit ca. 1 280 € zu veranschlagen.

Die in der Anwendung einfachste Methode, den Wärmestrom an der Oberfläche zu bestimmen, ist mit einem entsprechenden Infrarot-Handmeßgerät. In dem in Abschnitt 3.2.7 betrachteten Preissegment bis ca. 720 € (siehe Tabelle 11) ist jedoch nur ein Gerät mit dieser Funktion ausgestattet. Ab ca. 870 € gibt es ein etwas breiteres Angebot, welches aber hier nicht weiter betrachtet wird.

### 3.2.9 Thermographie

Im Bauwesen sind für thermographische Untersuchungen folgende allgemeine Punkte zu beachten:

- Hinterlüftete Außenwände können von außen nicht thermographiert werden. Die Oberflächentemperatur ist in Folge der Hinterströmung "homogenisiert", d.h. es können keine hinter der Lüftungsebene vorhandenen konstruktiven Temperaturunterschiede ermittelt werden.
- Sollen Oberflächentemperaturen von Metallen und anderen Baustoffen verglichen werden, müssen die verschiedenen Emissionskoeffizienten beachtet werden.
- Werden Oberflächen mit niedrigen Emissionskoeffizienten aufgenommen, muß möglichen Reflexionen besondere Aufmerksamkeit gegeben werden.
- Die Interpretation von Thermogrammen setzt die detaillierte Kenntnis der Randbedingungen der Aufnahmen voraus.

Für Anwendungen im Bauwesen (relevante Temperaturen  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ ) sind Kameras, die im sogenannten langwelligen atmosphärischen Fenster (8-14  $\mu\text{m}$ ) empfindlichen sind, am besten geeignet. Grund dafür ist einerseits, daß das Maximum der emittierten Wärmestrahlung im Fall der relevanten Temperaturen diesem Bereich entspricht. Andererseits ist die Transmission der Atmosphäre im langwelligen atmosphärischen Fenster wesentlich höher als im kurzwelligen (3 - 5  $\mu\text{m}$ ). Der langwellige Bereich ist somit für Messungen im Freien und über große Entfernungen geeignet.

**Tabelle 11:** Marktübersicht Infrarot-Temperaturmeßgeräte.

Hersteller Modell	Ahlborn			Impac	Lin. Laborat. TherMonitor	Minolta / Land MINI LASER	OMEGA		Raytek Raynger MX2	Wessels TempTestr
	AMIR 7811-16	AMIR 7811-40	AMIR 7814-10				OS643E-L	OS520L		
Meßbereich °C	-32 bis 540	-32 bis 540	-32 bis 900	-32 bis 500	0 bis 260	-30 bis 400	-20 bis 400	-18 bis 540	-30 bis 900	-18 bis 260
Spektr. Empf. µm	7-18	7-18	8-14	8-14	k.A.	8-14	k.A.	8-14	8-14	7-18
Emissionsgrad	0,95	einstellbar	einstellbar	einstellbar	k.A.	einstellbar	einstellbar	einstellbar	einstellbar	0,95
Genauigkeit <sup>1)</sup>	±2%	±2%	±1%, 1 K	±2%, 2 K	±1% + 1 Digit	±2 K ± 1 Digit	±3%, 3 K	±1%, 1,6 K	±1%, 1 K	±2%, 3 K
Temp.-drift <sup>2)</sup>	k.A.	k.A.	0,03%/K	0,03%/K	k.A.	0,2 K / K	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Meßfeldgröße <sup>3)</sup>	125/725	33/170	18/135	100/580	330/1670	30/230	k.A.	103/500	18/135	167/833
Funktionen:										
Min./Max.	nur Max.	ja	ja	ja	-	-	-	ja	ja	-
Mittelwert	-	ja	-	ja	-	-	-	ja	-	-
Wärmestrom	-	-	-	-	ja	-	-	-	-	-
Spannungsvers.	6 LR 61 (9V)	9 V	2 x AA	9 V	9 V	1 x AA	4 x AA	k.A.	2 x AA	9 V
Betriebsdauer	k.A.	k.A.	k.A.	50	200	18	k.A.	k.A.	k.A.	12
Gewicht	270	270	480	340	420	195 + Batt.	k.A.	k.A.	480	227
Preis ca.	250 €	430 €	690 €	350 €	560 €	610 €	150 €	310 €	690 €	240 €

1) Bei mehreren alternativen Angaben zur Genauigkeit gilt für eine gemessene Temperatur der jeweils größere Wert.

2) bei von 23°C abweichender Geräte-Temperatur.

3) Durchmesser des Meßfeldes bei einem Objektabstand von 1m/5m.

Für die Anwendung der Thermographie zur Feststellung versteckter Baufehler oder Schäden ist eine möglichst hohe Temperaturauflösung (möglichst besser als 0,1 K) und damit verbundene Bildqualität wesentlich. Da Kamerasysteme mit Einzeldetektor (sogenannte "Scanner" - das Meßobjekt wird mittels eines mechanischen Ablenksystems "gescannt") zur Zeit im Vergleich zu den neuen Focal Plane Array (FPA) Kameras mit Detektormatrix noch eine bessere Temperaturauflösung bieten, sind sie zu empfehlen. Das Kühlsystem sollte die nötige Auflösung gewährleisten.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die räumliche Auflösung der Kamera. 1,5 mrad (bei einer Objektdistanz von 1m beträgt der Durchmesser des Einzelflecks, der jedem Pixel zugeordnet ist, 1,5 mm) ist ein Wert, den gute, kommerzielle Kamerasysteme zur Zeit aufweisen.

Kamera und Zubehör sollten für den Außenbetrieb geeignet sein [34].

Messungen bei **Regen** oder sehr **hoher Luftfeuchtigkeit** sollten vermieden werden. Auch im Bereich des atmosphärischen Fensters zwischen 8 und 14  $\mu\text{m}$  wird Strahlung von Wassermolekülen absorbiert. Wenn sich lokal ein Wasserfilm auf die zu untersuchende Fläche gelegt hat, so kann dieser zu einer lokalen Veränderung des Emissionsgrades der Oberfläche und folglich zu einer verfälschten Temperaturmessung führen. Andererseits entziehen verdunstende Wassertropfen der Oberfläche Wärme, so daß lokal eine zu tiefe Temperatur gemessen werden kann.

Bezüglich des **Windes** sollten Messungen bei gleichmäßigen Windverhältnissen mit Windgeschwindigkeiten unter etwa 2 m/s durchgeführt werden. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann sich eine turbulente Strömung über der Testfläche ausbilden. Eine ungleichförmige Temperaturverteilung ergibt sich dann aufgrund lokal unterschiedlicher Wärmeübergänge und kann zu Fehlinterpretationen führen.

Kurzzeitige Variationen der **Einstrahlungswerte** spiegeln sich in der Variation der Oberflächentemperaturen wieder. Diese Temperaturänderungen führen bei thermographischer Beobachtung zu einem schnell variierenden Erscheinungsbild der Fassade. Thermographische Messungen sind, wegen wiederholter Aufheiz- und Abkühlprozesse, bei stark variierenden Einstrahlungswerten unzuverlässig und sollten vermieden werden.

Auch sonstige **externe Quellen für Temperaturunterschiede** an der zu vermessenden Fläche sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Diesbezüglich sind Teilverschattungseffekte und die Reflexion von Objekten aus der Umgebung zu erwähnen. Der Einfluß von Umgebungsreflexionen ist um so ausgeprägter, je niedriger die Emissivität des zu untersuchenden Objektes ist. Im Falle üblicher Fassadenputze ist die Emissivität mit etwa 0,9 jedoch in der Regel hoch [34, 35].

### 3.3 Sonstige Gebäudedaten

#### 3.3.1 Allgemeines

Die energetische Sanierung eines Gebäudes ist nur dann sinnvoll, wenn die Bausubstanz hinreichend gut ist. Für die Ermittlung von Schäden an Gebäuden gibt es umfangreiche meßtechnische Möglichkeiten. Z.B. ist in [36] eine Übersicht über verschiedene Geräte und Meßtechniken gegeben. Es soll hier nur auf die Endoskopie sowie auf Luftdichtheitsmessungen eingegangen werden, da diese auch dazu eingesetzt werden können, wichtige Daten für die energetische Analyse zu ermitteln.

#### 3.3.2 Endoskopie

Sind keine Pläne oder Konstruktionsunterlagen von dem untersuchten Gebäude vorhanden, kann u.U. mit einem Endoskop fehlende Information über die Konstruktion erhalten werden. Dieses aus der Medizintechnik stammende Verfahren ermöglicht die visuelle Inspektion von Hohlräumen. Hierzu wird an geeigneter Stelle ein Loch in die Konstruktion gebohrt und das Endoskop nach und nach eingeführt. Anhand der gewonnenen Bilder können Einzelheiten der Konstruktion ermittelt bzw. die Bausubstanz begutachtet werden.

Typische Anwendungen eines Endoskops im Bauwesen sind z.B.

- die Betrachtung des Konstruktionsaufbaus,
- die Untersuchung der Bausubstanz, z.B. der Zustand von Balkenköpfen und
- die Untersuchung von Schwachstellen in der Luftdichtheitsebene (liegt ein Planungs- oder Ausführungsfehler vor?).

### 3.3.3 Luftdichtheitsmessung

#### 3.3.3.1 Allgemeines

Luftdichtheitsmessungen verfolgen hauptsächlich zwei Ziele: Die Quantifizierung der Leckage eines Gebäudes oder Gebäudebereiches sowie die Ortung der vorhandenen Leckagen. Die Quantifizierung der Gesamtleckage eines Gebäudes ist Grundlage für die Überprüfung von Neubauten hinsichtlich der Einhaltung einer geforderten Luftdichtheit. Auch das Sanierungspotential von Bauten des Gebäudebestands hinsichtlich der Luftdichtheit kann nur anhand einer Leckagequantifizierung abgeschätzt werden. Die Leckageortung, also die Bestimmung der Stellen im Gebäude, welche Undichtheiten aufweisen, soll zu Erkenntnissen führen, die die Verbesserung der Luftdichtheit eines Gebäudes ermöglichen.

Insbesondere bei Gebäuden im Bestand gewinnt die Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewege an Bedeutung. Nur bei ausreichender Kenntnis aller wesentlicher Leckagen nach Ort und Größe, der Leckageverteilung, kann eine zielgerichtete Sanierung hinsichtlich der Luftdichtheit vorgenommen werden. Beide Aufgaben werden i.d.R. mit einer sogenannten "Blower Door" durchgeführt.

#### 3.3.3.2 Verfahren zur Leckageortung an Gebäuden

Luftdichtheitsmessungen sollen eine Verbesserung der Luftdichtheit eines Gebäudes ermöglichen. Hierzu ist es notwendig, im Verlauf einer Messung eine Leckageortung durchzuführen. Neben der einfachen 'Handanalyse', dem Aufspüren von Leckagen bei Unterdruck im Gebäude durch Fühlen mit der Hand, haben sich im wesentlichen die folgend beschriebenen Methoden bewährt.

##### 3.3.3.2.1 Leckageortung mit dem Hitzdrahtanemometer

Als ergänzende Hilfe zur 'Handanalyse' stellt der Einsatz eines empfindlichen Hitzdrahtanemometers die einfachste Form der Leckageortung dar. Anhand von Photos mit abgebildeter Strömungsgeschwindigkeitsanzeige ist diese Methode auch zur Dokumentation von Leckagen geeignet.

Das eingesetzte Anemometer sollte bei Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s ansprechen und mit einer großen LCD- oder einer gut ablesbaren Analoganzeige ausgestattet sein.

##### 3.3.3.2.2 Leckageortung durch Nebel

Hier gibt es prinzipiell zwei Vorgehensweisen; einmal 'lokal', mit geringen Mengen an Nebel bzw. auch mit Rauch, gezielt an verdächtigten Stellen appliziert, zum anderen 'global'. Hierbei wird ein gesamtes Gebäude bzw. der interessierende Bereich mit Nebel gefüllt und anschließend wird von außen oder benachbarten Bereichen beobachtet, an welchen Stellen der Nebel durch die Konstruktion tritt.

Beide Verfahren für die Leckageortung anhand von Nebel finden bei Überdruck im Gebäude statt. Der Nebel wird dann im ersten Fall deutlich sichtbar durch vorhandene Leckagen 'abgezogen' bzw. im zweiten aus dem Gebäude oder Gebäudebereich herausgedrückt.

Zum Einsatz kommen für die lokale Methode häufig 'Rauchstäbchen', deren Rauch jedoch aus schwefeliger Säure besteht und von daher nicht unbedingt zu empfehlen ist. Für die globale Methode kommen Nebelkanonen, wie sie von Bühne und Disco bekannt sind, zum Einsatz. Die kleinsten dieser Nebelkanonen eignen sich auch für die lokale Methode.

##### 3.3.3.2.3 Leckageortung durch Infrarotaufnahmen

Insbesondere wenn eine Bild-Dokumentation von Leckagen erwünscht oder gefordert ist, eignen sich Infrarotaufnahmen. Es gibt hier zwei Ansätze, zum einen einfache Aufnahmen, die anhand einer Temperaturänderung im Leckagebereich die Leckage aufzeigen, zum anderen die Differenzbild-Methode. Hier wird zunächst eine Aufnahme ohne künstliche Druckdifferenz gemacht. Anschließend wird in derselben, deckungsgleichen Einstellung eine Aufnahme mit anliegender Druckdifferenz, üblicherweise 50 Pa Unterdruck für Innenaufnahmen, gemacht. Werden die Temperaturwerte dieser beiden Aufnahmen voneinander abgezogen, bleiben diejenigen Stellen leicht erkennbar, an denen sich die Oberflächentemperatur geändert hat.

Bei der Interpretation von Thermogrammen ist gerade hinsichtlich der Leckageortung große Vorsicht geboten. Fehlinterpretationen sind in vielfältiger Weise möglich. So zeigen beispielsweise unter dem Einfluß der angelegten Druckdifferenz hinterströmte Bauteile schnell Temperaturunterschiede, die auf einem Thermogramm einer Leckage sehr ähnlich sind.

### 3.3.3.3 Verfahren zur Leckagequantifizierung

Blower Door-Messungen sind Luftdichtheitsmessungen nach der Gleichdruckmethode. Die Meßvorrichtung besteht aus einer in der Größe variablen 'Türe', einem regelbaren Ventilator, einer Möglichkeit, den Volumenstrom zu bestimmen sowie einem präzisen Druckdifferenz-Meßgerät für Druckdifferenzen im Bereich 0 bis 100 Pa. Gängige Modelle zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität, geringem Gewicht und ebenfalls geringen Packmaßen aus und sind damit hervorragend für den versatilen Einsatz im gesamten Wohnungsbau geeignet.

Die Kennzeichnung der Luftdichtheit eines Gebäudes erfolgt in Deutschland hauptsächlich mit dem  $n_{50}$ -Wert. Diese Kenngröße beschreibt den Luftwechsel, d.h. das pro Zeiteinheit ausgetauschte Luftvolumen bezogen auf das Luftvolumen des gemessenen Raumes bzw. Gebäudes, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Raum- bzw. Gebäudeinneren und der Umgebung (z.B. [37]).

Gemäß DIN V 4108-7 ist für Gebäude mit Lüftungstechnischer Anlage ein maximaler Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz von  $n_{50} \leq 1,0 h^{-1}$  einzuhalten [38]. Im Bundesanzeiger vom 31. Juli 1998 ist ergänzend vorgegeben, daß ein Gebäude mit Lüftungstechnischer Anlage dann als ausreichend luftdicht anzusehen ist, wenn der  $n_{50}$ -Wert  $1,5 h^{-1}$  nicht überschreitet [39]. Sowohl der Referentenentwurf zur Energieeinsparverordnung [2] als auch die überarbeitete DIN 4108-7 wird für Gebäude mit Lüftungstechnischer Anlage in Anlehnung an den Bundesanzeiger  $n_{50} \leq 1,5 h^{-1}$  festsetzen.

Gebäude ohne Lüftungstechnische Anlage (Gebäude mit Fensterlüftung) haben einen  $n_{50} \leq 3,0 h^{-1}$  einzuhalten.

Folgende allgemeinen Anwendungsgebiete lassen sich für Blower Door-Messungen angeben.

- Überprüfung der Luftdichtheit von gesamten Gebäuden
- Untersuchungen bei Bauschäden, z.B. Feuchteschäden im Dachbereich
- Ortung von Leckagen
- Vorbereitung und ggf. Überprüfung von Sanierungsmaßnahmen
- Untersuchung der Luftdichtheit von einzelnen Bauteilen oder Gebäudebereichen
- Überprüfung von Lüftungsanlagen
- visuelle Dokumentation von Leckagen in Verbindung mit Thermographie

## 4 Vergleichsrechnungen

### 4.1 Allgemeines

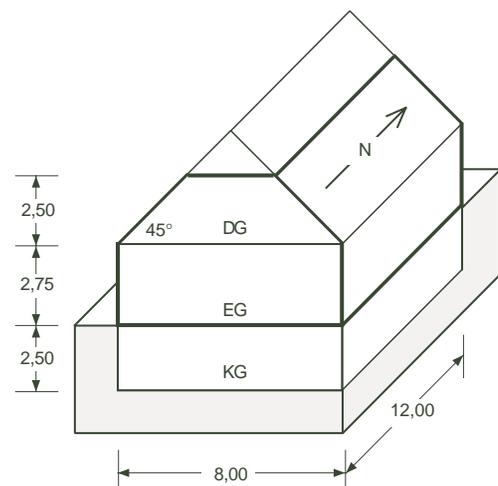
Auf der Basis von Vergleichsrechnungen wird der Einfluß untersucht, den Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten für die thermische Gebäudemodellierung auf die Verteilung des berechneten Bedarfs auf einzelne Gebäude- bzw. Anlagenteile haben. Es wird betrachtet, inwieweit – bzw. ob – sich diese Ungenauigkeiten auf prognostizierte Effekte vorgeschlagener Sanierungsvarianten auswirken. Die Betrachtung erfolgt für ein freistehendes Einfamilienhaus (EFH) und ein Mehrfamiliengebäude (MFH). Die Daten zu den betrachteten Gebäuden gehören nicht zu realen Objekten.

### 4.2 Gebäudedaten

#### 4.2.1 Freistehendes Einfamilienhaus

Das betrachtete freistehende Einfamilienhaus ist in massiver Bauart erstellt und hat ein Pfettendach. Das Gebäude ist voll unterkellert, der Keller ist – mit Ausnahme des Kellerabgangs mit Kellerflur – nicht beheizt. In Bild 18 ist das Gebäude mit den wesentlichen Abmessungen skizziert. Es ergeben sich die in der Tabelle links der Skizze aufgeführten Grunddaten.

beheiztes Volumen $V_e$	459,0	$m^3$
Hüllfläche A	389,4	$m^2$
A / V - Verhältnis	0,85	$m^{-1}$
Nutzfläche $A_N$	146,9	$m^2$
Kenngroße B' (vgl. Tab. 3)	4,8	m



**Bild 18:** Skizze des betrachteten Einfamilienhauses mit Außenmaßen und Grunddaten.

#### 4.2.2 Mehrfamiliengebäude

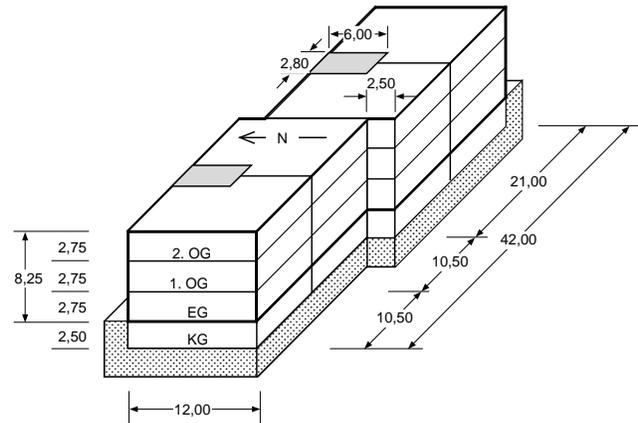
Das betrachtete Mehrfamiliengebäude ist ein 3-geschossiger Zweispänner. Es ist in massiver Bauart erstellt und hat ein Flachdach. Das Gebäude ist voll unterkellert, der Keller ist unbeheizt. Die Erschließung des Gebäudes erfolgt über zwei Treppenhäuser die nach Norden orientiert und ebenfalls unbeheizt sind. In Bild 19 ist das betrachtete Gebäude mit den wesentlichen Abmessungen skizziert. Die Tabelle in Bild 19 links gibt die Grunddaten des Mehrfamiliengebäudes wieder.

## 4.3 Ausgangszustand

### 4.3.1 Allgemeines

In Tabelle 12 sind allgemeine Eingabedaten für das Rechenverfahren zusammengestellt. Dabei sind nur diejenigen allgemeinen Parameter des Rechenverfahrens berücksichtigt, die für eine Anpassung im Rahmen der Angleichung von Bedarf und Verbrauch in Frage kommen bzw. sich bei Einfamilienhaus und Mehrfamiliengebäude unterscheiden.

beheiztes Volumen $V_e$	4158,0	$m^3$
Hüllfläche A	1899,2	$m^2$
A / V - Verhältnis	0,50	$m^{-1}$
Nutzfläche $A_N$	1329,9	$m^2$
Kenngroße B' (vgl. Tab. 3)	9,33	m



**Bild 19:** Skizze mit Außenmaßen und Grunddaten zum betrachteten Mehrfamiliengebäude, einem 3-geschossigen Zweispänner.

Bei der Beschreibung der Anlagentechnik sind in Abschnitt 4.3.2 bzw. 4.3.3 die definierenden Begriffe gemäß EPASS-Verfahren [6] zum besseren Verständnis *kursiv* aufgeführt. Entsprechend dem früher üblichen "Sicherheitszuschlag" bei der Festlegung der einzubauenden Kesselleistung wird die gem. 4108-6 auf der Basis von  $\theta_{amb,HL} = -12^\circ C$  berechnete maximale Heizlast mit dem Faktor "2,0" multipliziert. In einem realen Gebäude müssen selbstverständlich die Daten des vorhandenen Kessels – anhand des Typenschildes bzw. der technischen Unterlagen – ermittelt und für die Berechnung herangezogen werden.

**Tabelle 12:** Eingabedaten und Randbedingungen zum Rechenverfahren nach 4108-6.

Bezeichnung	Größe	Ein- familien- haus	Mehr- familien- gebäude	Einheit
Wärmebrückenkorrekturwert	$\Delta U_{WB}$	0,1	0,1	W/(m <sup>2</sup> K)
Luftwechsel	n	0,7	0,7	h <sup>-1</sup>
flächenbez. interne Warmegewinne <sup>1)</sup>	$q_i$	5	5	W/m <sup>2</sup>
wirksame Wärmespeicherfähigkeit <sup>2)</sup>	$C_{\text{wirk}}/V$	60	60	Wh/(m <sup>3</sup> K)
Speicherfähigkeit für Nachtabenkung <sup>3)</sup>	$C_{\text{wirk,NA}}/V$	18	18	Wh/(m <sup>3</sup> K)
Umrechnung belüftetes Volumen	$F_{VN}$	0,76	0,8	–
Heizunterbrechung pro Tag	$t_u$	7	7	h
Luftwechsel in der Absenkphase	$n_{\text{Absenk}}$	0,7	0,7	h <sup>-1</sup>
normale Soll-Innentemperatur	$\theta_i$	19	19	°C
Auslegungstemperatur Heizleistung	$\theta_{\text{amb,HL}}$	–12	–12	°C
spezifischer Warmwasserwärmebedarf		12,5	12,5	kWh/(m <sup>2</sup> a)
<sup>1)</sup> bei dezentraler Warmwasserbereitung ist $q_i = 4,5 \text{ W/m}^2$ <sup>2)</sup> "schweres Gebäude", DIN 4108-6, Abschnitt 6.5.2 <sup>3)</sup> "schweres Gebäude", DIN 4108-6, Anhang C.2				

**Tabelle 13:** Daten der Bauteile für den Ausgangsfall des betrachteten Einfamilienhauses.

Bauteil	Fläche	U-Wert	g-Wert	Temperaturreduktionsfaktor	Absorptionsgrad	Minderungsfaktor (Rahmen)
	[m <sup>2</sup> ]	$[\frac{W}{m^2 K}]$	[-]	[-]	[-]	[-]
Außenwand Nord	30,3	1,2		1	0,5	
Außenwand Ost	24,3	1,2		1	0,5	
Außenwand Süd	23,2	1,2		1	0,5	
Außenwand West	26,4	1,2		1	0,5	
Fenster Nord	5,5	2,6	0,77	1		0,7
Fenster Ost	6,6	2,6	0,77	1		0,7
Fenster Süd	12,5	2,6	0,77	1		0,7
Fenster West	6,6	2,6	0,77	1		0,7
Dach Ost	42,5	0,8		1	0,8	
Dach West	42,5	0,8		1	0,8	
Kehlbalkendecke	36,0	0,9		0,8		
Haustüre Ost	2,1	1,8		1	0,5	
Kellerdecke <sup>1)</sup>	84,0	1,1		0,7		
Bodenplatte <sup>2)</sup>	12,0	1,3		0,3		
Wand zu Erdreich <sup>3)</sup>	10,0	1,5		0,4		
Kellerinnenwand	21,5	2,5		0,5		
Kellerinnentüre	3,5	4,0		0,5		
<sup>1)</sup> Temperaturreduktionsfaktor mit $B' < 5$ und Keller ohne Perimeterdämmung <sup>2)</sup> Temperaturreduktionsfaktor mit $B' < 5$ und $R_f < 1$ <sup>3)</sup> Temperaturreduktionsfaktor mit $B' < 5$ und $R_w < 1$						

#### 4.3.2 Freistehendes Einfamilienhaus

In Tabelle 13 sind die einzelnen Bauteile des betrachteten Einfamilienhauses mit den für die Berechnung notwendigen Daten im Ausgangsfall wiedergegeben.

Das Gebäude ist mit einem *kombinierten System* für Heizwärmeversorgung und Trinkwarmwasserbereitung in Form einer *Zentralheizung* ausgestattet. Die Heizung ist außerhalb des beheizten Gebäudebereichs angeordnet. Die Heizung besteht aus einem *automatischen Spezialkessel mit Gebläse*, das Baujahr liegt *vor 1978*. Die Kesselleistung beträgt *32 kW*. Der Brennstoff ist *Öl*. Die Regelgeräteausstattung ist *normal*, die Regelbarkeit ebenfalls *normal*.

Mit den beschriebenen Daten erhält man für das betrachtete Einfamilienhaus im Ausgangsfall die in Tabelle 14 wiedergegebenen Bedarfswerte.

Die anteilige Verteilung der Transmissionswärmeverluste unter bauteilweiser Berücksichtigung von solaren Wärmegeinnen, der Lüftungswärmeverluste, des Warmwasserwärmebedarfs sowie des Bereitstellungsbedarfs ist für den betrachteten Ausgangsfall in Tabelle 15 zusammengefaßt wiedergegeben.



**Tabelle 16:** Daten der Bauteile für den Ausgangsfall des betrachteten Mehrfamiliengebäudes (3-geschossiger Zweispänner).

Bauteil	Fläche	U-Wert	g-Wert	Temperaturreduktionsfaktor	Absorptionsgrad	Minderungsfaktor (Rahmen)
	[m <sup>2</sup> ]	$[\frac{W}{m^2 K}]$	[-]	[-]	[-]	[-]
Außenwand Nord	213,7	1,2		1	0,5	
Außenwand Ost	74,3	1,2		1	0,5	
Außenwand Süd	259,9	1,2		1	0,5	
Außenwand West	74,3	1,2		1	0,5	
Außenwand Treppenh.	5,5	1,2		1	0,5	
Fenster Nord	86,6	2,6	0,77	1		0,7
Fenster Ost	24,8	2,6	0,77	1		0,7
Fenster Süd	86,6	2,6	0,77	1		0,7
Fenster West	24,8	2,6	0,77	1		0,7
Verglasung Treppenh.	32,3	5,2	0,90	1		0,8
Flachdach horiz.	470,4	0,8		1	0,8	
Kellerdecke <sup>1)</sup>	470,4	1,1		0,65		
Innenwände <sup>2)</sup>	113,0	2,6		0,5		
Wohnungstüren <sup>2)</sup>	32,0	5,0		0,5		
<sup>1)</sup> Temperaturreduktionsfaktor mit $5 < B' < 10$ , unbeheizter Keller ohne Perimeterdämmung <sup>2)</sup> Temperaturreduktionsfaktor "zu unbeheizten Räumen", siehe Tabelle 3						

### 4.3.3 Mehrfamiliengebäude

Alle Bauteile des betrachteten 3-geschossigen Zweispanners mit den für die Berechnung notwendigen Daten im Ausgangsfall sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Das Mehrfamiliengebäude ist mit einem *kombinierten System* für Heizwärmeversorgung und Trinkwarmwasserbereitung in Form einer *Zentralheizung* ausgestattet. Die Heizung ist außerhalb des beheizten Gebäudebereichs angeordnet. Die Heizung besteht aus einem *automatischen Spezialkessel mit Gebläse*, das Baujahr liegt vor 1978. Die Kesselleistung beträgt 189 kW. Der Brennstoff ist Öl. Die Regelgeräteausrüstung ist *gut*, die Regelbarkeit *normal*.

Mit den beschriebenen Daten erhält man für das betrachtete Mehrfamiliengebäude im Ausgangsfall die in Tabelle 17 zusammengestellten Bedarfswerte.

Die Transmissionswärmeverluste (bauteilweise Berücksichtigung solarer Wärmegewinn), die Lüftungswärmeverluste, der Warmwasserwärmebedarf sowie der Bereitstellungs-Wärmebedarf verteilen sich für den betrachteten Ausgangsfall auf o.a. Bedarfswerte anteilig wie in Tabelle 18 zusammengestellt.

**Tabelle 17:** Errechnete Bedarfswerte zum betrachteten Mehrfamiliengebäude in der Grundvariante mit und ohne Nachtabsenkung (NA).

	ohne NA	mit NA	
spez. Transmissionswärmeverlust ( $H_T$ )	2488	--	W/K
spez. Wärmeverlust (H)	3279	--	W/K
Heizwärmebedarf (HWB)	143	127	kWh/(m <sup>2</sup> a)
Heizenergiebedarf	231	209	kWh/(m <sup>2</sup> a)
Gesamtenergiebedarf (GEB)	262	240	kWh/(m <sup>2</sup> a)
Primärenergiebedarf	293	268	kWh/(m <sup>2</sup> a)
primärenergetische Aufwandszahl	1,88	1,92	–

**Tabelle 18:** Anteilige Verteilung der errechneten Bedarfswerte zum betrachteten Mehrfamiliengebäude in der Grundvariante.

	Anteil bezogen auf						
	$H_T$	H	HWB		GEB		
				mit NA		mit NA	
Außenwände	32,8	24,9	26,4	27,7	14,4	14,7	%
Fenster	24,2	18,3	9,1	7,2	5,0	3,8	%
Flachdach	18,2	13,8	9,2	10,6	5,0	5,6	%
Kellerdecke	16,5	12,5	11,9	13,9	6,5	7,4	%
Verglasung Treppenhaus	6,9	5,2	5,6	5,1	3,0	2,7	%
Haustüren	1,4	1,1	1,3	1,3	0,7	0,7	%
$\Sigma$ Transmission	100	75,9	63,5	65,9	34,7	35,0	%
Lüftung		24,1	36,5	34,1	19,9	18,1	%
Warmwasser					4,8	5,2	%
Bereitstellung / Kessel					40,6	41,7	%
Summe		100	100	100	100	100	%

## 4.4 Parameter und Variationsbreite

### 4.4.1 Allgemeines

In der Praxis der Vor-Ort-Beratung muß zunächst der ermittelte Jahres-Heizenergiebedarf unter Berücksichtigung des (objektbezogenen) Energiebedarfs für Trinkwarmwasser mit dem tatsächlichen Gas-/Heizöl- bzw. Stromverbrauch der vorangegangenen Jahre verglichen werden. Anhand verschiedener eingehender Parameter wird der errechnete Energiebedarf möglichst gut an die Verbrauchsdaten angepaßt. Ob dabei die Wahl der Parameter von entscheidender Bedeutung für die spätere Evaluierung möglicher Sanierungsmaßnahmen ist und mit entsprechend großer Sorgfalt erfolgen muß, wird im weiteren diskutiert. Die folgenden Parameter kommen vorrangig für die Anpassung des Bedarfs an den Verbrauch in Betracht:

- Raumtemperatur
- Ausstattung und Regelbarkeit der Heizungsanlage
- U-Werte (insbesondere bei Konstruktionen, die nicht detailliert ermittelt werden können)
- beheizter Bereich und Bauteilflächen
- Dauer der Nachtabsenkung
- Luftwechsel

Die angegebene Reihenfolge greift den weiter unten durchgeführten Betrachtungen voraus und ist auf die in Tabelle 27 auf Seite 62 angegebenen Sensitivitäten  $\sigma_{\text{GEB}}$  zurückzuführen.

Selbstverständlich muß die Anpassung auf einer entsprechenden Rücksprache mit den Nutzern des betrachteten Gebäudes beruhen, da einige der genannten "Stellschrauben" direkt dem Nutzereinfluß unterliegen.

Das verwendete Monatsbilanzverfahren benötigt zur Beschreibung des Außenklimas Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur sowie orientierungsabhängige monatliche Strahlungsintensitäten. Mittlere Außenlufttemperaturen und Strahlungsdaten sind in [4] für 15 Referenzregionen sowie für ein "deutsches Referenzklima" gegeben. Weiterhin sind mittlere Außenlufttemperaturen für 39 Referenzorte in den Referenzregionen enthalten. In aller Regel wird der Vor-Ort-Energieberater keine genaueren klimatischen Daten für den Standort eines Objektes haben. Daher wird der Parameter "Standort" nicht für die Anpassung des Bedarfs an den Verbrauch weiter betrachtet.

### 4.4.2 Pauschale Variationen

Der Einfluß oben angeführter sowie einiger weiterer Parameter auf den Gesamtenergiebedarf (GEB) wird zunächst durch die Variation jeweils einer der genannten Parameter betrachtet. In Tabelle 19 sind alle variierten Parameter mit den verwendeten Variationsbreiten als Absolutwerte, in Tabelle 20 sind die Variationsbreiten prozentual wiedergegeben.

### 4.4.3 Variation "beheizter Bereich"

Die Variation des "beheizten Bereichs" wird nur für das Beispiel "Einfamilienhaus" anhand der Nicht-Berücksichtigung des Kellerabganges durchgeführt.

Durch die bei dem betrachteten Einfamilienhaus getroffene Annahme, daß der Kellerabgang nicht in das rechnerische Modell mit aufgenommen wird, entfallen die Bauteile "Bodenplatte", "Wand zu Erdreich", "Kellerinnenwand" sowie "Kellerinnentüre", die wärmetauschende Hüllfläche verringert sich. Das umbaute Volumen und damit die Energiebezugsfläche verringern sich ebenfalls. Es wird angenommen, daß die Kellerdecke geschlossen ist, d.h., die Fläche dieses Bauteils vergrößert sich um ca. 12 m<sup>2</sup>.

**Tabelle 19:** Variationsbreite der betrachteten Parameter. Die in Klammern angegebenen Werte sind die im Ausgangsfall eingesetzten.

Parameter	Variationsbereich			Einheit	
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	10	(7)	0	h	
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	18	(19)	22	°C	
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	10	(12,5)	15	kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	0,5	(0,7)	1,5	h <sup>-1</sup>	
<b>Heizanlage</b>					
Geräteausstattung	EFH	gut	(normal)	mäßig	–
	MFH	gut	normal	(mäßig)	–
Regelbarkeit		gut	(normal)	gering	–
<b>Wärmedurchgangskoeffizient U</b>					
opake Bauteile	-20	(±0)	+20	%	
Fenster <sup>1)</sup>	(2,6)	2,8	2,9	W/(m <sup>2</sup> K)	
Gesamtenergiedurchlaßgrad $g^2)$	(0,77)	0,72	0,7	–	
<b>Bauteilfläche <math>A_k^3)</math></b>					
opake Bauteile	-10	(±0)	+10	%	
Fenster	-10	(±0)	+10	%	
Verschattung der Südfassade	–	(0,9)	0,5	–	

<sup>1)</sup> Isolierglas-Doppelscheibe mit 10-16, 8-10 bzw. 6-8 mm Scheibenzwischenraum (siehe z.B. [40])

<sup>2)</sup> Isolierglas-Doppelscheibe mit 2 x 8, 2 x 6 bzw. 2 x 4 mm Scheibendicke (siehe z.B. [40])

<sup>3)</sup> Dabe wird die absolute wärmetauschende Hüllfläche verändert, nicht (nur) die Verteilung

**Tabelle 20:** Prozentuale Variationsbreite der betrachteten Parameter. 100 % entspricht jeweils den in Tabelle 19 in Klammern angegebenen Werten.

Parameter	proz. Variationsbereich			
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	143	100	0	
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	95	100	116	
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	80	100	120	
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	71	100	214	
<b>Heizanlage</b>				
Geräteausstattung <sup>1)</sup>	EFH	95	100	109
	MFH	87	91	100
Regelbarkeit <sup>1)</sup>	EFH	92	100	107
	MFH	96	100	105
<b>Wärmedurchgangskoeffizient U</b>				
opake Bauteile	80	100	120	
Fenster	100	108	112	
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	100	94	91	
<b>Bauteilfläche <math>A_k</math></b>				
opake Bauteile	90	100	110	
Fenster	90	100	110	
Verschattung der Südfassade	–	100	56	

<sup>1)</sup> vgl. Wertetabelle in [6]

## 4.5 Berechnungsergebnisse

### 4.5.1 Freistehendes Einfamilienhaus

Bei dem betrachteten freistehenden Einfamilienhaus führen die durchgeführte Variationen zu einer Änderung des Gesamtenergiebedarfs gemäß Tabelle 21 bzw. zu einer prozentualen Änderung gemäß Tabelle 22. In Tabelle 23 sind für einige derjenigen Variationen, die zu nennenswerten Änderungen im Gesamtenergiebedarf führen, die anteiligen Verteilungen auf Bauteile, Lüftung, Trinkwarmwasser sowie auf die Bereitstellung bzw. die Kesselverluste wiedergegeben.

**Tabelle 21:** Änderung des Gesamtenergiebedarfs (mit Nachtabsenkung) des betrachteten Einfamilienhauses für die in Tabelle 19 gegebenen Parametervariationen.

Parameter	GEB in kWh/(m <sup>2</sup> a)		
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	375	410	457
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	372	410	514
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	406	410	414
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	394	410	470
<b>Heizanlage</b>			
Geräteausstattung	395	410	438
Regelbarkeit	387	410	430
<b>Wärmedurchgangskoeffizient U</b>			
opake Bauteile	354	410	465
Fenster	410	416	418
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	410	413	414
<b>Bauteilfläche <math>A_k</math></b>			
opake Bauteile	379	410	441
Fenster	407	410	413
Verschattung der Südfassade	--	410	420
"beheizter Bereich"	397	410	--

**Tabelle 22:** Prozentuale Änderung des Gesamtenergiebedarfs (mit Nachtabsenkung) des betrachteten Einfamilienhauses für die in Tabelle 19 gegebenen Paramtervariationen. Dabei entsprechen 410 kWh/(m<sup>2</sup> a) 100 %.

Parameter	GEB in %		
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	91	100	111
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	91	100	125
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	99	100	101
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	96	100	115
<b>Heizanlage</b>			
Geräteausstattung	96	100	107
Regelbarkeit	94	100	105
<b>Wärmedurchgangskoeffizient U</b>			
opake Bauteile	86	100	113
Fenster	100	101	102
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	100	101	101
<b>Bauteilfläche <math>A_k</math></b>			
opake Bauteile	92	100	108
Fenster	99	100	101
Verschattung der Südfassade	--	100	102
"beheizter Bereich"	97	100	--

**Tabelle 23:** Prozentuale anteilige Verteilung einiger Varianten des zum betrachteten freistehenden Einfamilienhaus errechneten Gesamtenergiebedarfswerte (GEB) mit Nachtabsenkung (NA) auf Bauteile, Lüftung, Warmwasser und Bereitstellung.

Fall	Anteil an GEB mit NA [%]					
	$\theta_i = 22^\circ\text{C}$	Rga <sup>1)</sup> "gut"	$U_{\text{opak}} +20\%$	$t_u = 10 \text{ h}$	"beh. Ber."	Ausg.f.
Außenwände	14,2	13,8	14,1	12,9	14,7	13,3
Fenster	3,9	4,4	3,2	3,7	4,6	4,2
Dach	6,6	6,1	6,2	5,5	6,4	5,8
Kellerdecke	7,8	7,8	8,0	7,4	9,4	7,5
Kehlbalkendecke	3,1	3,1	3,3	3,0	3,3	3,0
Kellerinnenwand	3,3	3,3	3,6	3,0	--	3,1
Innentüre	0,9	0,9	0,9	0,8	--	0,8
Wand zu Erdreich	0,7	0,7	0,7	0,7	--	0,7
Bodenplatte	0,6	0,6	0,6	0,5	--	0,5
Türe (Ost)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\Sigma$ Transmission	41,5	40,8	41,0	38,0	38,9	39,4
Lüftung	10,1	10,2	8,6	9,6	10,1	9,8
Warmwasser	2,4	3,2	2,7	3,3	3,1	3,0
Bereitstellung / Kessel	46,0	45,8	47,7	49,1	47,9	47,8
Summe	100	100	100	100	100	100

<sup>1)</sup> Regelgeräteausstattung der Heizungsanlage

#### 4.5.2 Mehrfamiliengebäude

Oben angeführte Variationen führen bei dem betrachteten Mehrfamiliengebäude zu einer Änderung des Gesamtenergiebedarfs gemäß Tabelle 24 (absolute Werte) bzw. gem. Tabelle 25 (prozentuale Werte).

Tabelle 26 gibt für die Variationen, die zu deutlichen Änderungen im Gesamtenergiebedarf führen, die anteilige Verteilung auf die Bauteile, die Lüftung, das Trinkwarmwasser sowie die Bereitstellung bzw. die Kesselverluste wieder.

**Tabelle 24:** Änderung des Gesamtenergiebedarfs (mit Nachtabsenkung) des betrachteten Mehrfamiliengebäudes für die in Tabelle 19 gegebenen Paramtervariationen.

Parameter	GEB in kWh/(m <sup>2</sup> a)		
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	222	240	262
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	217	240	302
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	236	240	243
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	224	240	297
Heizanlage			
Geräteausstattung	240	249	267
Regelbarkeit	227	240	254
Wärmedurchgangskoeffizient U			
opake Bauteile	214	240	265
Fenster	240	244	246
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	240	242	242
Bauteilfläche $A_k$			
opake Bauteile	225	240	255
Fenster	236	240	244
Verschattung der Südfassade	—	240	247

**Tabelle 25:** Prozentuale Änderung des Gesamtenergiebedarfs (mit Nachtabsenkung) des betrachteten Mehrfamiliengebäudes für die in Tabelle 19 gegebenen Paramtervariationen. Dabei entsprechen 240 kWh/(m<sup>2</sup> a) 100 %.

Parameter	GEB in %		
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	93	100	109
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	90	100	126
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	98	100	101
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	93	100	124
<b>Heizanlage</b>			
Geräteausstattung	100	104	111
Regelbarkeit	95	100	106
<b>Wärmedurchgangskoeffizient U</b>			
opake Bauteile	89	100	110
Fenster	100	102	103
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	100	101	101
<b>Bauteilfläche <math>A_k</math></b>			
opake Bauteile	94	100	106
Fenster	98	100	102
Verschattung der Südfassade	--	100	103

**Tabelle 26:** Prozentuale anteilige Verteilung des errechneten Gesamtenergiebedarfs (GEB) mit Nachtabsenkung (NA). Werte für einige Varianten des betrachteten Mehrfamiliengebäudes, Verteilung auf Bauteile, Lüftung, Warmwasser und Bereitstellung.

Fall	Anteil an GEB mit NA [%]				
	$\theta_i = 22^\circ\text{C}$	$n = 1,5 \text{ h}^{-1}$	$U_{\text{opak}} +20\%$	$t_u = 10 \text{ h}$	Ausg.f.
Außenwände	15,8	11,2	16,2	14,5	14,7
Fenster	3,5	2,3	3,4	3,2	3,8
Flachdach	6,7	4,0	6,3	5,4	5,6
Kellerdecke	7,8	5,4	8,3	7,4	7,4
Verglasung Treppenhaus	2,7	2,1	2,4	2,6	2,7
Haustüren	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7
$\Sigma$ Transmission	37,2	25,9	37,8	33,8	35,0
Lüftung	18,7	30,7	16,3	17,9	18,1
Warmwasser	4,1	4,2	4,7	5,6	5,2
Bereitstellung / Kessel	40,0	39,2	41,6	42,7	41,7
Summe	100	100	100	100	100

<sup>1)</sup> Regelgeräteausrüstung der Heizungsanlage

## 4.6 Auswertung und Diskussion

### 4.6.1 Allgemeines

Der Sinn einer Vor-Ort-Energieberatung ist die zielgerichtete Evaluierung energetischer Sanierungsmaßnahmen auf der Basis des energetischen Ist-Zustandes des interessierenden Gebäudes. Auf der Basis dieses Ist-Zustandes werden diejenigen Maßnahmen für eine energetische Sanierung identifiziert, die

- zu deutlichen Reduktionen des Energiebedarfs bzw. von CO<sub>2</sub>-Emissionen führen

und dabei insbesondere

- wirtschaftlich sind,

d.h. eine angemessene Amortisationsdauer (i.d.R. für Anlagentechnik unter ca. 20 Jahre und für bauliche Maßnahmen unter 40 bis max. 50 Jahre) aufweisen.

Die Einschätzung des Einsparpotentials aus wirtschaftlicher Sicht erfolgt auf Basis des Gesamtenergiebedarfs. Die volkswirtschaftlich interessante Frage nach der CO<sub>2</sub>-Einsparung muß über den Vergleich des Primärenergiebedarfs vor und nach einer Maßnahme durchgeführt werden. Deutliche Unterschiede in den beiden Betrachtungen wird es z.B. dann geben, wenn im Ausgangsfall ein nennenswerter Teil des Energiebedarfs über Strom bereitgestellt wird – zum Beispiel bei einem getrennten Systeme für Heizwärme und Trinkwarmwasser bei dem der Trinkwarmwasserwärmebedarf durch Strom abgedeckt wird – welcher im sanierten Fall z.B. durch Gas oder gar Fernwärme abgedeckt werden kann.

Die Anpassung des errechneten Bedarfs an den mittleren Verbrauch der Vorjahre muß im Vorfeld zu der Betrachtung von Sanierungsvarianten sorgfältig erfolgen. Die rechnerische Beschreibung eines Gebäudes und die aus der rechnerischen Beschreibung von Sanierungsmaßnahmen gewonnene Information – über die energetische Wirkung und die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen – kann nur so gut bzw. sachlich richtig sein, wie es die wesentlichen in die Berechnung eingehenden Parameter sind. Folglich müssen die wesentlichen Parameter der Berechnung so gut wie möglich an die vorgefundenen realen Gegebenheiten angepaßt werden.

Zu jeder angedachten Sanierungsmaßnahme ist eine Amortisationsdauer zu bestimmen. Dies kann z.B. gemäß Gleichung 19 erfolgen [6]. Die Berechnung beruht auf den angenommenen Kosten der Maßnahme, der Energieeinsparung durch die Maßnahme, den Energiekosten, der Energiepreissteigerung sowie einem Zinssatz für ein Darlehen. Die Energiekosten sowie die Energiepreissteigerung sind dabei wichtige Parameter; je höher die Energiekosten und je größer die Energiepreissteigerung ist, desto geringer wird die Amortisationsdauer, d.h. desto wirtschaftlicher wird eine gegebene Maßnahme.

$$n = \frac{\ln [j (i - q) + 1]}{\ln \left( \frac{i}{q} \right)}$$

mit

$$j = \frac{K}{(\Delta E K_E A_{\text{Bez.}})} \quad (19)$$

$$i = 1 + \frac{P_V}{100}$$

$$q = 1 + \frac{P}{100}$$

wobei

$n$	Amortisationsdauer in Jahren
$K$	Kosten der Maßnahme in €
$\Delta E$	Energieeinsparung durch die Maßnahme in kWh/m <sup>2</sup>
$K_E$	Energiekosten in €/kWh
$A_{\text{Bez.}}$	Energiebezugsfläche in m <sup>2</sup>
$P_V$	Energiepreissteigerung in %
$P$	jährlicher Zinssatz in %

Im weiteren werden die folgenden Sanierungsschritte – ein anlagentechnischer, ein baulicher – betrachtet:

1. Austausch des vorhandenen automatischen Spezialkessels mit Gebläse durch einen Brennwertkessel mit angepaßter Leistung (ohne überdimensionierung mit Sicherheitsfaktor) und Verbesserung der Regelgeräteausrüstung auf die Einstufung "gut", d.h. zusätzliche Ausrüstung mit Thermostatventilen ("S1").
2. Dämmung der Außenwände mit 12 cm Wärmedämmverbundsystem ( $\lambda = 0,04 \text{ W/(m K)}$ ) sowie Dämmung der Kellerdecke mit 4 cm starken Dämmplatten ( $\lambda = 0,04 \text{ W/(m K)}$ ) aus geeignetem Material ("S2").

Die zweite Maßnahme wird dabei ausschließlich als additive weitere Maßnahme zu Maßnahme 1 betrachtet und führt bei den ursprünglich angesetzten Bauteilen zu U-Werten für die Außenwände und die Kellerdecke von

$$\begin{array}{ll} \text{Außenwände} & U_{\text{neu}} = 0,26 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \\ \text{Kellerdecke} & U_{\text{neu}} = 0,52 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}. \end{array}$$

bzw. bei der Betrachtung von um 20% erhöhten U-Werten der opaken Bauteile zu

$$\begin{array}{ll} \text{Außenwände} & U_{\text{neu}} = 0,27 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \text{ (103,8 \%)} \\ \text{Kellerdecke} & U_{\text{neu}} = 0,57 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \text{ (108,6 \%)} . \end{array}$$

und schließlich bei der Betrachtung der um 20 % verringerten U-Werte opaker Bauteile zu

$$\begin{array}{ll} \text{Außenwände} & U_{\text{neu}} = 0,25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \text{ (94,6 \%)} \\ \text{Kellerdecke} & U_{\text{neu}} = 0,47 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \text{ (89,3 \%)} . \end{array}$$

Es ist also bereits bei den neuen U-Werten eine deutliche Dämpfung des bei dem ursprünglichen Bauteil angenommenen Unterschiedes im U-Wert zu erkennen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.4.2.6 und Bild 8 auf Seite 21).

Die Kosten der betrachteten Maßnahmen zur Sanierung werden für die Berechnung der jeweiligen Amortisationszeit wie folgt angenommen.

Einzelansätze:

Brennwertkessel, komplett 4 090 € für das Einfamilienhaus bzw. 6 900 € für das Mehrfamiliengebäude  
 Thermostatventile 40 € pro Stück, Montagezeit ca. 45 min pro Ventil,  
 Wärmedämmverbundsystem 80 €/m<sup>2</sup>,  
 Dämmplatten für die Kellerdecke 20 €/m<sup>2</sup>.

#### 4.6.2 Variation einzelner Parameter

Die für jeden Parameter vorhandene Unsicherheit bzw. der plausible Wertebereich, innerhalb dessen ein Parameter variiert werden sollte, wirkt sich auf das Ergebnis – den berechneten Gesamtenergiebedarf (GEB) – unterschiedlich stark aus. Diese "relative Wirkung" oder "Sensitivität" hängt von verschiedenen Gesichtspunkten ab. Unter anderem davon, welchen Anteil die Konstruktion / der Gebäudebereich / die Anlagentechnik am GEB hat.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Variationsrechnungen beschrieben, für die eine isolierte Betrachtung einzelner Parameter durchgeführt wurde. Diese führt z.B. für eine Fehleinschätzung – oder Anpassung – des U-Wertes der opaken Bauteile um 20% zu einer Änderung des Gesamtenergiebedarfs von ca. 12 %. Dabei ändert sich die anteilige Verteilung auf die Bauteile usw. nur wenig (siehe Tabellen 23 und 26). Ungenauigkeiten in den geometrischen Daten werden für das Einfamilienhaus und das Mehrfamiliengebäude durch eine pauschale Verringerung bzw. Vergrößerung der Bauteilflächen gemäß Tabelle 19 auf Seite 55 (getrennt für opake und transluzente Bauteile) betrachtet. In Tabelle 21 auf Seite 56 bzw. 24 auf Seite 58 sind die Berechnungsergebnisse für den Gesamtenergiebedarf (GEB) wiedergegeben. Die Änderung der opaken Flächen um  $\pm 10 \%$  führen zu Änderungen des GEB um  $\pm 8 \%$  für das Einfamilienhaus bzw. ca.  $\pm 6 \%$  für das MFH.

Anhand einfach zu bildender Kenngrößen können so diejenigen Parameter ermittelt werden, die den größten Einfluß auf den Gesamtenergiebedarf aufweisen. Die Sensitivität des Gesamtenergiebedarfs (GEB) kann bezüglich eines Parameters durch

$$\sigma_{\text{GEB}} = \frac{|\delta \text{GEB}|}{|\delta \text{Parameter}|} \quad (20)$$

definiert werden. Man erhält mit dieser Definition z.B. für den Luftwechsel bei dem betrachteten Einfamilienhaus (Zahlenwerte aus den Tabellen 20 und 22)

$$\sigma_{\text{GEB},n} = \frac{1}{2} \left( \frac{0,04}{0,29} + \frac{0,15}{1,14} \right) = 0,13. \quad (21)$$

Sind die betrachteten Intervalle nicht symmetrisch ( $100 \% \pm x$ ), wird – wie im Beispiel oben – das arithmetische Mittel der beiden  $\sigma_{\text{GEB},i}$  gebildet.

Die ermittelten Zahlenwerte von  $\sigma_{\text{GEB}}$  sind für die betrachteten Variationen in Tabelle 27 aufgeführt. Es sind deutliche Unterschiede in den Zahlenwerten zu erkennen. Je kleiner der Zahlenwert von  $\sigma_{\text{GEB}}$ , desto geringer wirkt sich eine Änderungen des zugrundeliegenden Parameters auf den berechneten Gesamtenergiebedarf aus. D.h., für größere Anpassungen von Bedarf und Verbrauch kommen im wesentlichen diejenigen Parameter in betracht, die große  $\sigma_{\text{GEB}}$ -Werte aufweisen. Ebenso ist es für diese Parameter eher wichtig, "möglichst genaue" Werte zu bestimmen. Mit 0,8 bzw. 0,6 liegt die Sensitivität  $\sigma_{\text{GEB}}$  bezüglich der opaken Bauteilflächen hoch. Die Werte für die transluzenten Bauteilflächen liegen mit  $\sigma_{\text{GEB}} = 0,1$  für das Einfamilienhaus und  $\sigma_{\text{GEB}} = 0,2$  bei dem Mehrfamiliengebäude im Bereich der durchgeführten Variationen beide niedrig.

**Tabelle 27:** Mittlere Sensitivität  $\sigma_{\text{GEB}}$  gemäß Gleichung 20 für die betrachteten Variationen.

Parameter	EFH	MFH
Dauer der Nachtabsenkung $t_u$	0,16	0,13
Soll-Rauminnentemperatur $\theta_i$	1,68	1,81
spez. Trinkwarmwasserwärmebedarf	0,05	0,08
Luftwechsel (n und $n_{\text{Absenk}}$ )	0,13	0,23
Heizanlage		
Geräteausstattung	0,79	0,76
Regelbarkeit	0,73	1,23
Wärmedurchgangskoeffizient U		
opake Bauteile	0,68	0,53
Fenster	0,15	0,25
Gesamtenergiedurchlaßgrad g	0,14	0,14
Bauteilfläche $A_k$		
opake Bauteile	0,80	0,60
Fenster	0,10	0,20
Verschattung der Südfassade	0,05	0,07

Um den Einfluß derartiger Fehleinschätzungen oder Anpassungen auf die Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen einstufen zu können, wird für einige wesentliche Parameter der Gesamtenergiebedarf des betrachteten EFH und MFH nach den auf Seite 61 beschriebenen Sanierungsstufen eins und zwei ermittelt und anschließend der Quotient

$$\zeta = \frac{(\text{Bedarf}_{\text{alt}} - \text{Bedarf}_{\text{neu}})_{\text{ist}}}{(\text{Bedarf}_{\text{alt}} - \text{Bedarf}_{\text{neu}})_{\text{soll}}} \quad (22)$$

gebildet. Dabei entsprechen die "Soll"-Werte den geklammerten Werten in Tabelle 19 und die "ist"-Werte den unteren bzw. oberen Werten der betrachteten Variationsbereiche. "Alt" ist jeweils die Ausgangssituation, "neu" das sanierte Gebäude. D.h., es wird die Bedarfsänderung durch die betrachteten

Maßnahmen für den Fall "falscher" Grunddaten auf die Änderung im Falle korrekter Grunddaten bezogen.

Dieser Wert kann mit der relativen Änderung des Bedarfs infolge falscher Grunddaten verglichen werden. Ist dieser Unterschied nennenswert, wirkt sich der betrachtete Fehler in den Grunddaten eher auf die Genauigkeit der für die Sanierung gewonnenen Aussagen aus.

Ein Beispiel: Durch Erhöhung des U-Wertes der opaken Bauteile um pauschal 20 % erhöht sich der Gesamtenergiebedarf um ca. 13 % (Tabelle 22). Die Änderung der Bedarfsreduktion durch die betrachtete Sanierungsmaßnahme S1+S2 (anlagentechnische und bauliche Maßnahmen) gegenüber der Bedarfsreduktion für den Ausgangsfall beträgt knapp 20 % (vgl. Bild 20, dritte Säulengruppe).

Also wirkt sich der Fehler in dem zugrunde gelegten U-Wert bei der durchgeführten Sanierungsbetrachtung – relativ – deutlicher aus, als bei dem errechneten Gesamtenergiebedarf. Aber: Der berechnete Gesamtenergiebedarf unterscheidet sich absolut nur um ca. 19 kWh/(m<sup>2</sup> a), bezogen auf den sanierten Standardfall also um ca. 8 %.

Dies folgt – wie bereits in Abschnitt 2.4.2.6 ausgeführt und die angegebenen U-Werte zeigen – aus der Tatsache, daß der absolute Unterschied des U-Wertes der Bauteile nach der Sanierung sehr gering (ca. 4 - 5 %) ist.

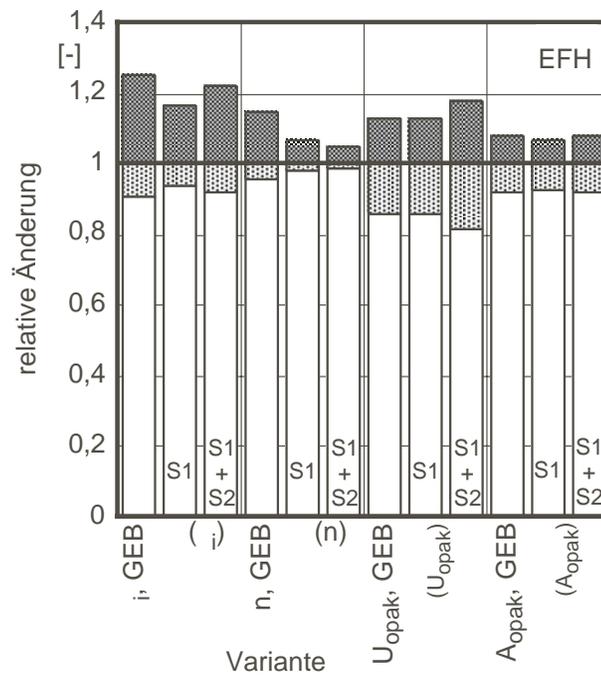
In Bild 20 sind die für das betrachtete Einfamilienhaus mit Gleichung 22 ermittelten  $\zeta$ -Werte dargestellt. Es ist z.B. gut zu erkennen, daß die "Schätzung" des Luftwechsels in dem Wertebereich von 0,5 bis 1,5 h<sup>-1</sup> bei der Betrachtung der Sanierungsvarianten zu sehr geringen Abweichungen in der prognostizierten Bedarfsreduktion führt. D.h., der schwer greifbare Parameter "Luftwechsel" wirkt sich in dem betrachteten Bereich kaum auf die Bewertung von Sanierungsvarianten aus. Der Einfluß der Variation der Fläche opaker Bauteile ist ebenfalls relativ gering und ändert sich bei der Betrachtung der Sanierungsvarianten geringfügig.

Die Änderung der mittleren Raumlufttemperatur zeigt einen deutlichen Einfluß auf den Gesamtenergiebedarf. Dieser Einfluß ist aber bei der Sanierungsbetrachtung nahezu identisch, also werden Sanierungsvarianten in ihrer Bewertung nicht stark verfälscht.

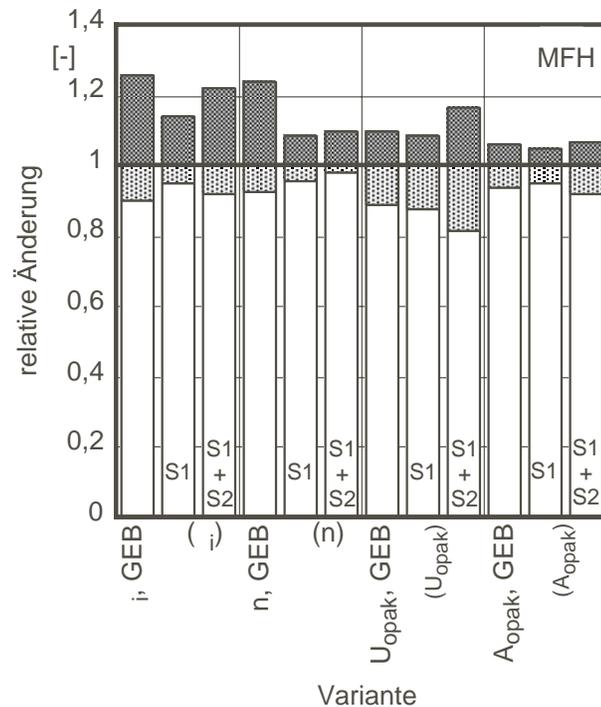
Insgesamt ist das Prognoseverfahren also als unkritisch hinsichtlich der betrachteten Parametervariationen zu betrachten. D.h., auch ungenaue Eingangsdaten führen nicht dazu, daß eine Sanierungsvariante völlig falsch eingeschätzt wird.

Bild 21 gibt die für das betrachtete Mehrfamiliengebäude mit Gleichung 22 ermittelten  $\zeta$ -Werte wieder. Der jeweilige Einfluß der untersuchten Parameter entspricht in den Tendenzen dem bei dem Einfamilienhaus oben beschriebenen. Die Variation des Luftwechsels im Wertebereich 0,5 bis 1,5 h<sup>-1</sup> hat im Ausgangsfall einen etwas größeren Einfluß auf den Gesamtenergiebedarf, wirkt sich aber auch bei dem betrachteten Mehrfamiliengebäude nur in geringem Umfang auf die prognostizierte Bedarfsreduktion aus.

Auch hier gilt die Aussage, daß das Prognoseverfahren als "robust" hinsichtlich der betrachteten Parameter erachtet werden kann.



**Bild 20:** Einfluß verschiedener Parameter auf die Änderung des Gesamtenergiebedarfs bei der Betrachtung von Sanierungsvarianten. Ermittelte Werte für das betrachtete Einfamilienhaus.



**Bild 21:** Einfluß verschiedener Parameter auf die Änderung des Gesamtenergiebedarfs bei der Betrachtung von Sanierungsvarianten. Ermittelte Werte für das betrachtete Mehrfamiliengebäude.

### 4.6.3 Variation von Parameterkombinationen

#### 4.6.3.1 Allgemeines

Die auf Seite 61 genannten Sanierungsschritte werden für die im folgenden beschriebenen Ausgangssituationen bei Einfamilienhaus und Mehrfamiliengebäude betrachtet.

Für das Einfamilienhaus wird zusätzlich zu der beschriebenen Ausgangssituation ein typischer Fehler bei der Modellbildung, die Nicht-Berücksichtigung des Kellerabganges mit allen Bauteilen betrachtet. Dies führt zu einem GEB von 397 kWh/(m<sup>2</sup> a) – entsprechend einer Verringerung von ca. 3 %. Dabei ist die zugrunde gelegte Energiebezugsfläche um 9,6 m<sup>2</sup> (6,5 %), die Gebäudehüllfläche um ca. 35 m<sup>2</sup> (9 %) kleiner als bei dem "korrekten Modell".

Mit oben genannten Einzelansätzen für die Kosten erhält man Gesamtkosten der Maßnahmen

für das betrachtete Einfamilienhaus von:

4 090 € + 3/4\*50 €\*9 + 9\*40 € = 4 770 € für den neuen Kessel und die Thermostatventile (S1) und 104,2\*80 € WDV + 84\*20 € = 10 240 € für das Wärmedämmverbundsystem und die Dämmplatten für die Kellerdecke (S2) bzw.

insgesamt 10 490 € für die betrachtete Variante "o.K." (96\*20 € für Dämmplatten bei der Variante "o.K.")<sup>5</sup>.

und für das betrachtete Mehrfamiliengebäude von:

6 900 € für den neuen Kessel (S1) sowie

635,8\*80 € + 504\*20 € = 62 320 € für Wärmedämmverbundsystem und Dämmplatten (S2).

Für die Berechnung der Amortisationszeiten werden folgende Werte angenommen:

Energiekosten	0,031	€/kWh
Preissteigerung	5	%
Zinssatz	5,2	%

#### 4.6.3.2 Einfamilienhaus

Für das Einfamilienhaus wird zum Vergleich unterschiedlicher Ansätze der Anpassung von Bedarf und Verbrauch die Amortisationszeit der genannten Sanierungsvarianten betrachtet. Zunächst wird jedoch die Sanierung direkt auf der Basis der beiden o.a. Fälle betrachtet, um die Auswirkung der falschen Annahmen hinsichtlich des Verlaufs der thermischen Gebäudehülle bei der Variante "ohne Kellerabgang" auf Amortisationszeiten darzustellen.

Für den "falschen Fall" muß der ermittelte Gesamtenergiebedarf von 397 kWh/(m<sup>2</sup> a) an den zunächst als Verbrauch angenommenen Bedarf des korrekten Modells von 410 kWh/(m<sup>2</sup> a) angepaßt werden. Dies wird auf zwei Arten erreicht. Einmal dadurch, daß die Dauer der Nachtabsenkung auf 5,7 h verkürzt wird, zum anderen durch das Erhöhen der Raumlufttemperatur von 19 auf 19,34 °C (Fälle "A0", A0-1 "o.K." und A0-2 "o.K.").

Auf der Basis des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Ausgangsfalls wird der Gesamtenergiebedarf (410 kWh/(m<sup>2</sup> a)) einmal durch das Verkürzen der Nachtabsenkung auf 5 h, der Änderung der Regelgeräteausrüstung von "normal" zu "mäßig" sowie der Erhöhung des U-Wertes aller opaken Bauteile um 20 % und zum anderen durch das Erhöhen der Raumlufttemperatur von 19 auf 22,23 °C an einen angenommenen Verbrauch von 523 kWh/(m<sup>2</sup> a) angeglichen (Fälle "A1" und "A2").

In gleicher Weise wird auf der Basis der beschriebenen, nicht korrekten Ausgangsvariante "ohne Kellerabgang" (also ohne die entsprechenden Innenbauteile und an das Erdreich grenzenden Bauteile gem. Tabelle 13, unter Annahme einer durchgehenden Kellerdecke) der hierfür berechnete Gesamtenergiebedarf von 397 kWh/(m<sup>2</sup> a) einmal durch die Kombination der Verkürzung der Nachtabsenkung auf 3,2 h, der Änderung der Regelgeräteausrüstung von "normal" zu "mäßig" sowie der Erhöhung des

<sup>5</sup>Hierbei ist angenommen, daß der Energieberater bei seiner Betrachtung auch für die Kosten – und nicht nur für die Wärmebedarfsberechnung – mit durchgehender Kellerdecke rechnet.

U-Wertes aller opaken Bauteile um 20 % und zum anderen durch das Erhöhen der Raumlufthtemperatur von 19 auf 22,67 °C an den angenommenen Verbrauch von wiederum 523 kWh/(m<sup>2</sup> a) angeglichen (Fälle A1 "o.K." und A2 "o.K.").

In Tabelle 28 sind die Ergebnisse der betrachteten Kombinationen von Ausgangsfällen und Sanierungsvarianten zusammengefaßt wiedergegeben. Die ermittelten Amortisationszeiten liegen für Maßnahmepaket 1 – der Erneuerung des Kessels und Verbesserung der Regelgeräteausrüstung – alle deutlich innerhalb der Wirtschaftlichkeit. Infolge der als "falsch" betrachteten Anpassung des Bedarfs an den Verbrauch durch die Erhöhung der mittleren Raumtemperatur erhält man eine um ca. 25 % längere Amortisationszeit, muß die Maßnahme jedoch als wirtschaftlich erachten und nicht als Folgefehler verwerfen. Selbst bei dem betrachteten Fall, daß der Kellerabgang bei der Modellierung "vergessen" wird und der Bedarf durch das Erhöhen der mittleren Raumtemperatur an den Verbrauch angepaßt wird, bleibt die Maßnahme noch gut im Bereich des wirtschaftlichen. Die Amortisationsdauer erhöht sich jedoch schon um ca. 30 %.

Die hinsichtlich Maßnahmepaket 2 – der baulichen Maßnahmen – ermittelten Amortisationszeiten liegen auch für alle betrachteten Ansätze im wirtschaftlichen Bereich. Die Unterschiede infolge der falschen Annahmen liegen bei ca. 10 %.

Zusammenfassend kann für die dargestellten Beispiele die Aussage getroffen werden, daß das rechnerische Modell eines zu sanierenden Gebäudes grundsätzlich sorgfältig erstellt werden soll, daß aber wesentliche Maßnahmen i.d.R. auch bei falschen Annahmen als wirtschaftlich erkannt werden.

**Tabelle 28:** Änderung des Gesamtenergiebedarfs, Kosten der Maßnahmen und Amortisationsdauer gem. Gl. 19 für die betrachteten Beispiele zum EFH.

Fall	Stufe	$\theta_i$ °C	$f_{U_{\text{opak}}}$	$U_{\text{Wände}}$ W/(m <sup>2</sup> K)	$U_{\text{Kellerd.}}$ U/(m <sup>2</sup> K)	$t_u$ h	Rga	Kessel	GEB kWh/(m <sup>2</sup> a)	$\Delta$ GEB	Kosten €	$A_{\text{bez.}}$ m <sup>2</sup>	n Jahre	n* Jahre
A0-0 "o.K."		19	1	1,2	1,1	7	2	Standard	397					
A0-0 "o.K."	S1	19	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	277	121	4.760,00	137,3	9,9	
A0-0 "o.K."	S1+S2	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	190	208	15.270,00	137,3	18,7	
A0		19	1	1,2	1,1	7	2	Standard	410					
A0	S1	19	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	286	124	4.760,00	146,9	9,1	
A0	S1+S2	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	207	203	15.030,00	146,9	17,6	
A0-1 "o.K."		19	1	1,2	1,1	5,7	2	Standard	410					
A0-1 "o.K."	S1	19	1	1,2	1,1	5,7	3	Brennwert	287	123	4.760,00	137,3	9,8	
A0-1 "o.K."	S1+S2	19	1	0,261	0,524	5,7	3	Brennwert	196	214	15.270,00	137,3	18,1	
A0-1 "o.K."	(S1+S2)*	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	190	220				17,6
A0-2 "o.K."		19,34	1	1,2	1,1	7	2	Standard	410					
A0-2 "o.K."	S1	19,34	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	287	123	4.760,00	137,3	9,7	
A0-2 "o.K."	S1+S2	19,34	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	196	214	15.270,00	137,3	18,2	
A0-2 "o.K."	(S1+S2)*	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	190	220				17,6
A1		19	1,2	1,44	1,32	5	1	Standard	523					
A1	S1	19	1,2	1,44	1,32	5	3	Brennwert	345	178	4.760,00	146,9	6,3	
A1	S1+S2	19	1,2	0,271	0,569	5	3	Brennwert	238	285	15.030,00	146,9	12,4	
A1	(S1+S2)*	19	1,2	0,271	0,569	7	3	Brennwert	226	297				11,9
A2		22,23	1	1,2	1,1	7	2	Standard	523					
A2	S1	22,23	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	376	147	4.760,00	146,9	7,6	
A2	S1+S2	22,23	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	271	252	15.030,00	146,9	14,1	
A2	(S1+S2)*	19	1	0,26	0,52	7	3	Brennwert	207	316				11,2
A1 "o.K."		19	1,2	1,44	1,32	3,2	1	Standard	523					
A1 "o.K."	S1	19	1,2	1,44	1,32	3,2	3	Brennwert	347	177	4.760,00	137,3	6,8	
A1 "o.K."	S1+S2	19	1,2	0,271	0,569	3,2	3	Brennwert	221	302	15.270,00	137,3	12,8	
A1 "o.K."	(S1+S2)*	19	1,2	0,27	0,569	7	3	Brennwert	204	320				12,1
A2 "o.K."		22,67	1	1,2	1,1	7	2	Standard	523					
A2 "o.K."	S1	22,67	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	377	147	4.760,00	137,3	8,2	
A2 "o.K."	S1+S2	22,67	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	257	267	15.270,00	137,3	14,5	
A2 "o.K."	(S1+S2)*	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	207	316				12,2

$f_{U_{\text{opak}}}$ : Pauschaler Faktor zur Änderung der U-Werte opaker Bauteile

n\*: Amortisationsdauer der 1. und 2. Sanierungsmaßnahme bei Reduktion von  $q_i$  bzw. Anheben der Heizungsabsenkungsdauer  $t_{\text{ig}}$  auf Standardwerte  $n^*(S1+S2)^*$

### 4.6.3.3 Mehrfamiliengebäude

Für das Mehrfamiliengebäude werden dieselben Ansätze für die Anpassung des errechneten Bedarfs an einen angenommenen Verbrauch verwendet. Wiederum werden die Amortisationszeiten der der Sanierungsvarianten betrachtet. Auch bei dem Mehrfamiliengebäude wird jedoch zunächst die Sanierung direkt auf der Basis des Ausgangsfalles betrachtet.

Ausgehend von dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Ausgangsfall wird der Gesamtenergiebedarf (240 kWh/(m<sup>2</sup> a)) einmal durch das Halbieren der Nachtabsenkungsdauer (damit wird  $t_u = 3,5$  h) sowie der pauschalen Erhöhung des U-Wertes aller opaken Bauteile um 20 % und zum anderen durch das Erhöhen der mittleren Raumlufttemperatur von 19 auf 21,1 °C an einen angenommenen Verbrauch von 283 kWh/(m<sup>2</sup> a) angeglichen (Fälle "A1" und "A2").

Für beide an den angenommenen Verbrauch angepaßten Ausgangssituationen werden wiederum die oben beschriebenen Sanierungsschritte betrachtet.

In Tabelle 29 sind für das betrachtete Mehrfamiliengebäude die Ergebnisse der untersuchten Kombinationen von Ausgangsfällen und Sanierungsvarianten zusammengefaßt wiedergegeben. Es ist leicht ersichtlich, daß die unterschiedlichen Varianten hinsichtlich der Amortisationsdauer der 1. Maßnahme, dem erneuern des Kessels, keinen nennenswerten absoluten Einfluß haben. Die ermittelten Amortisationszeiten unterscheiden sich zwar um 15 - 20 %, liegen aber durchweg so niedrig, daß die Maßnahme als wirtschaftlich erachtet werden kann.

Für die kombinierte Maßnahme S1+S2 liegen die Amortisationszeiten insgesamt wieder höher. Dies ist bei einer Maßnahme an der Bausubstanz aber durchaus vertretbar. Die Unterschiede infolge der unterschiedlichen Ausgangssituationen vor der betrachteten Sanierung sind vernachlässigbar gering.

### 4.6.3.4 Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Aufnahme der Daten zu einem Gebäude für die Vor-Ort-Energieberatung zwar sorgfältig durchgeführt werden muß, daß aber wesentliche Maßnahmen zur energetischen Verbesserung des Gebäudes auch bei einem relativ ungenauen rechnerischen Modell als wirtschaftlich ausgewiesen werden.

Bei den Ausgangsfällen "1" kann vor der Erneuerung der Anlagentechnik und vor baulichen Maßnahmen untersucht werden, ob die nächtliche Verringerung der Heizleistung (NA) nicht umfänglicher gestaltet werden kann.

Für die Ausgangsfälle "2" ist zunächst nicht berücksichtigt, daß eine Beratung hinsichtlich mittlerer Raumtemperaturen bereits eine deutliche Verringerung des GEB bringen könnte. Verbindet man die untersuchte Maßnahme mit einer Änderung des bei der Anpassung von Bedarf und "Verbrauch" angenommenen Nutzerverhaltens, verringert sich der GEB selbstverständlich ebenfalls weiter.

Nach Umsetzung **beider** betrachteter Sanierungsvarianten ist es in jedem Fall sinnvoll, die Dauer der Nachtabsenkung an die neuen baulichen Gegebenheiten anzupassen. Dies ist bei o.a. Ergebnisdiskussion nicht berücksichtigt, jedoch enthalten die Spalten "n\*" in den Tabellen 28 und 29 die bei Rückführung bzw. Umstellung der mittleren Raumtemperatur sowie der Dauer der Nachtabsenkung auf Standardwerte die errechneten Amortisationszeiten für die kombinierte Maßnahme S1+S2. Es ist leicht ersichtlich, daß dadurch die zweite Maßnahme bzw. die Kombination der betrachteten Maßnahmen an Attraktivität – insbesondere bei der Reduktion der mittleren Lufttemperatur in dem Mehrfamiliengebäude – gewinnt.

**Tabelle 29:** Änderung des Gesamtenergiebedarfs, Kosten der Maßnahmen und Amortisationsdauer gem. Gl. 19 für die betrachteten Beispiele zum MFH.

Fall	Stufe	$\theta_i$ °C	$f_{U_{\text{opak}}}$	$U_{\text{Wände}}$ W/(m <sup>2</sup> K)	$U_{\text{Kellerd.}}$ U (m <sup>2</sup> K)	$t_u$ h	Rga	Kessel	GEB kWh/(m <sup>2</sup> a)	$\Delta$ GEB	Kosten €	$A_{\text{Bez.}}$ m <sup>2</sup>	n Jahre	n* Jahre
A0		19	1	1,2	1,1	7	1	Standard	240					
A0	S1	19	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	183	57	6.900,00	1329,9	3	
A0	S1+S2	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	132	108	69.200,00	1329,9	17	
A1		19	1,2	1,44	1,32	3,5	1	Standard	283					
A1	S1	19	1,2	1,44	1,32	3,5	3	Brennwert	219	64	6.900,00	1329,9	3	
A1	S1+S2	19	1,2	0,271	0,569	3,5	3	Brennwert	148	135	69.200,00	1329,9	13	
	(S1+S2)*	19	1,2	0,271	0,569	7	3	Brennwert	138	145				12
A2		21,1	1	1,2	1,1	7	1	Standard	283					
A2	S1	21,1	1	1,2	1,1	7	3	Brennwert	220	63	6.900,00	1329,9	3	
A2	S1+S2	21,1	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	158	125	69.200,00	1329,9	14	
	(S1+S2)*	19	1	0,261	0,524	7	3	Brennwert	132	151				12

$f_{U_{\text{opak}}}$ : Pauschaler Faktor zur Änderung der U-Werte opaker Bauteile

n\*: Amortisationsdauer der 2. Sanierungsmaßnahme bei Reduktion von  $\theta_i$  bzw. Anheben der Heizungsabsenkungsdauer  $t_u$  auf Standardwerte  $n^*(S1+S2)^{**}$

## 5 Zusammenfassung

### 5.1 Allgemeines

Bundesweit sind 24 Mio. Altbauwohnungen, davon 18 Mio. in den alten und 6 Mio. in den neuen Bundesländern, aus energetischer Sicht in einem schlechten Zustand. Dies entspricht ca. 75% des gesamten Bestandes. Zu den "Energieverschwendern" zählen vor allem Gebäude, die vor Inkrafttreten der zweiten Wärmeschutzverordnung aus dem Jahr 1982 errichtet und nachträglich nicht oder unzureichend energetisch saniert wurden. Ihr jährlicher Heizwärmebedarf liegt durchschnittlich zwischen 150 bis 200 kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche.

Die Bundesregierung hat, um die energetische Verbesserung von Gebäuden im Bestand anzukurbeln, ein Programm zur Förderung der Beratung zur sparsamen und rationellen Energieverwendung in Wohngebäuden vor Ort – die "Vor-Ort-Beratung" – aufgelegt. Hierbei wird die ingenieurmässige Unterstützung der Hauseigentümer bei der Erkennung von energetischen Schwachpunkten ihrer Gebäude gefördert. Dem Hauseigentümer soll Hilfestellung bei der heizenergie-reduzierenden Sanierung – mit der entsprechenden Verringerung der heizungsbedingten CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Belastung der Atmosphäre – gegeben werden. Die Beratung wird von einem besonders qualifizierten Ingenieur vorgenommen, der berechtigt ist, die entsprechenden Förderanträge beim Bundesamt für Wirtschaft und Technologie zu stellen.

Voraussetzungen der Förderung sind dabei u.a.

1. die Baugenehmigung des Gebäudes muss vor dem 01.01.1984 in den alten und vor dem 01.01.1989 in den neuen Bundesländern erteilt worden sein,
2. die Gebäudehülle darf nicht aufgrund späterer Baugenehmigungen zu mehr als 50 % verändert worden sein und
3. mehr als die Hälfte des Gebäudes muss ständig zu Wohnzwecken genutzt werden.

Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es, Hilfestellungen zur Beurteilung baulicher Aspekte im Rahmen der Vor-Ort-Beratung zu geben. Hierbei werden u.a. die folgenden Fragen erörtert.

- Wie können die wärmeschutztechnischen Kennwerte von Materialien (Wärmeleitfähigkeiten) bzw. Konstruktionen (Wärmedurchgangskoeffizienten) vor Ort bestimmt werden?
- Welche zerstörungsfreie Methoden sind hierfür prinzipiell geeignet?
- Welche Methoden sind einfach handhabbar und führen zu ausreichender Genauigkeit bei der energetischen Bewertung von Gebäuden?
- Wie und mit welcher Genauigkeit sind die geometrischen Größen "wärmeübertragende Hüllfläche" und "beheiztes Gebäudevolumen" zu ermitteln?
- Welchen Einfluß haben Fehler in den Eingangsgrößen auf die Einschätzung von energetischen Verbesserungsmaßnahmen am Gebäude?

Der Vor-Ort-Berater gibt dem Hauseigentümer Ratschläge für Massnahmen zur energetischen Verbesserung des Gebäudes. Entscheidet sich der Hausbesitzer für Massnahmen an bestimmten Bauteilen, muss er sich künftig an die grundlegenden Regelungen gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) halten.

### 5.2 Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die künftige Energieeinsparverordnung (EnEV) verlangt die Durchführung verschiedener Massnahmen zur energetischen Verbesserung von Gebäuden im Bestand. Diese sind im wesentlichen die folgenden (§ 9, Stand 7.3.2001):

1. Eigentümer von Gebäuden müssen Heizkessel, die mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen beschickt werden und vor dem 1. Oktober 1978 eingebaut oder aufgestellt worden sind, bis zum 31. Dezember 2005 außer Betrieb nehmen. Heizkessel nach Satz 1, deren Brenner nach dem 1. November 1996 erneuert worden sind, müssen bis zum 31. Dezember 2008 außer Betrieb genommen werden. Die Sätze 1 und 2 sind nicht anzuwenden, wenn die vorhandenen Heizkessel

Niedertemperatur-Heizkessel oder Brennwertkessel sind, sowie auf heizungstechnische Anlagen, deren Nennleistung weniger als 4 Kilowatt oder mehr als 400 Kilowatt beträgt, und auf Heizkessel nach § 11<sup>6</sup> Abs. 3 Nr. 2 bis 4.

2. Eigentümer von Gebäuden müssen bei heizungstechnischen Anlagen ungedämmte, zugängliche Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen, die sich nicht in beheizten Räumen befinden, bis zum 31. Dezember 2005 nach Anhang 5<sup>7</sup> zur Begrenzung der Wärmeabgabe dämmen.
3. Eigentümer von Gebäuden mit normalen Innentemperaturen müssen ungedämmte, nicht begehbare aber zugängliche oberste Geschossdecken beheizter Räume bis zum 31. Dezember 2005 so dämmen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Geschossdecke  $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  nicht überschreitet.
4. Bei Wohngebäuden mit nicht mehr als zwei Wohnungen, von denen zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser Verordnung eine der Eigentümer selbst bewohnt, sind die Anforderungen nach den Absätzen 1 bis 3 nur im Falle eines Eigentümerwechsels zu erfüllen. Die Frist beträgt zwei Jahre ab dem Eigentumsübergang; sie läuft jedoch nicht vor dem 31. Dezember 2005, in den Fällen des Absatzes 1 Satz 2 nicht vor dem 31. Dezember 2008, ab.

Darüber hinaus werden bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen einzuhaltende U-Werte angegeben. In Tabelle 30 sind die im Entwurf vom 7.03.2001 genannten Zahlenwerte zusammengefaßt. Von diesen einzuhaltenden Werten kann dann nach oben abgewichen werden, wenn durch die detaillierte Bilanz der Nachweis erbracht wird, daß der Primärenergiebedarf des sanierten Gebäudes die Anforderungen an einen Neubau um nicht mehr als 40 % übersteigt.

### 5.3 Erforderliche bauliche Gebäudedaten

Folgende Daten baulicher Aspekte sind gemäß Richtlinien für ein Gebäude aufzunehmen:

- Grunddaten
  - Ort, Haustyp, Baujahr
  - Zahl der Wohneinheiten,
  - beheizbare Wohnflächen
  - wesentliche Investitionen für wärmetechnische Massnahmen
- Daten für die wärmeschutztechnische Einstufung der Gebäudehülle
  - Außenwand-, Dach-, Fensterflächen
  - Decken unter nicht ausgebauten Dachgeschossen
  - Kellerdecken
  - Außenflächen beheizter Dach- und Kellerräume
  - Innenwandflächen zu nicht beheizten Gebäudebereichen
  - offensichtliche Wärmebrücken
- Gebäudevolumen, Lüftungswärmebedarf

Über diese Vorgaben aus den Richtlinien zur Vor-Ort-Energieberatung hinaus sollten auch Angaben zum Nutzerverhalten (ein Nutzerprofil) angegeben werden. Dies umfasst Angaben zu üblichen Raumlufttemperaturen, Lüftungsgewohnheiten und ggf. Angaben zu den tatsächlich genutzten (beheizten) Flächen, wenn diese signifikant von der aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen ermittelten Energiebezugsfläche abweichen.

Die wärmeübertragende Hüllfläche setzt sich aus der Summe aller wärmeübertragenden Einzelflächen eines Gebäudes zusammen. Sie bildet die Grundlage zur Berechnung des Jahres-Transmissionswärmebedarfs. Folgende Kriterien können die Ermittlung der Flächen und insbesondere die Zuordnung einzelner Bauteile zu entsprechenden Kategorien des Rechenverfahrens unterstützen.

<sup>6</sup>§ 11, "Inbetriebnahme von Heizkesseln", enthält Regelungen für die Aufstellung und Inbetriebnahme von Heizkesseln

<sup>7</sup>Anhang 5, "Anforderungen zur Begrenzung der Wärmeabgabe von Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen", enthält Angaben zu Mindestdicken der Dämmschicht von Leitungen

**Tabelle 30:** Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen (Anhang 3, Tabelle 1, EnEV, 7.3.2001)

Zeile	Bauteil	Maßnahme nach	Gebäude nach	Gebäude nach
			§ 1 Abs.1 Nr. 1	§ 1 Abs. 1 Nr. 2
			max. Wärmedurchgangskoeffizient $U_{max}^{1)}$ in $W/(m^2 K)$	
	1	2	3	4
1 a)	Außenwände	allgemein	0,45	0,75
b)		Nr. 1 b), d) und e)	0,35	0,75
2 a)	Außenliegende Fenster, Fenstertüren, Dachflächenfenster	Nr. 2 a) und b)	1,7 <sup>2)</sup>	2,8 <sup>4)</sup>
b)	Verglasungen	Nr. 2 c)	1,5 <sup>3)</sup>	keine Anforderungen
c)	Vorhangfassaden	allgemein	1,9 <sup>4)</sup>	3,0 <sup>4)</sup>
3 a)	Außenliegende Fenster, Fenstertüren, Dachflächenfenster mit Sonderverglasungen	Nr. 2 a) und b)	2,0 <sup>2)</sup>	2,8 <sup>2)</sup>
b)	Sonderverglasungen	Nr. 2 c)	1,6 <sup>3)</sup>	keine Anforderungen
c)	Vorhangfassaden mit Sonderverglasungen	Nr. 6 Satz 2	2,3 <sup>4)</sup>	3,0 <sup>4)</sup>
4 a)	Decken, Dächer und Dachschrägen	Nr. 4.1	0,30	0,40
b)	Dächer	Nr. 4.2	0,25	0,40
5 a)	Decken und Wände gegen unbeheizte	Nr. 5 b) und e)	0,40	keine Anforderungen
b)	Räume oder Erdreich	Nr. 5 a), c), d) und f)	0,50	keine Anforderungen

§ 1 Abs.1 Satz 1: Wohngebäude

§ 1 Abs.1 Satz 2: Büro- und Verwaltungsgebäude (für Vor-Ort-Beratung nicht relevant)

1) Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils unter Berücksichtigung der neuen und der vorhandenen Bauteilschichten; für die Berechnung opaker Bauteile ist DIN EN ISO 6946:1996-11 zu verwenden.

2) Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters; er ist technischen Produkt-Spezifikationen zu entnehmen oder nach DIN EN ISO 10077-1:2000-11 zu ermitteln.

3) Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung; er ist technischen Produkt-Spezifikationen zu entnehmen oder nach DIN EN 673:1999-1 zu ermitteln.

4) Wärmedurchgangskoeffizient der Vorhangfassade; er ist nach anerkannten Regeln der Technik zu ermitteln.

Außenwand	Die Fläche der an die Aussenluft grenzenden Wände ohne Fenster und Türen. Die Flächen werden mit Gebäudeaussenmaßen ermittelt. Gerechnet wird ab Oberkante des Geländes oder, falls die unterste Decke über der Oberkante des Geländes liegt, von der Oberkante dieser Decke bis zur Oberkante der obersten Decke oder der Oberkante der wirksamen Dämmschicht. Deckenflächen, die das Gebäude nach unten gegen die Aussenluft abgrenzen, z.B. Decken über Kfz-Abstellplätzen (Carport) oder Fahrzeugdurchfahrten (inneren Wärmeübergangskoeffizienten beachten).
Dach	die nach aussen abgrenzende wärme gedämmte Dach- oder Dachdeckenfläche. Die Dachflächen bilden den oberen Abschluss der Gebäudehülle. Hierzu zählen auch Dachschrägen und Decken.
Oberste Geschossdecke	Decken zum nicht ausgebauten Dachraum. Dabei sind die Dachschräge – der Teil des Daches im ausgebauten Dachgeschoss, der an die Aussenluft grenzt – und die Dachgeschossdecke – die an den ungeheizten Spitzboden angrenzende obere Geschossdecke – mit unterschiedlichen Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen.
Abseitenwand	Im ausgebauten Dachgeschoss die Fläche der Abseitenwände zum nicht wärme gedämmten Dachraum.
Fenster	Die Fläche der Fenster, Fenstertüren, Türen und Dachfenster, soweit sie beheizte Räume nach aussen abgrenzen. Sie wird aus den lichten Rohbaumaßen ermittelt.
Unterer Gebäudeabschluss	Die Grundflächen des Gebäudes. Gerechnet wird die Bodenfläche auf dem Erdreich oder bei unbeheizten Kellern die Kellerdecke. Dabei sind jedoch jeweils unterschiedliche Abminderungsfaktoren anzusetzen. Wände beheizter Bereiche, die an das Erdreich grenzen.
Wände und Decken zu unbeh. Räumen	Innenwände, sofern sie an Räume mit niedrigen Innentemperaturen grenzen. Räume mit niedrigen Innentemperaturen können beispielsweise unbeheizte Treppenhäuser oder Kellerräume sein.

Das beheizte Gebäudevolumen erstreckt sich über alle beheizten Räume eines Gebäudes. Diese Räume werden von der wärmeübertragenden Hüllfläche eingeschlossen. In der Regel sind bei der Verwendung pauschaler Temperaturreduktionsfaktoren übliche Treppenhäuser von Mehrfamiliengebäuden als beheizt anzusetzen. Dies gilt auch dann, wenn keine Heizkörper im Treppenhaus vorhanden sind. Ausnahmen bilden hierbei Treppenhäuser, die nicht weitgehend in den Baukörper integriert sind (Standardfall) sondern deutlich auskragen.

Bei der Festlegung der internen Wärmegewinne kann angenommen werden, daß die Zunahme der Zahl der Geräte gegenüber früher in etwa durch die Abnahme der spezifischen Leistung der moderneren Einzelgeräte aufgehoben wird, d.h. die internen Wärmegewinne insgesamt weitgehend gleich geblieben sind und die Werte aus DIN 4108-6 für den Gebäudebestand übernommen werden können.

Die detaillierte Bestimmung von Wärmebrücken ist im Rahmen einer Vor-Ort-Energieberatung zeitlich zu aufwendig. Wärmebrücken sollten daher im Rahmen der Vor-Ort-Beratung mit einem  $\Delta U_{WB}$ -Wert berücksichtigt werden. Der Wert  $\Delta U_{WB} = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  kann dabei angesetzt werden.

Ausgehend von der Datenaufnahme wird die Energiebilanz für das Gebäude mit einem Rechenverfahren erstellt. Die Ermittlung des Heizwärmebedarfs soll dabei solare Energiegewinne berücksichtigen und auch differenzierte, auf Teilflächen der Gebäudehülle bezogene Maßnahmen ermöglichen. Die Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs stützt sich auf DIN 4108-6. Ein entsprechendes Rechenprogramm ist für die Durchführung der Beratung mit den abverlangten Variantenrechnungen notwendig.

## 5.4 Datenermittlung

Der sehr enge Kostenrahmen für die Beratungsleistung, der bei der Vor-Ort-Energieberatung gegeben ist, erfordert eine zielgerichtete Vorgehensweise bei der notwendigen Begehung eines betrachteten Objektes. Dabei sind je eine **Checkliste** für die Datenaufnahme der baulichen und anlagentechnischen Gegebenheiten, ein Photoapparat sowie eine Taschenlampe sehr nützliche Hilfsmittel. Der Eigentümer/Hausverwalter/Nutzer sollte vor einem Ortstermin detailliert darüber informiert werden, welche Unterlagen und Daten notwendigerweise vorliegen müssen.

Die Praxis zeigt, dass in der Regel beim Eigentümer/Hausverwalter/Nutzer **Bauzeichnungen** des Gebäudes vorhanden sind. Ist dies der Fall, hat der Vor-Ort-Berater eine gute Basis für die Gebäudeaufnahme.

Allerdings sollten in jedem Fall stichprobenartig die in den Bauzeichnungen enthaltenen Maßangaben mit dem gebauten Objekt verglichen werden. Ebenso ist eine Überprüfung des Raumprogramms – z.B. beheizte / unbeheizte Räume – empfehlenswert.

Sollten diese Planungsunterlagen nicht mehr verfügbar sein, kann man evtl. aus Archiven des zuständigen Bauamtes Zeichnungen erhalten. Hier ist im Einzelfall zu prüfen, ob eine derartige Recherche hinsichtlich des Zeitbedarfs sinnvoll ist.

Sind keine Zeichnungen verfügbar, müssen alle wesentlichen Maße und Bauteilflächen neu ermittelt werden. Die Aufnahme bzw. Überprüfung von Gebäudemaßen kann mittels eines **Laser-Entfernungsmeßgerätes** mit etwas Übung innerhalb kürzester Zeit erfolgen. Durch Funktionen wie "Addieren", "Subtrahieren", "Multiplizieren" und "Teilen" lassen sich auch zusammengesetzte Maße schnell und direkt ermitteln. Mit einem sichtbaren roten Laserpunkt wird der Messort angezielt. Durch einen Knopfdruck wird die Streckenlänge zwischen dem Laser-Entfernungsmessgerät und dem Punkt in Sekundenbruchteilen gemessen und digital angezeigt. Der Messbereich handelsüblicher Geräte liegt zwischen 0,30 m bis ca. 100 m. Zum Messen ist im Allgemeinen kein Helfer nötig. Die relativ geringen Anschaffungskosten in Verbindung mit den umfangreichen Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung machen ein Laser-Entfernungsmessgerät für den Berater empfehlenswert.

Ein sehr modernes Verfahren zur Flächenermittlung ist die **Photogrammetrie**. Es handelt sich hierbei um eine computerunterstützte Bildverzerrung bzw. Modellbildung, bei der aus Photoaufnahmen eines Gebäudes ein maßstäbliches, entzerrtes Bild bzw. ein dreidimensionales Gittermodell entsteht. Der zusätzliche Einsatz eines Laser-Entfernungsmessgerätes zur Ermittlung der notwendigen Grundmaße bzw. um charakteristische Punkte einmessen zu können, ist sehr empfehlenswert. Die (2-d) Photogrammetrie ist für die Vor-Ort-Beratung nur bedingt als Instrument zur Flächenermittlung geeignet. Der hohe technische Aufwand sowie der Bearbeitungsaufwand steht hier meist nicht in Relation zum gelieferten Ergebnis. Die 3-d Photogrammetrie kann als vielversprechend betrachtet werden, ist derzeit aber ebenfalls in der Anwendung noch zu aufwendig, um in der Vor-Ort-Energieberatung als Standardwerkzeug zum Einsatz kommen zu können. Nach einer entsprechenden Weiterentwicklung dieses Werkzeugs kann die Verwendung bei größeren Objekten wirtschaftlich werden.

Bei älteren Gebäuden liegen Informationen über verwendete Materialien häufig nur unvollständig vor. Die notwendige Ermittlung **wärmetechnischer Kenndaten** der Baumaterialien kann anhand verschiedener Methoden erfolgen. Die aufmerksame Bestimmung der Baustoffe und örtlicher Besonderheiten ist Grundlage der wärmetechnischen Beurteilung der vorhandenen Konstruktion. Zahlreiche der früher verwendeten Baustoffe haben aufgrund ihrer Eigenschaften an Bedeutung verloren oder sind ganz vom Markt verdrängt worden. Sie sind daher nicht oder nur noch implizit in DIN 4108-4 enthalten.

Im Rahmen einer Vor-Ort-Energieberatung eignet sich für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit messtechnisch insbesondere die **Bestimmung der Rohdichte** verwendeter Materialien. Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt dabei mit ausreichender Genauigkeit durch einfaches Wägen sowie einer Volumenbestimmung durch "Verdrängungsmessung". Es ist darauf zu achten, dass die Bestimmung der Rohdichte von Mauersteinen mit Hohlkammern unter Berücksichtigung des Volumens der Hohlkammern erfolgt. Für feste Materialien eignet sich hierfür z.B. das Einschweissen der Materialprobe mit Hilfe eines haushaltsüblichen "Gefrierbeutel-Vakuumgerätes" oder die Umwicklung mit einem einfachen, breiten Klebeband. Anschließend kann über die Bestimmung des Verdrängungsvolumens sowie der Masse der Probe die Rohdichte ermittelt werden. Stehen nur Probenbruchstücke zur Verfügung, muss der Hohlkammeranteil der Mauersteine entsprechend geschätzt und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Bei Kenntnis der **Stoffklasse** kann aus Literaturangaben und alten Normen die Wärmeleitfähigkeit hinreichend genau ermittelt werden. In älterer Literatur ist der Begriff der Wärmeleitfähigkeit für die heute übliche Bezeichnung Wärmeleitfähigkeit gebräuchlich. Außerdem ist bei der Entnahme von Zahlenwerten bei älterer Literatur auf die Einheit der angegebenen Zahlenwerte zu achten.

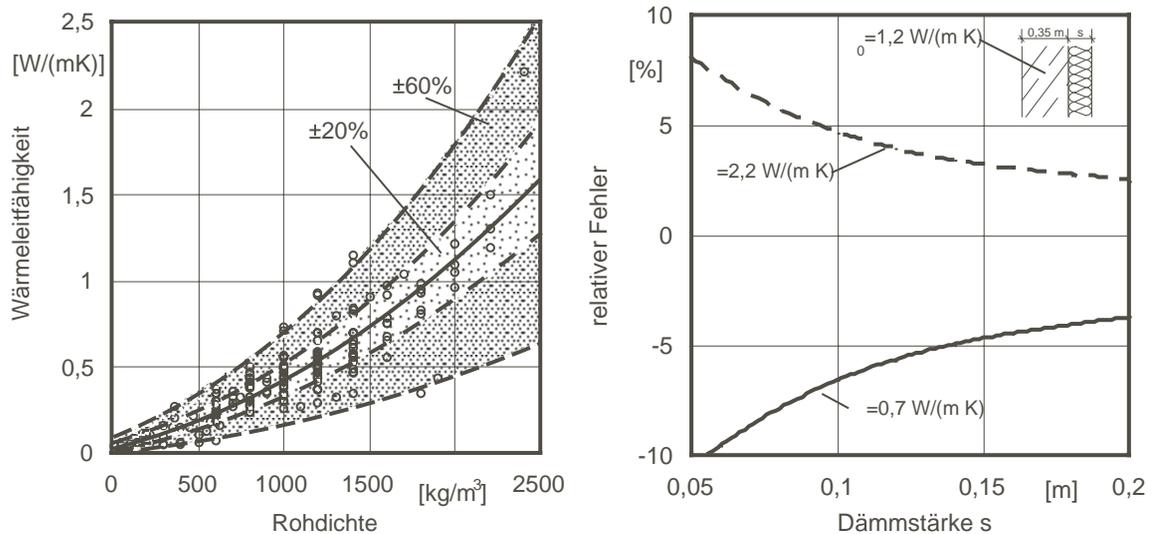
Es gilt:  $1 \text{ kcal/h} = 1,163 \text{ W}$

Im Zweifelsfall sollte bei der Rohdichte und / oder der Stoffklasse grundsätzlich die zu einer größeren Rohdichte gehörende Wärmeleitfähigkeit bzw. eine Stoffklasse mit höherer Wärmeleitfähigkeit zur Berechnung des U-Wertes auf der "sicheren Seite" herangezogen werden. Damit ist weitgehend sichergestellt, dass der bei einer Sanierung angestrebte U-Wert nicht überschritten wird.

Die häufig für den Zweck der U-Wert-Ermittlung beworbene Methode, mit Hilfe von Infrarot-Temperaturmeßgeräten die Oberflächentemperaturen zu bestimmen und aus diesen Daten den U-Wert zu berechnen, führt – im wesentlichen infolge der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen – zu Ergebnissen mit geringer Genauigkeit, sofern nicht strenge Anforderungen hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Umgebungstemperatur im Vorfeld der Messung eingehalten werden können. Es ist insgesamt von dieser Methode abzuraten.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gem. DIN EN 12494 berücksichtigt die genannte Problematik durch die Vorgabe langer Meßperioden. Diese Vorgehensweise ist jedoch für den Einsatz im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung zu aufwendig.

Soll ein Bauteil nachträglich in nennenswertem Umfang gedämmt werden, ist die genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bzw. des U-Wertes im Ausgangsfall nicht entscheidend. Nach einer entsprechenden Dämmmaßnahme dominiert der Wärmedurchgangswiderstand der Dämmschicht das gesamte Bauteil. In Bild 22 (rechts) ist ein Beispiel gegeben, wie sich die Fehleinschätzung eines Bauteils im Ausgangszustand auf die Beurteilung des Bauteils nach der Dämmmaßnahme in Abhängigkeit von der gewählten Dämmstärke auswirkt.



**Bild 22:** Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit von der Rohdichte des Materials (links). Reduktion des Fehlers bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines zu sanierenden Bauteils in Abhängigkeit von der aufgetragenen Dämmstoffstärke (rechts)

## 5.5 Rechengang und Auswertung

Eine Vor-Ort-Energieberatung beinhaltet mindestens drei Vorschläge zu energetischen Sanierungsmöglichkeiten inklusive einer Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der entsprechenden Maßnahmen sowie deren  $\text{CO}_2$ -Einsparpotential.

Um bei der Bewertung von Maßnahmen eine möglichst gute Beschreibung des sanierten Gebäudes zu bekommen sowie als Kontrollmaßnahme sollte die Beschreibung des Ist-Zustands an Verbrauchswerten abgeglichen werden. Diese Anpassung des errechneten Bedarfs an den mittleren Verbrauch der Vorjahre kann anhand folgender Parameter durchgeführt werden.

- Raumtemperatur
- Ausstattung und Regelbarkeit der Heizungsanlage
- U-Werte (insbesondere bei Konstruktionen, die nicht detailliert ermittelt werden können)
- beheizter Bereich und Bauteilflächen
- Dauer der Nachtabsenkung
- Luftwechsel

Das Monatsbilanzverfahren nach DIN 4108-6 benötigt zur Beschreibung des Außenklimas Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur sowie orientierungsabhängige monatliche Strahlungsintensitäten. Mittlere Außenlufttemperaturen und Strahlungsdaten sind für 15 Referenzregionen sowie für ein "deutsches

Referenzklima" in DIN 4108-6 gegeben. Weiterhin sind mittlere Außenlufttemperaturen für 39 Referenzorte in den Referenzregionen enthalten. In aller Regel wird der Vor-Ort-Energieberater keine genaueren klimatischen Daten für den Standort eines Objektes haben. Daher ist der Parameter "Standort" bzw. sind die Klimadaten i.d.R. nicht für die Anpassung des Bedarfs an den Verbrauch geeignet.

Selbstverständlich muß diese Anpassung von Bedarf und Verbrauch auf entsprechenden Angaben der Nutzer des betrachteten Gebäudes beruhen, da einige der genannten "Stellschrauben" direkt dem Nutzereinfluß unterliegen.

Die Berechnung der zu jeder angedachten Sanierungsmaßnahme zu bestimmenden Amortisationsdauer beruht auf den angenommenen Kosten der Maßnahme, der Energieeinsparung durch die Maßnahme, den Energiekosten, der Energiepreissteigerung sowie einem Zinssatz für ein Darlehen. Die Energiekosten sowie die Energiepreissteigerung sind dabei wichtige Parameter; je höher die Energiekosten und je größer die Energiepreissteigerung ist, desto geringer wird die Amortisationsdauer, d.h. desto wirtschaftlicher wird eine gegebene Maßnahme.

Insgesamt ist das Berechnungs- und Prognoseverfahren nach DIN 4108-6 als unkritisch zu betrachten. D.h., auch ungenaue Eingangsdaten führen nicht dazu, daß eine Sanierungsvariante völlig falsch eingeschätzt wird.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Aufnahme der Daten zu einem Gebäude für die Vor-Ort-Energieberatung zwar sorgfältig durchzuführen ist, daß aber wesentliche Maßnahmen zur energetischen Verbesserung des Gebäudes auch bei einem relativ ungenauen rechnerischen Modell als wirtschaftlich ausgewiesen werden.

**Tabelle 31:** Bewertung des Instrumentariums für die Vor-Ort-Energieberatung.

Vorgang	Verfahren	Einst. <sup>1)</sup>	Bewertung für den Einsatz im Rahmen der Vor-Ort-Beratung
Aufmaß	Zollstock und Bandmaß	+	Für die Aufnahme von Einzelmaßen akzeptabel, Geräte i.d.R. vorhanden
	Laser-Entfernungsmessgerät	++	Schnell, einfach und Genau, auch für die Aufnahme von vielen Maßen geeignet. Sehr empfehlenswert, Anschaffungskosten ca. 50 € - 510 €
	Photogrammetrie (2d- u. 3d-)	-	Aufwendig, (noch) nicht zu empfehlen
	Bauunterlagen in Verbindung mit Literatur zu Dichte, Stoffklasse und Wärmeleitfähigkeit	o	Anzuwenden, wenn keine ausreichenden Informationen zum betrachteten Objekt vorliegen
	Rohdichte über einfache Massen- und Volumenbestimmung in Verbindung mit Literatur zu Dichte, Stoffklasse und Wärmeleitfähigkeit	o	Einfachste messtechnische Möglichkeit, im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung hinsichtlich des Aufwands einsetzbar
	Oberflächen- und Lufttemperatur- bzw. Wärmestrommessung	--	Einfach aber sehr ungenau, nicht empfehlenswert
	EN 12494	++	Zeitlich und Messtechnisch sehr Aufwendig, im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung nicht möglich
	Gebäudetypen	-	Mit entsprechender Software einfach und schnell, eher wenig genau, bei fehlender Aufgliederung von Flächen und Bauteilen durch Richtlinien ausgeschlossen
	DIN 4108-6	++	Programm notwendig, in Umfang und Detaillierungsgrad für Vor-Ort-Energieberatung erforderlich
	Auswertung	Amortisationsrechnung	o
CO <sub>2</sub> - / NO <sub>x</sub> -Reduktion		++	Genauigkeit wie Rechenverfahren, von Richtlinien gefordert

© A. Geißler, März 2001

<sup>1)</sup> Einstufung der Genauigkeit bezogen auf die Anforderungen im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung, ++ völlig ausreichend, + ausreichend, o nicht angebar, - nicht ausreichend, -- völlig unzureichend bzw. ungeeignet

## Literatur

- [1] Hauser, G., Höttges, K., Otto, F. und Stiegel, H. *Energieeinsparung im Gebäudebestand – Bauliche und anlagentechnische Lösungen*, 3. Auflage Ed. Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung (GRE), Am Kaiserdamm 80, 14057 Berlin (Charlottenburg), Januar 1999.
- [2] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung EnEV). *Referentenentwurf, Bonn, 29. November 2000, Bundesministerium für Wirtschaft und Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.*
- [3] DIN EN 832. *„Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude“*, Dezember 1998.
- [4] DIN V 4108 *„Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“*. Teil 6 *„Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“* (Entwurf), November 2000.
- [5] DIN 4701 *„Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen“*. Teil 10 *„Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung“* (Entwurf), Januar 2000.
- [6] Hauser, G. und Hausladen, G. *Energiekennzahl zur Beschreibung des Heizenergiebedarfs von Wohngebäuden*. Energiepaß–Service Hauser und Hausladen GmbH, Baunatal 1991.
- [7] DIN EN ISO 13789. *„Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissionswärmeverlustkoeffizient – Berechnungsverfahren“*, Oktober 1999.
- [8] DIN EN ISO 6946. *„Bauteile – Wärmedurchlaßwiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren“*, November 1996.
- [9] Mainka, G. und Paschen, H. *Wärmebrückenatlas*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1986.
- [10] Heindl, Krec, Panzhauser und Sigmund. *Wärmebrücken*. Springer Verlag, Wien, 1987.
- [11] Hauser, G. und Stiegel, H. *Wärmebrücken-Atlas für den Holzbau*. Bauverlag, Wiesbaden, 1992.
- [12] Hauser, G. und Stiegel, H. *Wärmebrücken-Atlas für den Mauerwerksbau*, 2. durchgesehene Auflage Ed. Bauverlag, Wiesbaden 1990, 1993.
- [13] Hauser, G., Schulze, H. und Stiegel, H. *Wärmetechnische Optimierung von Anschlußdetails bei Niedrigenergiehäusern und Erarbeitung von Standardlösungen*. Techn. ber., IRB-Verlag Stuttgart, Dezember 1996.
- [14] Hauser, G. und Stiegel, H. *Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken*. In *Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor*, Bd. 31 von *Bauforschung für die Praxis*. IRB-Verlag, 1997.
- [15] Hauser, G., Stiegel, H. und Haupt, W. *Wärmebrückenatlas auf CD-ROM*, 1998.
- [16] Hauser, G. und Stiegel, H. *Pauschalisierte Erfassung der Wirkung von Wärmebrücken*. *Bauphysik* 17 (1995), 3, S. 65–68.
- [17] Hauser, G., Stiegel, H. und Otto, F. *Energieeinsparung im Gebäudebestand – Bauliche und anlagentechnische Lösungen*, 2. Auflage Ed. Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung (GRE), Am Kaiserdamm 80, 14057 Berlin (Charlottenburg), 1997.
- [18] DIN EN 12494. *„Bauteile und Bauelemente – Vor-Ort-Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Oberfläche zu Oberfläche“* (Entwurf), November 1996.
- [19] <http://www.bundesanzeiger.de>.
- [20] [www.geofennel.com](http://www.geofennel.com).
- [21] [www.sokkia.de](http://www.sokkia.de).
- [22] aadiplan int'l. *aadiplan international GmbH – Analytische Aufnahmesysteme und Digitale Planung*.
- [23] Vogel, M. *Ermittlung von Gebäudekennwerten bei der energetischen Vor-Ort-Beratung*. Diplomarbeit Diplom I, Universität Gh Kassel, Fachgebiet Bauphysik, 2000.
- [24] Fokus GmbH, Gustav-Adolf-Str. 12, 04105 Leipzig. *Handbuch Eddi-2D 2.1*. [fokus-gmbh@t-online.de](mailto:fokus-gmbh@t-online.de), 1999.

- [25] Eos Systems Inc. 101-1847 West Broadway, Vancouver B.C. V6J1Y6, Canada. *PhotoModeler Pro User Manual*. support@photomodeler.com, October 2000.
- [26] Ahnert, R. und Krause, K. *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960*, 5 Ed., Bd. 1. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1996.
- [27] Ahnert, R. und Krause, K. *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960*, 3 Ed., Bd. 2. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1996.
- [28] Zapke, W. und Ebert, H. *k-Werte alter Bauteile – Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmetechnischer Berechnungen bei der Modernisierung*. Heft 22, RG-Bau Rationalisierungs-Gesellschaft "Bauwesen", RKW, Dezember 1983.
- [29] Böhmer, H. *k-Werte alter Bauteile*, 3 Ed. RKW-Verlag, Eschborn, 1999.
- [30] *DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau"*, Juli 1952.
- [31] Bruckmayer, F. *Der praktische Wärme- und Schallschutz im Hochbau*. Franz Deuticke, Wien, 1949.
- [32] Schneevoigt, G. *Leichtbetone mit aufgeblähtem Ton als Zuschlagstoff*. Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe B (1943), Heft 2, S. 34–37.
- [33] Häupl, P. und Stopp, H. *Patentschrift DD 149 962*, Juni 1992. Verfahren und Anordnung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von festen Stoffen oder Schüttstoffen.
- [34] Fraunhofer-ISE Freiburg. *Aufstellung eines Leitfadens zur Anwendung der Infrarotthermografie bei instationären Temperaturverhältnissen zur Feststellung versteckter Baufehler IR-Thermografie im Bauwesen – Kurzbericht F-2374*. Fraunhofer-Informationszentrum RAUM und BAU, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Oktober 1999.
- [35] DIN EN 13187:1998. *"Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen – Infrarot-Verfahren" (ISO 6781:1983 modifiziert)*, Mai 1999.
- [36] Henrich, G. *Fortschritte in der Bauwerksdiagnostik – Erst zerstörungsfrei messen, dann gezielt sanieren!* ARCONIS (1997), Heft 2, S. 14–17.
- [37] Hauser, G. und Geißler, A. *Kenngrößen zur Beschreibung der Luftdichtheit von Gebäuden*. wksb (1995), Sonderausgabe Dezember.
- [38] DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau". *Teil 7 "Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen"*, Entwurf, August 2000.
- [39] Bundesanzeiger Seite 10885, Bekanntmachungen. *Hinweis auf allgemein anerkannte Regeln der Technik zur Wärmeschutzverordnung*, 31. Juli 1998.
- [40] Anwendungstechnik Bau, A., Hrg. *Das Glas-Handbuch 1993*. Flachglas AG, 1993.
- [41] Ast, H., Bach, H., Diemer, R., König, N., Wagner, J. und Gertis, K. *Energiediagnose für Wohngebäude*. Forschungsbericht, IKE Stuttgart und FhG-IBP Stuttgart, Januar 1986.
- [42] NN. *Energy Performance - Indoor Environment Quality - Retrofit/Refurbishment EPIQR*. Software, www.epiqr.de, 2000.
- [43] <http://www.ahlborn.de/>.
- [44] <http://www.bosch-pt.de/pt/>.
- [45] <http://www.hilti.com/>.
- [46] <http://www.ir-impac.com/>.
- [47] <http://www.jenoptik-los.de/lasersensor/deutsch/>.
- [48] <http://www.leica-geosystems.com/>.
- [49] <http://www.linearlabs.com/>.
- [50] <http://www.landinst.com/infr/>.
- [51] <http://www.omega.de/>.
- [52] <http://www.raytek.de/>.

[53] <http://www.robotoolz.com/>.

[54] *Wessels Messtechnik GmbH*.

[55] <http://www.wohler.de/mgkg/>.

## Index

- Amortisationsdauer, 60, 66
  - Berechnung, 60
- Amortisationszeiten, 68
- Anlagentechnik
  - EPASS, 11
  - Rechenverfahren, 11
- anteilig, 50, 52
- Antragsrichtlinien, 2
- Aufwandszahlen, 11
- Ausgangsfall, 50, 52
  - Anpassung an Verbrauch, 65, 68
  - Einfamilienhaus, 50
  - Mehrfamiliengebäude, 52
- Bausubstanz, 44
- Bauteile, 5
- Bauzeichnungen, 22
- beheizter Bereich, 54, 75
- beheiztes Gebäudevolumen, 5
- Berechnung
  - Amortisationsdauer, 60
- Berechtigung
  - Vor-Ort-Beratung, 2
- Bestimmung
  - Rohdichte, 41
- Bilder entzerren, 28
- Blower Door, 45
- Bundesanzeiger, 34
  - Materialdaten, 34
- Constraints, 30
  - absolut, 31
  - relativ, 31
- Dichte, 20
  - Rohdichte, 20
- Digitalkamera, 30
- DIN 4108-4, 13
- DIN 4108-6, 5
- DIN EN 12494, 13, 42
- DIN EN 6946, 7
- Einfamilienhaus, 47
  - anteilige Verteilung, 50
  - Ausgangsfall, 50
  - Bedarfwerte, 50
  - Regelbarkeit, 50
  - Regelgeräteausstattung, 50
  - Sanierungsvarianten, 65
- Emissionsgrad, 42
- Endoskopie, 44
- Energiebedarf, 6, 54
- Energiebezugsfläche, 60
- Energieeinsparverordnung, 2
  - erstmaliger Einbau, Ersatz, Erneuerung, 2
- Energiekosten, 60
- Energiepreissteigerung, 60
- EnEV, 2
- EPASS, 11
- erstmaliger Einbau, Ersatz, Erneuerung, 2
- Exfiltration, 9
  - Dauer, 11
- Heizungsanlage
  - Ausstattung, 54, 75
  - Regelbarkeit, 54, 75
- Holzständerwand, 16
- Infiltration, 9
- Infrarot-Temperaturmeßgerät, 41
  - Wärmespeicherfähigkeit, 42
- Ingenieur
  - Berechtigung, 2
- instationär, 16
- interne Wärmegewinne, 6, 10
- k-Wert, 13
- Luftdichtheitsmessung
  - Blower Door, 45
- Luftwechsel, 54, 75
- Lüftungswärmebedarf, 6
- Lüftungswärmeverluste
  - In- und Exfiltration, 9
- Materialdaten, 34
- Mehrfamiliengebäude
  - Regelgeräteausstattung, 52
- Mehrfamiliengebäude, 47
  - anteilige Verteilung, 52
  - Ausgangsfall, 52
  - Bedarfwerte, 52
  - Regelbarkeit, 52
  - Sanierungsvarianten, 68
  - Treppenhaus, 13
- Messung, 45
  - Luftdichtheit
    - Blower Door, 45
    - Temperatur, 41
    - Wärmeleitfähigkeit, 42
- monolithisch, 16
- Nachtabsenkung, 68
  - Dauer, 54, 75
- Nutzereinfluß, 54
- Oberflächentemperatur, 42
- Photogrammetrie, 28
  - Constraints, 30
    - absolut, 31
    - relativ, 31
  - Digitalkamera, 30
  - Entzerrung, 28
- Primärenergiebedarf, 12
- Raumtemperatur, 54, 75
- Rechenwerte
  - Wärmeleitfähigkeit, 13
  - Wärmeübergangswiderstand, 7
- rechnerische Messungen, 16
- Regelgeräteausstattung, 50, 52, 65
  - Beispiel Einfamilienhaus, 50
  - Beispiel Mehrfamiliengebäude, 52
- Rohdichte, 20
  - Bestimmung, 41
  - Stoffgruppe, 20
  - Wärmeleitfähigkeit, 20

- Rohdichtebestimmung, 41
  - DIN EN 6946, 7
  - Rechenwerte, 7
- Sanierungsvarianten, 47, 65, 68
  - Einfamilienhaus, 65
  - Mehrfamiliengebäude, 68
- Sensitivität, 62
- solare Warmegewinne, 10, 11
- sommerliche Überhitzung, 10
- Stoffgruppe, 20
  - Rohdichte, 20
  - Wärmeleitfähigkeit, 20
- Thermographie, 42
  - Bauthermographie, 42
  - Focal Plane Array, 44
  - langwellig, 42
  - Wind, 44
- Treppenhaus, 13
- Trinkwarmwasser, 11
- U-Wert, 7, 13
- U-Werte, 54, 75
- Variationsbereiche, 54, 62
- Verbrauchsdaten, 54
  - "Stellschrauben", 54
  - Bedarf anpassen, 54
  - Nutzereinfluß, 54
- Volumen
  - Berechnung, 9
  - brutto, 9
- Vor-Ort-Beratung
  - Berechtigung, 2
- Vormauerschale, 16
- Warmwasser, 11
  - Nutz-Wärmebedarf, 11
- wirtschaftliche Maßnahme, 68
- Wirtschaftlichkeit, 66
- Wärmebedarf, 6
  - Warmwasser, 11
- Wärmebrücken, 9
  - Katalog, 9
- Wärmebrückenkatalog, 9
- Wärmedurchgangskoeffizient, 15
  - DIN EN 12494, 13
  - einfache Meßverfahren, 13
  - k-Wert, 13
  - U-Wert, 13
  - Wärmestrom, 16
  - Wärmestromdichte, 16
  - Wärmeübergangskoeffizient, 15
- Wärmedämmverbundsystem, 16
- Warmegewinne
  - intern, 10
  - solar, 10, 11
- Wärmeleitfähigkeit, 13, 34, 41
  - $\lambda$ , 13
  - DIN 4108-4, 13
  - DIN EN 12494, 42
  - Meßgerät, 42
    - Patent, 42
  - Rechenwerte, 13
  - Rohdichte, 20
  - Rohdichtebestimmung, 41
- Wärmespeicherfähigkeit, 42
- Wärmestrom, 14
- Wärmeübergangskoeffizient, 14, 15
- Wärmeübergangswiderstand

## 7 Bild- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

1	Wärmestrom durch eine Wand . . . . .	14
2	Untersuchte Konstruktionen . . . . .	15
3	Meßunsicherheit infolge Geräteungenauigkeit, Temperaturmessungen . . . . .	16
4	Meßunsicherheit infolge Geräteungenauigkeit, Wärmestrommessung . . . . .	17
5	Meßunsicherheit infolge instationären Bedingungen . . . . .	18
6	Meßunsicherheit infolge instationären Bedingungen, 2 . . . . .	19
7	Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Dichte . . . . .	20
8	Fehlereinfluß U-Wert Ausgangsfall . . . . .	21
9	Funktionen Laser-Entfernungsmeßgerät . . . . .	26
10	miniCASOB, Datenübernahme . . . . .	27
11	miniCASOB, Zuweisung Eigenschaften . . . . .	27
12	Bsp. 1, Photogrammetrie . . . . .	29
13	Bsp. 2, Photogrammetrie . . . . .	29
14	Photos zu Photomodeler-Test . . . . .	30
15	Photomodeler-Test, ohne Constraints . . . . .	31
16	Photomodeler-Test, mit Constraints . . . . .	32
17	Photomodeler-Test, Flächenberechnung . . . . .	33
18	Skizze und Grunddaten des Einfamilienhauses . . . . .	47
19	Skizze und Grunddaten des Mehrfamiliengebäudes . . . . .	48
20	Einfluß Anpassung auf Bedarfsänderung bei Sanierung, EFH . . . . .	64
21	Einfluß Anpassung auf Bedarfsänderung bei Sanierung, MFH . . . . .	64
22	Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Dichte . . . . .	75

### Tabellenverzeichnis

1	Wärmedurchgang bei Erneuerung . . . . .	3
2	Förderung der Vor-Ort-Beratung . . . . .	4
3	Abminderungsfaktoren DIN 4108-6 . . . . .	8
4	Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN 6946 . . . . .	8
5	Interne Wärmegewinne . . . . .	10
6	Jahresnutzungsgrade alter Heizanlagen . . . . .	12
7	Teleskopmeßstäbe . . . . .	23
8	Laser-Entfernungsmeßgeräte . . . . .	24
9	Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen . . . . .	36
10	Wärmedurchgangskoeffizienten alte Fenster und Türen . . . . .	40
11	Infrarot-Temperaturmeßgeräte . . . . .	43
12	Eingabedaten Randbedingungen . . . . .	49

13	Eingabedaten Bauteile EFH . . . . .	50
14	Bedarfwerte EFH . . . . .	51
15	Bedarfwerte aufgeteilt EFH . . . . .	51
16	Eingabedaten Bauteile MFH . . . . .	52
17	Bedarfwerte MFH . . . . .	53
18	Bedarfwerte aufgeteilt MFH . . . . .	53
19	Variationsbreite der Parameter . . . . .	55
20	Prozentuale Variationsbreite der Parameter . . . . .	55
21	Änderung des GEB, Einfamilienhaus . . . . .	56
22	Prozentuale Änderung des GEB, Einfamilienhaus . . . . .	57
23	Anteiliger Bedarf bei Variationen, EFH . . . . .	57
24	Änderung des GEB, Mehrfamiliengebäude . . . . .	58
25	Prozentuale Änderung des GEB, Mehrfamiliengebäude . . . . .	59
26	Anteiliger Bedarf bei Variationen, MFH . . . . .	59
27	Sensitivität $\sigma_{\text{GEB}}$ . . . . .	62
28	Ergebnisse Sanierungsvarianten EFH . . . . .	67
29	Ergebnisse Sanierungsvarianten MFH . . . . .	69
30	Wärmedurchgang bei Erneuerung . . . . .	72
31	Bewertung des Instrumentariums . . . . .	77