



DISSERTATION

**zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund**

**Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen
Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
in der Heizungsanlagentechnik**

Kati Jagnow

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

von der Universität Dortmund
Fakultät Bauwesen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation
von

Dipl.-Ing. (FH) Kati Jagnow
geboren am 25. März 1977 in Pasewalk

Tag der Einreichung: 12. Januar 2004

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2004

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek
Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Udo Blecken

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Trainings- und Weiterbildungszentrum Wolfenbüttel e.V. an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek für die Förderung der Arbeit. Als – mittlerweile emeritierter – Leiter des Lehrstuhls für Technische Gebäudeausrüstung an der Universität Dortmund ermutigte er mich nach meinem Fachhochschulstudium diesen Bildungsweg zu beschreiten und übernahm die Betreuung der externen Arbeit.

Ferner bedanke ich mich in Dortmund bei Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller für die Übernahme des Korreferats sowie bei Prof. Dr.-Ing. Udo Blecken als Vorsitzender der Prüfungskommission.

An der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel danke ich besonders Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff für sein Engagement und die fachlichen Diskussionen sowie allen Mitarbeitern und Diplomanden des Instituts für Heizungs- und Klimatechnik, die mich bei meiner Arbeit durch Wort und Tat unterstützt haben. Namentlich erwähnen möchte ich an dieser Stelle Dipl.-Ing. (FH) Christian Halper.

Schließlich bleiben noch Familie und Freunde, die mich ermutigt und unterstützt haben und deren Hilfe ich nicht missen wollte.

Wernigerode, im Januar 2004

... über den Aufwand und Nutzen von Energieeinsparung [78]:

**"Und für die Forschung und die Lehre besteht die Notwendigkeit,
sich nicht nur damit zu befassen, was alles möglich ist,
sondern auch damit, was unbedingt nötig ist."**

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Nomenklatur	10
1. Einleitung.....	15
2. Situation der Qualitätssicherung in Deutschland.....	19
2.1. Definition von Qualität und Qualitätssicherung.....	19
2.2. Relevante statistische Daten	20
2.3. Grundlagen der Qualitätssicherung	22
2.3.1. Rechtliche Grundlagen	23
2.3.2. Technische Regeln zur Leistungsbemessung der Heizung.....	27
2.3.3. Technische Regeln zu Rohrnetzberechnung und Hydraulik.....	29
2.3.4. Weitere Technische Grundlagen.....	31
2.3.5. Umgang mit Anlagentechnik im Bestand	32
2.4. Hemmnisse bei der Umsetzung von Qualitätssicherung.....	33
2.5. Praktische Umsetzung von QS.....	36
3. Grundlagen der Energiebilanz	37
3.1. Allgemeine Energiebilanzansätze.....	37
3.2. Energiekennwerte im Detail	38
3.3. Arten der Energiebilanzierung	47
3.4. Etablierte Energiebilanzverfahren.....	50
3.4.1. Bedarf: Normen zur EnEV	51
3.4.2. Bedarf: SIA 380/1 und LEG.....	52
3.4.3. Bedarf: Hessischer Energiepass.....	54
3.4.4. Bedarf: VDI 2067	55
3.4.5. Verbrauch: VDI 3807	57
3.4.6. Verbrauch: VDI 3808	58
3.4.7. Weitere Berechnungsverfahren	58

4.	Qualitätsmerkmale des Baukörpers und der Nutzung.....	60
4.1.	Qualitätsmerkmale des Baukörpers.....	60
4.2.	Qualitätsmerkmale der Nutzung.....	63
5.	Qualitätsmerkmale der Anlagentechnik.....	68
5.1.	Grundlagen der Bewertung.....	68
5.1.1.	Verschwendungspotential und Zwangswärmekonsum.....	68
5.1.2.	Materielle und immaterielle Merkmale.....	69
5.1.3.	Grundzusammenhänge der Merkmale.....	69
5.1.4.	Definition der Überdimensionierung.....	72
5.2.	Wärmeverbraucher.....	73
5.2.1.	Heizflächen.....	73
5.2.2.	Heizkörperventil.....	80
5.2.3.	Einzelraumregelkreis.....	85
5.3.	Zentrale Regelung und Hydraulik.....	90
5.3.1.	Zentrale Hydraulik und hydraulischer Abgleich.....	90
5.3.2.	Umwälzpumpe.....	98
5.3.3.	Zentrale Regelung.....	102
5.4.	Verteilnetz und Wärmeerzeugung.....	108
5.4.1.	Verteilnetz.....	108
5.4.2.	Kessel und Thermen.....	110
5.4.3.	Wärmeübergabestationen und weitere Wärmeerzeuger.....	115
5.5.	Lüftungsanlagen.....	117
5.6.	Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung.....	118
5.7.	Weitere Merkmale der Anlagentechnik.....	120
6.	Bewertungsmöglichkeiten von Qualität und Qualitätssicherung in der Energiebilanz. 123	
6.1.	Verknüpfung von Energiekennwerten in einer Matrix.....	123
6.2.	Verbesserungsansätze etablierter Bilanzverfahren.....	127
6.3.	Detaillierungsgrad für die Bewertung.....	132
6.4.	Erweiterter Energiebilanzansatz.....	135
6.5.	Bandbreite des Einflusses von QS in der Kennwertbilanz und Definition von Verbrauchstypen.....	139

7.	Feldmessungen zur Quantifizierung von Einsparpotentialen	146
7.1.	Allgemeine Hinweise zum Bilanzverfahren	146
7.2.	Abschätzung von Einsparpotentialen ohne Optimierung	148
7.2.1.	Auswertungsdiagramme und deren Aussagekraft	149
7.2.2.	Auswertung von Monatsmesswerten	154
7.2.3.	Auswertung von Jahresmesswerten	156
7.2.4.	Bereinigung von Messdaten und abgeschätzten Einsparpotentialen.....	157
7.3.	Auswertung von Optimierungen und Archivierung von Verbrauchsdaten	158
7.3.1.	Notwendige Kennwerte zur Bewertung	158
7.3.2.	Herkunft und Bereinigung der Rohdaten	159
7.4.	Vereinfachte Kennwertematrix für Feldprojekte	160
7.4.1.	Vorhandene Typologien	161
7.4.2.	Allgemeine Festlegungen.....	162
7.4.3.	Archivierung von berechneten und gemessenen Einsparpotentialen.....	162
7.4.4.	Ausblick auf die Anwendung in der Praxis.....	164
7.5.	Genauigkeit einfacher Verfahren	165
7.6.	Praxisergebnisse.....	168
8.	Wirtschaftliche Bewertung von Qualitätssicherung	176
8.1.	Geeignete Wirtschaftlichkeitsverfahren.....	176
8.2.	Gesamtkostenverfahren	177
8.3.	Direkte und indirekte wirtschaftliche Bewertung.....	179
8.4.	Kostenbandbreite und Wirtschaftlichkeitsgrenze von Qualitätssicherungsmaßnahmen..	180
8.4.1.	Wirtschaftliche Grunddaten.....	180
8.4.2.	Nutzerschulungen	181
8.4.3.	Anlagentechnische Maßnahmen im Bestand	182
8.4.4.	Optimierung der Anlagentechnik im Neubau	186
9.	Regeln für die Qualitätssicherung in der Praxis.....	188
9.1.	Hinweise zur Anwendung	188
9.2.	Checklisten zur Qualitätssicherung.....	189
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	194
	Literatur- und Quellenverzeichnis	199
	Anhang	208

Nomenklatur

Die Formelzeichen und Indizes wurden so gewählt, dass Doppelnennungen weitgehend vermieden werden. Verwechslungen sind selbst bei einer mehrfachen Verwendung eines Formelzeichens ausgeschlossen, da sich die Bedeutung der Symbole aus dem jeweiligen Zusammenhang ergibt.

Formelzeichen	Erläuterung	typische Einheit
a	Deckungsanteil	-
a	Wärmeübertragerkennwert	-
$a_{p,n}$	Annuitätsfaktor	a^{-1}
a_v	Ventilautorität	-
A	Begrenzungsfläche, Heizfläche	m^2
ATD	akkumulierte Temperaturdifferenz	kKh/a
c_p	spezifische Wärmekapazität	$kJ/(kg \cdot K)$
C	hydraulischer Widerstand	$(bar \cdot h^2)/m^6$
e	Aufwandszahl	-
f	Faktor, allgemein	-
f_p	Primärenergiefaktor	-
F	Faktor, allgemein	-
g	Energiedurchlassgrad (von Fenstern)	-
G	Heizgradtage	kKh/a
Gt	Gradtagszahl	kKh/a
h	Raumhöhe	m
H	Förderhöhe	m
H	bezogene Heizlast	W/K
H	Hub (Ventil-)	$mm, \%$
H_o	Brennwert (oberer Heizwert), auch neu: H_s	$kWh/m^3, kWh/l$
H_u	Heizwert (unterer Heizwert), auch neu: H_l	$kWh/m^3, kWh/l$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
k_e	bezogener Energiepreis	$€/kWh$
k_v	Durchflusskennwert (von Ventilen)	m^3/h
K	Kosten, jährlich	$€/a$
I_o	Investitionskosten	$€$
L	Länge (von Leitungen)	m
m	Steigung, Steilheit (der Heizkurve)	-
m	Nutzungsdauer, wirtschaftlich	a
m	Preissteigerung	-
\dot{m}	Massenstrom	kg/h

Tabelle 0-1 Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	typische Einheit
n	Luftwechsel	h^{-1}
n	Heizkörperexponent	-
n	Betrachtungszeitraum, wirtschaftlich	a
p	Druck	Pa, bar
p	Kapitalzinssatz	a^{-1}
q	bezogene Energiemenge	$kWh/(m^2 \cdot a)$
q	bezogene Verlustleistung (Erzeugung)	-
Q	Volumenstrom, veraltet	m^3/h
Q	Energiemenge	kWh/a
\dot{Q}	Leistung	kW
r	Reduktionsfaktor	-
R	Rohrreibungswert	Pa/m
R	Bestimmtheitsmaß, statistisch	-
s	Preissteigerung	a^{-1}
S	Schwierigkeitsgrad einer Regelstrecke	-
t	Zeit	h
U	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/h
V_O	Kreisverstärkung eines Regelkreises	-
x	Faktor, allgemein	-
x	Teilgröße einer Funktion, Variable	verschieden
x_{sd}	Schaltdifferenz	verschieden, hier K
X_{hs}	maximale Stellwirkung (einer Regelstrecke)	verschieden, hier K
X_P	P-Bereich, Proportionalbereich (eines Reglers)	verschieden, hier K
y	Funktionswert	verschieden

Tabelle 0-1 Lateinische Formelzeichen (Fortsetzung)

Formelzeichen	Größe	Einheit
α	Heizflächenverhältnis, -überdimensionierung	-
Δ	Differenz	verschieden
γ	Gewinn/Verlust-Verhältnis	-
η	Nutzungsgrad	-
φ	Belastungsgrad	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
μ	Massenstromverhältnis	-
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C, K$
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Standardabweichung	verschieden
Σ	Summe	verschieden

Tabelle 0-2 Griechische Formelzeichen

Nomenklatur

Zeichen	Erläuterung
'	auf die Hüllfläche bezogen
"	Kennzeichnung eines Kennwertes bei zentraler Trinkwarmwasserbereitung
*	auf die Leitungslänge bezogen
**	auf das Volumen bezogen
0, 1, 2 ...	Zählindex, Außentemperaturen, Heizwassertemperaturen
100	Maximalzustand, Auslegungszustand (100 %)
<i>g</i>	Temperatur
<i>a</i>	außen (Temperatur)
<i>a</i>	Jahr (-eskosten)
<i>a</i>	Anlagen (-preissteigerung)
<i>ab</i>	abgegeben (-e Wärme)
<i>A</i>	Auslegungszustand, Auslegungswert
<i>A</i>	Abgas (-verlustleistung) (-verlustenergie)
<i>Absenk</i>	Absenk (-betrieb)
<i>beheizt</i>	innerhalb des beheizten Bereichs (freiwerdende Wärme)
<i>B</i>	Bereitschaft (-sverlustleistung) (-sverlustenergie)
<i>Bezug</i>	Bezug (-shöhe) (-sfläche) (-svolumen) (-swert)
<i>ce</i>	control and emission, Übergabe (Wärmeverluste)
<i>d</i>	distribution, Verteilung (Wärmeverluste)
<i>dezentral</i>	dezentral
<i>e</i>	external, äußeres (Volumen)
<i>e</i>	Energie (-kosten) (-preissteigerung) (-preisteuerungsrate)
<i>elektrisch</i>	elektrisch (-e Energie) (-e Leistung)
<i>extern</i>	außerhalb des beheizten Bereiches (auftretende Wärmeverluste)

Zeichen	Erläuterung
<i>E</i>	eingeschränkter Heizbetrieb
<i>E</i>	Endenergie
<i>EB</i>	Energiebezug (-sfläche)
<i>F</i>	Fremdwärme (-nutzungsgrad)
<i>Fe</i>	Fenster
<i>g</i>	generation, Erzeugung (Wärmeverluste)
<i>gesamt</i>	gesamt (-er Druckverlust) (-er Widerstand)
<i>h</i>	Heizwärme (Nutzwärme)
<i>H</i>	Heizenergie (Verlust-, Endenergiemengen)
<i>Heizkurve</i>	Heizkurve
<i>HG</i>	Heizgrenze
<i>HK</i>	Heizkörper
<i>HP</i>	Heizzeit, Heizperiode
<i>Hyd</i>	hydraulisch (-e Leistung)
<i>i</i>	innen (Temperatur)
<i>i</i>	Investition (-skosten)
<i>i</i>	Zählindex
<i>ideal</i>	ideal
<i>intern</i>	innerhalb des beheizten Bereichs (geregelt und ungeregelt anfallende Wärme)
<i>ist</i>	Istwert
<i>I</i>	innere (Fremdwärme)
<i>I+S</i>	innere und solare (Fremdwärme)
<i>j</i>	Zählindex
<i>konst</i>	konstant (-e Druckregelung)
<i>K</i>	Kessel
<i>Kern</i>	Kernheizzeit
<i>ln</i>	logarithmisch (-e Übertemperatur)
<i>m</i>	Mittelwert
<i>m</i>	Nutzungsdauer
<i>max</i>	Maximalwert
<i>mess</i>	Messwert
<i>min</i>	Minimalwert
<i>mitFW</i>	mit Fremdwärme
<i>Mittel</i>	Mittelwert

Tabelle 0-3 Indizes

Zeichen	Erläuterung
<i>n</i>	Zählvariable
<i>n</i>	Betrachtungszeitraum
<i>N</i>	Norm
<i>N</i>	Nutz (-fläche)
<i>Netz</i>	Netz (-druckverlust)
<i>Normal</i>	Normal (-betrieb)
<i>Nutz</i>	Nutz (-leistung) (-energie)
<i>ohneFW</i>	ohne Fremdwärme
<i>Opt</i>	optimal
<i>p</i>	Kapitalzins
<i>Pumpe</i>	Pumpe (-ndruckerhöhung) (-nvolumenstrom)
<i>R</i>	Regelung
<i>R</i>	Rücklauf (-temperatur)
<i>Raum</i>	Raum
<i>s</i>	storage, Speicherung (Wärmeverluste)
<i>s</i>	Preissteigerung
<i>soll</i>	Sollwert
<i>S</i>	solar (Fremdwärme)
<i>S</i>	Strahlung (-sverlustleistung) (-sverlustenergie)
<i>S</i>	Serienkennwert (bei Thermostatventilen)
<i>Sowieso</i>	sowieso (vorhandene Wärmeverluste)
<i>Strang</i>	Strang (Heizungs-)

Zeichen	Erläuterung
<i>t</i>	technisch (-e Wärmeverluste)
<i>thermisch</i>	thermisch (-e Energie) (-e Leistung)
<i>tw</i>	Trinkwasser (-nutzwärme)
<i>T</i>	transmission, Transmission (Wärmeverluste)
<i>TW</i>	Trinkwasser (Verlust-, Endenergiemengen)
<i>T+V</i>	Transmission und Lüftung (Wärmeverluste)
<i>u</i>	Wartung und Unterhalt (-skosten) (-spreisteuerungsrate) (-spreissteigerung)
<i>unbeheizt</i>	im unbeheizten Bereich (freiwerdende Wärme)
<i>Ü</i>	Überdimensionierung (der Heizflächen)
<i>Umwandlung</i>	Umwandlung (Energie-)
<i>var</i>	variable (Druckregelung)
<i>V</i>	ventilation, Lüftung (Wärmeverluste)
<i>V</i>	Vorlauf (-temperatur)
<i>V</i>	Ventil
<i>Verbrauch</i>	Verbrauch
<i>Verlust</i>	Verlust
<i>WB</i>	Wärmebrücke
<i>x</i>	Zählvariable
<i>zentral</i>	zentral

Tabelle 0-3 Indizes (Fortsetzung)

Kürzel	Erläuterung
AGFW	Arbeitsgemeinschaft für Wärme- und Heizkraftwirtschaft
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
Apr	April
ATV	Allgemeine Technische Vertragsbedingungen
Bbl	Beiblatt
BDH	Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie und Umwelttechnik e. V.
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	deutsche Vornorm
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
E	Art der Energieversorgung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm
EnEG	Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz)
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
G	Gebäudegröße
HeizAnV	Heizungsanlagenverordnung
HeizBetrV	Heizungsbetriebsverordnung
HeizKoV	Heizkostenverordnung
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
ISO	International Standardization Organisation, internationale Norm

Kürzel	Erläuterung
LEG	Leitfaden energieeffiziente Gebäudeplanung
MFH	Mehrfamilienhaus
Mrz	März
MWSt.	Mehrwertsteuer
NEH	Niedrigenergiehaus
Nov	November
NT	Niedertemperatur
Okt	Oktober
PH	Passivhaus
P-Regler	Proportional-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
prEN	vorläufige Europäische Norm
QS	Qualitätssicherung, Stand der Qualitätssicherung
SHK	Sanitär-, Heizungs-, Klimatechnik
Sep	September
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverband; Schweizer Norm
T	Gebäudetyp
TEB	Räumliche Teilbeheizung (räumlich eingeschränkter Heizbetrieb)
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen der ehemaligen DDR
THKV	Thermostatisches Heizkörperventil
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband der Investitionsgüterindustrie
VDZ	Vereinigung der deutschen Zentralheizungswirtschaft e. V.
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WSchV	Wärmeschutzverordnung
ZEB	Zeitliche Teilbeheizung (zeitlich eingeschränkter Heizbetrieb)

Tabelle 0-4 Abkürzungen

1. Einleitung

Der Begriff Qualitätssicherung – Kurzdarstellung der Thematik

Vor dem Einstieg in die Bearbeitung der Problematik soll kurz dargestellt werden, was unter dem häufig verwendeten Begriff *Qualitätssicherung* (kurz *QS*) im Rahmen dieser Arbeit zu verstehen ist. Als *QS der Anlagentechnik* ist die Optimierung der Planung, Ausführung und der Betrieb von Anlagen nach Gesichtspunkten der Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit zu verstehen. Der Begriff meint hier nicht die manuelle Überwachung der üblichen Planung und Ausführung als Aufgabe eines Qualitätssicherungsbüros. Er steht für die Erweiterung der üblichen Planung, Ausführung und Wartung mit dem Ziel einer Techniko-optimierung. Die QS kann und sollte als eine Zusatzqualifizierung oder Dienstleistung der Fachunternehmen der TGA verstanden werden. Die vorliegende Arbeit stellt Vorteile vorhandener QS bzw. Nachteile fehlender QS dar und zeigt Ansätze zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung.

Notwendigkeit der Arbeit

In Deutschland wird derzeit etwa ein Drittel der Endenergie für die Wärmeversorgung von Gebäuden verwendet. Vom gesamten Endenergieverbrauch der privaten Haushalte entfallen ca. drei Viertel auf den Raumwärmebereich [152]. Vor dem Hintergrund geringer werdender Primärenergievorräte ist das Ziel heutiger Energieeinspar- und Klimaschutzpolitik ein mittel- und langfristiger Übergang zu Gebäuden mit niedrigsten Energieverbrauchswerten. Seit Ende der 1970er Jahre wurden verschiedene Verordnungen zur Energieeinsparung erlassen und stetig novelliert. Schwerpunkt dieser Verordnungen war und ist primär die Festlegung eines guten, wirtschaftlich vertretbaren energetischen Standards für den Neubau. Für neue Gebäude ergäben sich damit theoretische Energieeinsparungen von etwa 60 % – vergleicht man die Baujahre vor Gültigkeit der ersten Wärmeschutzverordnung von 1977 mit heutigem Baustandard.

Sehr hohe Energieeinsparungen sowie eine gute Übereinstimmung zwischen gerechneten und gesetzlich vorgeschriebenen, maximalen Bedarfswerten und gemessenen Verbrauchswerten sind bei "begleiteten" Projekten nachgewiesen worden. Die Begleitung erstreckte sich in der Regel über alle Stufen der Planung und Ausführung. Auch die Nutzer wurden in diese Qualitätssicherung eingebunden [107] [122] [201]. Diese repräsentativen Feldprojekte spiegeln jedoch nicht die Praxis der Bautätigkeit in Deutschland wieder.

Breitenuntersuchungen von GEIGER [64] zeigen, dass die Energieeinsparung in den Jahren ab 1977 bei weitem nicht so erfolgreich ist, wie es die Erlasse der Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnungen haben erwarten lassen. Gebäude mit Errichtung ab 1989 zeigen einen Einspareffekt des Endenergieverbrauches von nur 20 ... 25 % verglichen mit Gebäuden der Baujahre vor 1977. Die fehlende kritische Planungsbeurteilung und sachgerechte Kontrolle der Bau- und Anlagentechnik bei der Umsetzung sowie ein Mangel an Qualifizierung und Qualitätssicherung werden als die Ursachen dieser Differenz angesehen [64].

Das Thema Energieeinsparung betrifft neben dem Neubau weit stärker den Gebäudebestand, auch wenn die Gesetzgebung hier oftmals mit dem Verweis auf das Wirtschaftlichkeitsgebot geringere Anforderungen stellt. Bild 1-1 verdeutlicht die nur sehr geringen Auswirkungen von Energieeinspargesetzen für den Neubau: Jeder Neubau ist i.d.R. ein Zuwachs an zu beheizender Fläche und ein Mehrverbrauch an Energie. Der größte Anteil des Energiekonsums – und damit das größte Einsparpotential – für Raumwärme liegt im Bestand der Gebäude mit Baujahren vor 1977. Trotzdem fließt nur etwa ein Viertel der Wohnbauförderung in den Bestand [69].

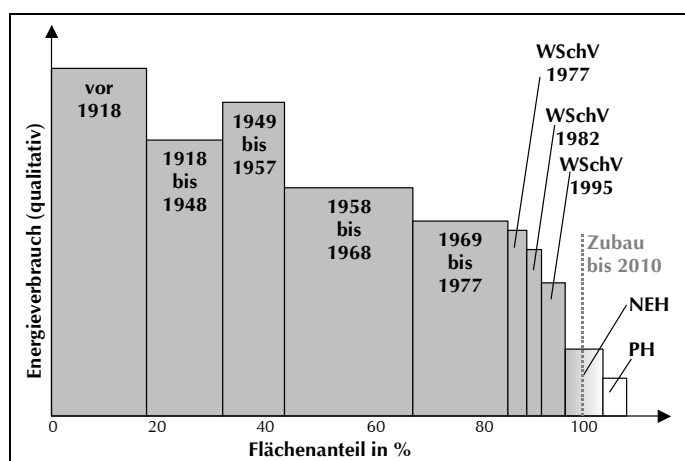


Bild 1-1 Qualitativer Energieverbrauch der Gebäude in Deutschland [71] [97]

Messprojekte im Bestand zeigen in viel stärkerem Maße die Notwendigkeit einer Qualitätssicherung der Anlagentechnik über die rein bauliche Sanierung hinaus [51] [53] [88] [123] [205]. Fazit dieser Untersuchungen ist: verbleibt die alte Anlagentechnik in einem baulich sanierten Bestandsgebäude, kann der Energieverbrauch im ungünstigsten Fall ebenfalls auf dem alten Niveau stagnieren. Grundsätzlich ist mit einer verminderten Energieeinsparung zu rechnen. Eine Verbesserung des energetischen Standards benötigt daher angepasste Konzepte der Planung und Umsetzung für die Anlagentechnik und offensichtlich eine Qualitätssicherung.

Die Bewertung der energetischen Qualität eines Gebäudes – bestehend aus Baukörper, Anlagentechnik und Nutzung – erscheint vor diesem Hintergrund zwingend notwendig. Dies erfordert die Anpassung und Modifizierung vorhandener Energiebilanzverfahren zur Prognose des Energiebedarfs von Neubauten und sanierten Bestandsgebäuden. Die zahlreichen etablierten Energiebilanzverfahren zur Vorausbestimmung eines theoretischen Energiebedarfs oder Auswertung von Energieverbrauchsdaten berücksichtigen i.d.R. sehr detailliert die folgenden Einflüsse: *Baukörper und Klima, Nutzung und ggf. die Anlagentechnik.*

Auch die bauliche Qualitätssicherung (Luftdichtheit, Wärmebrückenoptimierung) wurde in den letzten Jahren stärker in die Energiebilanzierung einbezogen, für das Nutzerverhalten werden meist standardisierte Annahmen getroffen. Die vorhandene anlagentechnische Qualität wird in der Energiebilanz meist vernachlässigt. Technik wird bilanziert, als ob sie vorschriftsmäßig ausgelegt, installiert und betrieben wird [45]. Da an diesem Punkt Theorie und Praxis sehr weit auseinander liegen, darf es nicht verwundern, wenn theoretisch berechneter Energiebedarf und der

praktische Energieverbrauch weit auseinander liegen. Dies wird in Gebäuden mit besserem baulichen Standard umso mehr sichtbar, weil die relativen Abweichungen vom Bedarfswert offensichtlicher sind. Der Nutzer – in einer Energiebilanz stets der unsicherste Faktor – wird oft für den Energiemehrverbrauch verantwortlich gemacht. Untersuchungen realer Objekte zeigen jedoch, dass oftmals die Anlagentechnik dieses Nutzerverhalten erst ermöglicht [107] [201] [205]. In der Praxis ist ein übertriebenes Sicherheitsdenken bei der Dimensionierung ebenso anzutreffen wie komplett fehlende Anlagenplanungen. Die Anlagentechnik kann in diesen Fällen ein Mehrfaches der benötigten Energiemenge abgeben und läuft insgesamt suboptimal.

Die Unzulänglichkeiten wirken sich i.d.R. zunächst nur auf die laufenden Energiekosten für den Nutzer des Gebäudes aus. Weder Energieversorger noch das Fachhandwerk oder der Anlageneigentümer sind direkt von einer verminderten Anlagenqualität negativ betroffen. Erhöhte Instandhaltungskosten für zu früh verschlissene Anlagenkomponenten machen sich oft erst nach längerer Zeit beim Betreiber bemerkbar. Dann wird eine – nachträgliche – Qualitätssicherung aus Kostengründen und aus Unkenntnis meist nicht mehr in Betracht gezogen.

Für den Mietwohnungsbau spielt die Qualität der Anlage künftig spätestens dann eine Rolle, wenn eine Wohnung nicht mehr allein nach Kaltmietpreisen vermarktet werden kann. Dieser Zustand ist in einzelnen Gebieten Deutschland bereits erreicht und wird bis auf wenige Kerngebiete in wenigen Jahren ganz Deutschland erfasst haben. Für Hersteller von Anlagentechnik wandelt sich das wirtschaftliche Handlungsfeld ebenfalls: nicht mehr allein Komponenten sind gefragt, sondern Systeme. Letztlich wird der Bereich Qualitätssicherung in baulich sanierten Gebäuden wahrscheinlich einer der größten künftigen Märkte für die Fachunternehmen der Versorgungstechnikbranche werden. Aufgrund des stetig verminderten Neubaufkommens liegt in der – bezahlten – Qualitätsverbesserung von Anlagen ein wirtschaftliches Potential für die Planung und Ausführung. Die Forderungen nach Qualität lassen sich sehr gut mit dem durch die künftige Europäische Gebäuderichtlinie begründeten Energiepassvorhaben vereinbaren und koppeln.

Das Kernproblem, das ein rasches Durchsetzen von Qualitätsoffensiven heute noch behindert, ist die unbestimmte Wirtschaftlichkeit. Bislang ist der Markt für QS ein Angebotsmarkt, dem die Nachfrage fehlt. Zur Änderung dieses Zustandes sind neben ausreichender Kommunikation vor allem gesicherte und belastbare Grundlagen über Kosten und Nutzen von Qualitätssicherung notwendig. Der Lösung dieses Problems widmet sich die vorliegende Arbeit.

Ziele und Aufgaben

Hauptaufgabe der Arbeit ist, die Qualität der Planung, Ausführung und Nutzung einer Anlagentechnik in Zahlen sichtbar zu machen. Aus quantifizierbaren Energieeinsparungen können Kosten abgeleitet werden. Der Anreiz der wirklichen Umsetzung von QS im Neubau oder nachträglich im Gebäudebestand kann dadurch in der Praxis für alle Beteiligte erhöht werden. Da dies ein sehr umfassendes Vorhaben ist, kann es nicht vollständig im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet werden. Der Schwerpunkt liegt daher auf der Herausarbeitung von Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von QS, nicht im Nachweis der Wirtschaftlichkeit.

Es sollen verschiedene Möglichkeiten der Kosten- und Energiebilanz für Qualitätssicherung aufgezeigt werden. Aufbauend auf die heutige Handhabung bei der Anlagenplanung und -ausführung sowie auf Auswertung von Feldmessungen werden Regeln bzw. Handlungsempfehlungen für die Planung und Umsetzung von QS abgeleitet.

Abgrenzung des Bearbeitungsschwerpunktes

Die Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der QS der Anlagentechnik und ihrem Einfluss auf die Energiebilanz eines Gebäudes. Wechselwirkungen mit dem Baukörper werden aufgegriffen, die bauliche QS jedoch nicht vertieft. Die Zusammenhänge zwischen der installierten Technik und der Art der Nutzung werden hingegen intensiver beleuchtet.

Die Untersuchungen liegen schwerpunktmäßig im Bereich des Wohnbaus, die abgeleiteten Strategien zur Bewertung von QS sind jedoch vom Ansatz auch auf den Nichtwohnbau übertragbar. Da der größte Anteil des Energieverbrauchs aller Wohngebäude in Deutschland auf die Raumheizung in Gebäuden mit konventioneller Versorgungstechnik entfällt, beleuchtet die Arbeit vor allem Qualitätssicherungsmaßnahmen im Bereich der Pumpenwarmwasserheizungen im Zweirohrsystem mit thermostatisch geregelten Heizkörpern und üblicher Systeme zur Trinkwarmwasserversorgung. Diese Merkmale finden sich in etwa drei Viertel aller Gebäude [140] [152].

Innovative Erzeugungssysteme auf Basis regenerativer Energien, wie Solarthermie oder Wärmepumpentechnologien, werden ebenso wie die Gebäudekühlung in dieser Arbeit nicht vertieft. Grundsätzliche Aussagen zur QS können jedoch auch auf diese Systeme übertragen werden.

Struktur der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer Recherche über den Stand der Qualitätssicherung in der Heizungsanlagentechnik. Grundlagen für die Anlagenauslegung, -ausführung und den Betrieb werden vorgestellt. Hemmnisse bei der praktischen Umsetzung von Qualitätssicherung werden beleuchtet. Die anschließende Untersuchung wichtiger etablierter Energiebilanzverfahren liefert Rückschlüsse auf die Bewertungsmöglichkeiten von Qualität in einer Bilanz.

Der theoretische Kern der Arbeit beschäftigt sich mit den Qualitätsmerkmalen der Anlagentechnik im Zusammenspiel mit dem Baukörper und der Nutzung. Die Einzelmerkmale werden zunächst beschrieben, anschließend sind ihr Einfluss auf die Energiebilanz und die Wechselwirkungen mit anderen Merkmalen Hauptgegenstand der Untersuchungen. Aus den theoretisch untersuchten Einzeleinflüssen der QS wird die mögliche Bandbreite des tatsächlichen Energieverbrauchs abgeleitet.

Der praktische Teil der Arbeit widmet sich der Auswertung von Messdaten zur Quantifizierung von Qualitätssicherung. Hierzu werden vorhandene Ansätze etablierter Energiebilanzverfahren weiterentwickelt. Anhand der ausgewerteten Feldmessungen und der theoretisch abgeleiteten Schwankungsbreite des Energieverbrauchs in Anlagen mit und ohne Qualitätssicherung werden Aussagen zur Wirtschaftlichkeit getroffen. Aus den Ergebnissen lassen sich Regeln zur Qualitätssicherung – in Form von Checklisten – ableiten.

2. Situation der Qualitätssicherung in Deutschland

Nachfolgend wird eine Übersicht über den heutigen Stand einer Qualitätssicherung der Anlagentechnik gegeben. Rechtliche und technische Grundlagen werden vorgestellt und Hemmnisse bei der Umsetzung näher beleuchtet.

2.1. Definition von Qualität und Qualitätssicherung

Die *Qualität* einer Anlage drückt sich durch energiesparenden, wirtschaftlichen und gleichzeitig komfortablen Betrieb aus. Dies kann durch eine korrekte Dimensionierung, Einstellung und Wärmedämmung der Anlagentechnikkomponenten in der Planungs- und Ausführungsphase erreicht werden. Die beschriebene Sicherstellung der Qualität, die *Qualitätssicherung*, erfolgt darüber hinaus auch in der Phase der Nutzung und Instandhaltung.

Der Energieverbrauch und die Qualität eines Gebäudes ergeben sich gleichermaßen aus den gebäudeunabhängigen Standortparametern, den Einflüssen des Baukörpers, der Anlagentechnik sowie der Art und Weise der Nutzung. In der Fachliteratur werden die größten Energieeinsparpotentiale in der Wärmedämmung von Gebäuden, der Verbesserung der Luftdichtheit, im Wärmeerzeugeraustausch und ggf. der Wärmedämmung von Verteilleitungen im unbeheizten Bereich gesehen. Volkswirtschaftliche Szenarien über künftigen Energieverbrauch [153] berücksichtigen nicht, dass die Einsparungen bei typischem Nutzerverhalten ggf. nicht eintreten könnten, wenn die Anlagentechnik nicht an die neuen Verhältnisse angepasst wird. Der Einspareffekt der genannten primären Einsparmaßnahmen ist unbestritten. Sie müssen jedoch von flankierenden Maßnahmen, welche die Anlagentechnik als System betreffen, begleitet werden. Nur so kann das volle Potential der Einzelmaßnahmen genutzt werden.

Die Qualität der Anlagentechnik umfasst zwei wichtige Aspekte: die Güte der einzelnen Komponenten (technisches Grundprinzip, Effizienz, Wartungshäufigkeit) und die Güte des Systems (Zusammenspiel der Komponenten). Im Rahmen dieser Arbeit soll speziell der Systemgedanke verfolgt werden, da die technische Optimierung einzelner anlagentechnischer Komponenten heute schon sehr weit fortgeschritten ist und trotzdem suboptimale Gesamtsysteme in der Praxis zu erhöhtem Energieverbrauch führen [11] [29] [107] [109] [154] [204]. Zur Qualität eines Heizungsanlagensystems, das den Nutzenanforderungen gerecht wird, gehören:

- optimal dimensionierte und eingestellte Komponenten (Wärmeerzeuger, Pumpen, Verteilnetz, Heizflächen und Ventile),
- optimale eingestellte zentrale und dezentrale Regelfunktionen (ggf. ist eine nachträgliche Ausstattung mit Regelgeräten notwendig),
- eine optimale Hydraulik (einschließlich hydraulischer Abgleich) und
- ausreichend gegen Wärmeverluste geschützte Komponenten.

Diese Anforderungen gelten für Neubau und Bestand gleichermaßen. Wobei für den Bestand, in dem viele Anlagenkomponenten schon festgelegt sind, die energetische Qualität eines

vergleichbaren Neubaus ggf. nicht mehr erreicht werden kann. Die Anlage muss mit den gegebenen, feststehenden Komponenten optimiert werden. Die Qualitätssicherung der Anlagentechnik umfasst im Neubau und Bestand:

- die Planung des Systems u.a. nach Gesichtspunkten der Energieeinsparung, Wirtschaftlichkeit und des Komforts (incl. Leistungsbemessung oder -anpassung),
- die Ausführung des Systems nach den Planungsvorgaben (Installation, Einstellung, Einregulierung),
- die dokumentierte Inbetriebnahme und Wartung der Anlage und
- die Kontrolle der Verbrauchsdaten.

Qualität und Qualitätssicherung der Anlagentechnik sind eng mit der Qualität der Nutzung verknüpft. Darunter ist die Einhaltung bestimmter, fest definierter Nutzungsbedingungen zu verstehen, auf welche die Anlage in der Planungsphase zugeschnitten wird. Werden die Anforderungen an die Technik darüber hinaus erhöht, können sie ggf. nicht erfüllt werden. Es besteht jedoch auch in einer qualitätsgesicherten Anlage eine nicht unerhebliche Toleranz gegenüber erhöhten Nutzerwünschen. Die vorhandenen Bandbreiten werden in Kapitel 6.5 näher erläutert. Die QS der Nutzung besteht hauptsächlich aus einer permanenten Aufklärung der Nutzer über den Umgang mit der vorhandenen Technik und einer Darstellung der Komfortgrenzen.

2.2. Relevante statistische Daten

Emissionen und Energieverbrauch

Der Energieverbrauch in Deutschland betrug 1999 etwa 3,8 Millionen GWh (H_U). Dies entspricht einem Rohöl-Äquivalent von 330 Millionen Tonnen. Fast 90 % dieser Energiemenge wurde durch Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt, der Rest aus Kernbrennstoffen und regenerativen Quellen [152]. Die Tendenz des Energieverbrauchs ist trotz stagnierender Wirtschaft und erheblichen Industrieabbaus steigend. Etwa 30 % des emissionsrelevanten Energieverbrauchs entfallen auf den privaten Verbrauch von Energie. Davon wiederum der größte Anteil auf die Beheizung und Trinkwarmwasserversorgung. Auch der Energieverbrauch der Haushalte ist in den vergangenen Jahren trotz umfangreicher Energieeinsparinitiativen stetig gestiegen [152].

Gebäudebestand in Deutschland

Die durchschnittliche Wohnungsgröße im Bestand betrug 1999 rund 84 m², neugebaute Wohnungen waren im selben Jahr 103 m² groß. 1999 wurden noch etwa 473 000 Wohnungen neu errichtet, im Jahr 2001 wurde mit 286 000 neugebauten Wohnungen der Tiefststand seit dem Zweiten Weltkrieg erreicht [152]. Der Gebäudebestand in Deutschland wächst trotzdem. Die verfügbaren Nutzflächen haben sich in den letzten 30 Jahren verdoppelt, bei derzeitigen Zuwachsraten und Abrissraten ist eine erneute Verdopplung des Baubestands in 50 Jahren zu erwarten. Verbunden sind damit steigende Unterhaltskosten (HASSLER in [69]).

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Anzahl der Gebäude und Wohnungen sowie über Flächenanteile.

Gebäudebestand	Anzahl		Fläche	
	[Stück]	Anteil, in [%]	[1000 m ²]	Anteil, in [%]
alle Häuser (1999)	16 583 053	100,0 %	3136660	100,0 %
... Häuser mit einer Wohnung	10 240 332	61,8 %	1210098	38,6 %
... Häuser mit zwei Wohnungen	3 372 869	20,3 %	589822	18,8 %
... Häuser mit drei und mehr Wohnungen	2 969 852	17,9 %	1336754	42,6 %
alle Wohnungen (1998)	37 240 290	--	--	--

Tabelle 2-1 Gebäudebestand und Wohnfläche, 1999 (1998) [152]

Den zahlenmäßig größten Anteil aller Gebäude bilden die Einfamilienhäuser, den größten Flächenanteil die Mehrfamilienhäuser. Für eine Optimierung der Anlagentechnik sind beide Gruppen aus unterschiedlichen Gründen interessant. Die Mehrfamilienhäuser bieten i.d.R. hinsichtlich des Nutzerverhaltens (unterstützt durch die Optimierung der Anlagentechnik) ein höheres Einsparpotential. Dafür sind die Besitzer und Nutzer von EFH i.d.R. einfacher von Optimierungen zu überzeugen, da die Anlage zumeist ihr Eigentum ist und der verminderte Energieverbrauch sich direkt als geldwerter Vorteil bemerkbar macht.

Die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf ist in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten stetig gewachsen. Sie betrug 1950 etwa 16 m²/Person, 1978 etwa 32 m²/Person und beträgt heute etwa 45 m²/Person. Der noch Anfang der 1990er Jahre deutlich sichtbare Unterschied zwischen Ost- und Westdeutschland hat sich stetig vermindert [152]. Der Wohnungsleerstand, vor allem in den neuen Bundesländern, hat sich in den letzten Jahren gleichzeitig dramatisch erhöht. Hier stehen etwa 20 % der Wohnungen, d.h. 1,4 Mio. Wohneinheiten, leer [155].

Beheizung von Gebäuden

Knapp 90 % aller Wohnungen in Deutschland sind mit zentralen Heizsystemen ausgestattet. Hier kann üblicherweise von einer vorhandenen Pumpenwarmwasserheizung ausgegangen werden. Dieser große Anteil kommt für Qualitätssicherungsmaßnahmen der Anlagentechnik in Betracht. Tabelle 2-2 zeigt die Heizungs- und Energieträgerart beheizter Wohnungen.

Beheizungsart	Anzahl der Wohnungen, in [1000 Stück]	Anteil, in [%]	Energieträgerart	Anzahl der Wohnungen, in [1000 Stück]	Anteil, in [%]
Blockheizung und Zentralheizung	22133,5	65,4	Gas	14631,7	43,3
			Heizöl	11491	34,0
			Fernwärme	4429,9	13,1
			Elektrizität (Strom)	1562,1	4,6
Fernheizung	4429,9	13,1	Briketts, Braunkohle	1064,7	3,1
Einzel- oder Mehrraumöfen	4392	13,0	Holz, o. sonst. erneuerbare Energien	381,7	1,1
Etagenheizung	2821,8	8,3	Koks, Steinkohle	216	0,6
ohne Angabe	50,8	0,2	ohne Angabe	50,8	0,2
Gesamt	33828	100,0	Gesamt	33828	100,0

Tabelle 2-2 Wohnungen nach Heizungs- und Energieträgerart, 1998 [152]

Ausgaben im Bereich Bau und Wohnen

Die Kosten für einen Quadratmeter neu gebauter Wohnfläche betragen 1999 etwa 2400 DM. Zu heutigen Preisen kann mit etwa 1200 €/m² gerechnet werden. Damit liegt ein Eck- und Bezugswert bei der Bestimmung für die möglichen Kosten einer Qualitätssicherung im Neubau fest. Im Jahr 1998 gab der durchschnittliche Haushalt in Deutschland bei ausgabefähigen Einnahmen von etwa 5200 DM/Monat monatlich etwa 1000 DM für Miete, 190 DM für Energie und 120 DM für Instandhaltung aus. Auch diese Zahlen geben Anhaltswerte für mögliche Kosten einer Qualitätssicherung im Bestand.

Untersuchungen von RICHTER, HASSLER und KOHLER [69] zufolge beträgt das Instandhaltungsdefizit deutscher Gebäude über 30 %. Das bedeutet, die Investitionen in den Gebäudeerhalt liegen deutlich unter dem Bedarf für die Erhaltung. Gleichzeitig sinken die Haltbarkeiten von Bauten und Anlagen. Es ist langfristig mit steigenden Unterhaltskosten zu rechnen [69].

Beschäftigte und Beschäftigung im Baubereich

Die Baubranche weist unverändert seit mehreren Jahren einen dramatischen Verlust an Arbeitsplätzen auf. Allein zwischen 1998 und 2000 sind im Bereich Hoch- und Tiefbau über 100.000 Arbeitsplätze verloren gegangen, davon etwa 55.000 in der Bauinstallation [152]. Diese Trends haben sich bis in das Jahr 2003 fortgesetzt. Die Situation lässt vermuten, dass für den größtenteils 30 ... 50 Jahre alten Gebäudebestand trotz des immensen Instandhaltungsbedarfes noch kein Markt generiert werden konnte. Hier liegt – das bestätigt die Fachpresse verstärkt seit 2002 – ein großes Beschäftigungspotential. Eine repräsentative Umfrage unter Betrieben der Heizungs-, Lüftungs- und Klimabranche über den Bestandsmarkt ergab, dass 96 % der Unternehmen ihren Umsatz im Bestand ausbauen wollen und 100 % die "Modernisierung" für ihr Unternehmen als wichtig bis sehr wichtig ansehen [5].

Fazit für die QS heute

Der nicht rückläufige Energieverbrauch im Bestand und die ständig wachsende Anzahl von bestehenden Gebäuden und Anlagen, deren Großteil zudem noch saniert werden muss, bilden ein großes Potential für die Qualitätssicherung. Hier liegt ein bedeutender Beschäftigungsmarkt.

2.3. Grundlagen der Qualitätssicherung

Zu den vorhandenen Grundlagen für die Qualitätssicherung der Anlagentechnik zählen Gesetze, Verordnungen und die allgemein anerkannten Regeln der Technik. Letztere umfassen DIN-, EN- und ISO-Normen sowie Richtlinien, Merkblätter und Arbeitsblätter der Berufsvereinigungen. Für die Heizungs-, Klima- und Sanitärtechnik gab es im Jahr 2000 etwa 480 Gesetze und Verordnungen, 1200 DIN-, EN- und ISO-Normen, 170 Technischen Richtlinien und weitere 600 andere Richtlinien und Empfehlungen [83].

Für die Qualitätssicherung der Anlagentechnik sind die in Bild 2-1 benannten rechtlichen und technischen Grundlagen (Gesetze, Verordnungen, Regeln) relevant und werden daher näher untersucht.

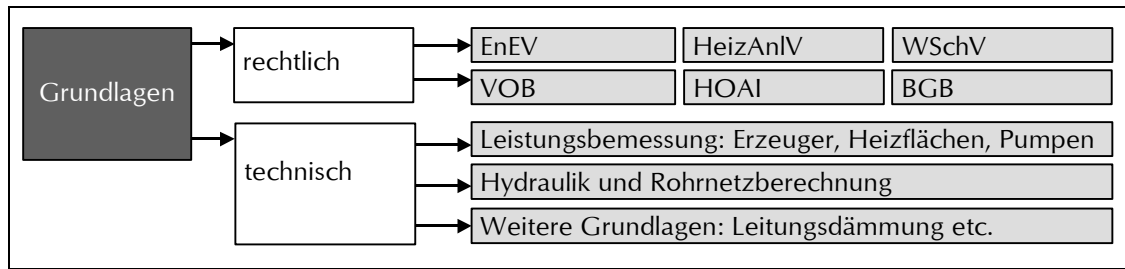


Bild 2-1 Rechtliche und technische Grundlagen der Qualitätssicherung

Heizsysteme im Wandel der Zeit

In Deutschland kam die Warm- und Heißwasserheizung – nach der Einzelheizung und der Dampfheizung – um 1900 auf. Sie wurde zunächst fast ausschließlich als Schwerkraftheizung ausgeführt. Bei der Formulierung wichtiger Planungsgrundlagen der Heizungstechnik war HERMANN RIETSCHEL ("Leitfaden zum Berechnen und Entwerfen von Lüftungs- und Heizungsanlagen", 1893) führend. Die Pumpenwarmwasserheizung ist in Deutschland ab 1930 vereinzelt zu finden, ab Mitte der 1950er Jahre fast ausschließlich. Mit ihrem Auftreten, jedoch spätestens mit der starken Verbreitung der Thermostatventile seit den 1970er Jahren verliert der früher dominierende Systemgedanke der Heizungstechnik zugunsten einer Verbesserung einzelner Komponenten an Bedeutung. Teile älterer Technik – vor allem Rohrnetze – sind noch heute in Betrieb. Im Folgenden werden daher neben den heute geltenden Gesetzen, Verordnungen und Regeln auch die relevanten Grundlagen und Ideen früherer Anlagentechnikkonzepte besprochen.

Eingriffszeitpunkte für die Umsetzung von QS

Werden die Phasen der HOAI herangezogen, ergeben sich für die Umsetzung der Qualitätssicherung im Neubau und Bestand folgende günstige Eingriffsmöglichkeiten:

1. *Grundlagenermittlung*: für den Bestand ergibt sich hier oft das größte Aufgabengebiet.
2. *Entwurfsplanung*: Berechnung und Bemessung aller festgelegten Systeme und Anlagenteile sowie Anlagenbeschreibung. Es besteht ein großes Potential für QS.
3. *Genehmigungs- und Ausführungsplanung*: Fortschreiben und Ergänzen der Berechnungen zur Bemessung.
4. *Objektüberwachung*: Ausführung nach Planung, Leistungsbeschreibungen und -verzeichnissen, allgemein anerkannten Regeln der Technik und einschlägigen Vorschriften sowie die Abnahme. Hier liegt das größte Energieeinsparpotential der QS.

2.3.1. Rechtliche Grundlagen

Relevante Rechtsgebiete

Die wichtigsten Rechtsgebiete, welche die Ausführung von Anlagentechnik betreffen, sind das Bauordnungsrecht, das Immissionsschutzrecht, das Energieeinsparungsrecht und das Gewerbeamt. Nachfolgend ein Auszug von Gesetzen und Verordnungen, welche die Qualitätssicherung von Anlagentechniksystemen berühren.

Energieeinsparungsgesetz EnEG [52]

Das EnEG von 1976 ist die deutsche Ermächtigungsgrundlage für die verschiedenen Verordnungen zur Umsetzung von Energieeinsparung. Für die QS ist § 3 ausschlaggebend, der besagt, dass Anlagentechnik so entworfen, ausgewählt und ausgeführt werden muss, dass "nicht mehr Energie verbraucht wird, als zur bestimmungsgemäßen Nutzung erforderlich ist."

Heizungsanlagenverordnungen HeizAnIV [75]

Die 1. HeizAnIV trat 1978 in Kraft. Novellierungen wurden 1982, 1989 und 1994 rechtsgültig. Die letzte Fassung wurde 2002 von der EnEV abgelöst. Die Heizungsanlagenverordnungen regelten vor allem die Bemessung von Wärmeerzeugern, die Dämmung von Rohrleitungen und die Ausstattung von Anlagen mit zentralen und dezentralen Regelgeräten. Nach HeizAnIV von 1978 durften Wärmeerzeuger im Neubau nur eingesetzt werden, wenn ihre Nennwärmeleistung nach DIN 4701 ermittelt wurde. Für Brennwert- und Niedertemperaturkessel bestand kein Zwang zur Bemessung. Bei der Modernisierung von Wohngebäuden durfte auf die Leistungsbemessung von Wärmeerzeugern verzichtet werden, wenn die Erzeugerleistung 70 W/m² bzw. bei freistehenden Ein- und Zweifamilienhäusern 100 W/m² nicht überschritt.

Der Einbau von Thermostatventilen (THKV) in Neuanlagen ist seit 1978 Pflicht. Ende 1997 lief die letzte Übergangsfrist für die Nachrüstung von THKV und zentraler Regelung (für alle Kesselarten) ab. Die zentrale Regelung umfasst die Verringerung der Wärmezufuhr und die Schaltung von Antrieben z.B. in Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Zeit (witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung). Die Dämmung von Heizungsleitungen und Trinkwarmwasserverteilungen ist seit 1978 vorgeschrieben, die Dämmstärken wurden 1982 um etwa 50 % erhöht. Es gab jeweils zahlreiche Ausnahmeregelungen für die Dämmpflicht. Geringere oder keine Anforderungen bestanden für Leitungen im beheizten Bereich oder für in Bauteilen verlegte Leitungen.

Heizungsbetriebsverordnung HeizBetrV [76]

Die HeizBetrV galt von 1978 bis 1989. Sie schrieb eine monatliche Funktionskontrolle für Anlagen über 50 kW vor. Betreiber von Zentralheizungen ohne automatische Regelung der Wasservolumenströme der Heizkörper mussten nach dem Inkrafttreten bis Ende 1982 und dann in 8-Jahres-Abständen die Voreinstellung der Wasservolumenströme der Heizkörper stichprobenartig überprüfen und ggf. anpassen lassen. Teile der Anforderungen der HeizBetrV wurden zunächst in die HeizAnIV von 1989 und 1994 übernommen, in der EnEV jedoch nicht fortgeschrieben.

Wärmeschutzverordnungen WSchV [208] und TGL

Die erste Wärmeschutzverordnung trat 1977 in Kraft. Sie wurde 1984 und 1995 novelliert und 2002 von der EnEV abgelöst. Sie regelte in ihren ersten beiden Ausgaben das energiesparende Bauen vor allem durch Begrenzung maximaler Wärmedurchgangskoeffizienten für einzelne Bauteile bzw. den Mittelwert für die wärmeübertragende Hülle. Mit der Ausgabe von 1995 wurde der Heizwärmebedarf begrenzt und Wärmebedarfsausweise für den Neubau eingeführt.

Die in der ehemaligen DDR geltenden Normen zur Wärmedämmung von Gebäuden beeinflussten den energetischen Gebäudestandard in den neuen Bundesländern analog zu den WSchV der alten Bundesländer. Die TGL 10686/03 "Bauphysikalische Schutzmaßnahmen, Wärmeschutz, Wärmedämmvermögen" von 1965 wurde 1981 von der TGL 35424/03 "Bautechnischer Wärmeschutz, Wärmeschutz in der kalten Jahreszeit" abgelöst.

Energieeinsparverordnung EnEV [55]

Die EnEV führte am 1.2.2002 die HeizAnIV und WSchV zusammen. Der Nachweis des energie-sparenden Bauens im Neubau erfolgt nun anhand des Primärenergiebedarfs. Für den Bestand sind minimal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten für die Außenbauteile definiert.

Die Aussagen über die Leitungsdämmung wurden sinngemäß fortgeschrieben. Die volle Dämmpflicht besteht prinzipiell nur in unbeheizten Zonen des Gebäudes. Verminderte Anforderungen gelten für Leitungen innerhalb von Bauteilen. Keine Dämmpflicht besteht für Leitungen in oder zwischen beheizten Räumen, wenn deren Wärmeabgabe durch den Nutzer beeinflussbar ist. Es besteht eine befristete Nachrüstplicht für die Dämmung von ungedämmten Leitungen in unbeheizten Bereichen des Gebäudes. Die Ausstattung von Anlagen mit Regelgeräten (zentral und dezentral) bleibt sinngemäß wie in der HeizAnIV erhalten, die Nachrüstung von Bestandsanlagen auf das Neubauniveau muss unverzüglich erfolgen. Die in der HeizAnIV noch schriftlich verankerte Pflicht zur Leistungsbemessung der Wärmeerzeuger nach den Regeln der Technik wurde nicht übernommen.

VOB und BGB

Für öffentliche Auftraggeber gilt die VOB in allen drei Teilen. Für private Auftragnehmer gilt ein Werkvertrag nach BGB bzw. ein VOB-Vertrag nur nach Vereinbarung. Häufig wird in diesem Fall nur VOB/B vereinbart [187], obwohl auch die VOB/C in einen BGB Werkvertrag einbezogen werden kann.

Teil C der VOB fasst die Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) zusammen. Maßgeblich für die QS der Anlagentechnik sind die DIN 18380 für Heizungsanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen [36] sowie die DIN 18421 für Dämmarbeiten an technischen Anlagen. Die ATV definierten unter anderem Haupt- und Nebenleistungen bei der Anlagenplanung und -erstellung. Nebenleistungen müssen nicht gesondert honoriert werden, sie gehören auch ohne Erwähnung im Vertrag zur Leistung. Hierzu zählt unter anderem auch die Prüfung der vom Auftraggeber gelieferten Planungsunterlagen, z.B. der Wärmebedarfsberechnung mit zugehöriger Rohrnetz- und Pumpenauslegung, der Leistungsdaten für Wärmeerzeuger und des Energiebedarfsausweises.

Die VOB/C DIN 18380 bemerkt zur Qualitätssicherung der Heizungstechnik [36]:

- "Die Wärmeleistung der Raumheizflächen ist auf den ... Wärmebedarf auszulegen." (Abschnitt 3.2.10.1) und "... bei Warmwasserheizungen müssen an jeder Raumheizfläche Möglichkeiten zur Begrenzung der Durchflussmenge zum hydraulischen Abgleich vorhanden sein ..." (Abschnitt 3.2.8)

- "Die Bauteile von Heizungsanlagen ... sind so aufeinander abzustimmen, dass die geforderte Leistung erbracht ... und ein sparsamer und wirtschaftlicher Betrieb möglich ist ... Umwälzpumpen, Armaturen und Rohrleitungen sind durch Berechnung so aufeinander abzustimmen, dass auch bei den zu erwartenden wechselnden Betriebsbedingungen eine ausreichende Wassermengenverteilung sichergestellt ist ... Bei Regelventilen, z.B. thermostatischen Heizkörperventilen ... ist Voraussetzung für den hydraulischen Abgleich, dass die Ventile im Verhältnis zum maximal möglichen Differenzdruck ... einen entsprechend hohen Widerstand aufweisen". (Abschnitt 3.1.1)
- "Der hydraulische Abgleich ist mit den rechnerisch ermittelten Einstellwerten so vorzunehmen, dass bei bestimmungsgemäßem Betrieb, also z.B. auch nach Raumtemperaturabsenkung oder Betriebspausen der Heizanlage, alle Wärmeverbraucher entsprechend ihrem Wärmebedarf mit Heizwasser versorgt werden." (Abschnitt 3.5.1)

Die VOB/B regelt weiterhin Mängelansprüche. Diese können 4 Jahre ab Abnahme der Anlage bzw. 2 Jahre bei Anlagen ohne Wartungsvertrag geltend gemacht werden.

HOAI

In der Honorarordnung [81] wird festgelegt, wie Arbeiten in den einzelnen Phasen der Planung und Erstellung eines Gebäudes zu vergütet sind. Die Vergütung der Leistungen der TGA nach Teil IX der HOAI richtet sich nach den Anlagekosten. Die für die QS bedeutsamen Phasen und Aufgaben wurden bereits einleitend in Kapitel 2.3 dieser Arbeit benannt.

Verordnung über Feuerungsanlagen BImSchV und Heizkostenverordnung HeizKoV

In Hinblick auf die QS von Anlagentechnik seien hier noch die BImSchV und die HeizKoV genannt. Erstere regelt unter anderem maximal erlaubten Abgasverluste von Wärmeerzeugern. Die erste HeizKoV [77] trat 1981 in Kraft und wurde mehrfach novelliert. Sie regelt die verbrauchsabhängige Umlage von Kosten der zentralen Heizung und Trinkwarmwasserbereitung.

Fazit für die QS heute

Die geltende EnEV bietet keinen Anreiz für die gesonderte QS der Anlagentechnik. Bis auf die Pflicht der Dämmung – und hier insbesondere von Leitungen im unbeheizten Bereich – werden Belange der Sicherstellung eines energiesparenden Anlagenbetriebs nicht behandelt. Einige Bundesländer fordern daher zumindest für den Neubau eine Fachunternehmererklärung über korrekt umgesetzte Planung. Die VOB/C sollte wegen der positiven Forderungen nach optimierter Planung und Ausführung aber künftig auch in privatrechtlichen Verträgen Verwendung finden. Einen Anreiz zur Durchführung einer QS liefert die VOB in der geltenden Fassung jedoch nicht, da die Frage der Vergütung nicht geklärt ist. Auch die Regelungen der Vergütung wie sie in der HOAI vorgeschlagen werden – Bezahlung nach Anlageninvestitionskosten – sind für eine (nachträgliche) Qualitätssicherung nicht tragbar. Hier müssen andere Vergütungsmaßstäbe gefunden werden. Die Arbeit macht in Kapitel 8 Vorschläge dazu.

2.3.2. Technische Regeln zur Leistungsbemessung der Heizung

Die optimale Leistungsbemessung der Heizflächen und des Wärmeerzeugers ist ein grundlegender Bestandteil der QS. Sie richtet sich nach dem Wärmebedarf (übliche Bezeichnung nach alter Norm) oder besser der nach Heizlast (neue Bezeichnung) der Räume und des Gebäudes. Ein kurzer Abriss der Auslegungsgrundsätze folgt.

DIN 4701 – Ausgaben 1929, 1944/47 und 1959

Die erste Ausgabe der Norm von 1929 enthält neben der Berechnung des Wärmebedarfs auch die Heizkörper- und Kesselbemessung. Diese wurden ab der zweiten Ausgabe 1944/47 [38] in andere Normen ausgegliedert. Bis zur Ausgabe von 1959 blieb der Berechnungsgang nahezu identisch, nur einzelne Randwerte für die Berechnung wurden dem Stand des Wissens angepasst. Die 1959 berechneten Heizlasten sind leicht geringer als die Werte von 1944/47.

Für jeden Raum wurde der Transmissionswärmeverlust anhand der Innenflächenmaße bestimmt. Auf diesen wurden Zuschläge für die Lage (+5 ... -5 % je nach Himmelsrichtung der Ausrichtung, 7 ... 40 % für den Windanfall) und unterbrochenen Betrieb (0 ... 30 % als Leistungsreserve nach Betriebsunterbrechungen und zum Ausgleich kalter Wandflächen) gewährt. Bei der Wärmeerzeugerbemessung gab es zusätzliche Sicherheiten von 5 ... 15 % für das Verteilsystem sowie 10 ... 20 % auf den Gebäudewärmebedarf für das Anwärmen von Eisen- und Wassermassen.

Die Berechnungen von 1959 ergeben etwa 20 ... 30 % höhere Normleistungen verglichen mit der Ausgabe der Norm von 1983/89, da umgerechnet mit höheren Ansätzen für den Luftwechsel und größeren Zuschlägen für Räume mit kalten Wandflächen sowie niedrigeren Außentemperaturen gerechnet wird [185].

DIN 4701 – Ausgabe 1983/89

Die Ausgabe der DIN 4701 von 1983 [39] erfolgte zunächst in zwei Teilen und brachte zahlreiche Änderungen mit sich. Da die Bauschwere bei der Berechnung berücksichtigt wird, ergeben sich im Mittel etwa 2 K geringere Temperaturdifferenzen (innen – außen) für die Bemessung. Es wird eine Teilbeheizung der Nachbarräume bei der Berechnung der Raumheizlasten, jedoch nicht bei der Gebäudeheizlast, berücksichtigt. Die Werte für die Fugenlüftung sind geringer als bei den früheren Normausgaben, weil geringere Windgeschwindigkeiten angesetzt werden. Neu ist die Berücksichtigung von Lüftungsanlagen bei der Berechnung der Lüftungsheizlast sowie die Definition eines hygienischen Mindestluftwechsels (i.d.R. $0,5 \text{ h}^{-1}$). Ein Gleichzeitigkeitsfaktor für die Lüftung wird bei der Wärmeerzeugerbemessung berücksichtigt. Bei der Heizflächenbemessung kann ein weiterer Sicherheitszuschlag von 15 % pauschal gewährt werden, wenn der Wärmeerzeuger die Vorlauftemperatur im Bedarfsfall nicht steigern kann. Diese Option ist mit dem nachträglich in Kraft getretenen Teil 3 der DIN 4701 möglich, der verabschiedet wurde, weil es in der Praxis wegen der knappen Leistungsbemessung zur Unterversorgung kam.

TGL 26760

Die TGL 26760 normte die Heizlastberechnung (hier Heizlast, nicht Wärmebedarf) in der ehemaligen DDR. Sie weist ähnliche Ansätze wie die DIN 4701 auf.

EN 12831

Ab voraussichtlich Oktober 2004 wird die DIN 4701 endgültig durch die europäische Norm EN 12831 [50] ersetzt. Es ergeben sich wiederum grundlegende Änderungen. Zunächst wird der Innenmaßbezug für die Flächen in einen Außenmaßbezug in Anlehnung an den Wärmeschutznachweis geändert. Die Außentemperaturkorrektur aufgrund der Bauschwere entfällt, damit sind die Bezugsaußentemperaturen wieder niedriger.

Die Heizlast berechnet sich aus den Anteilen für Transmission, Lüftung sowie einem optionalen Zuschlag für die Wiederaufheizung nach Absenkephasen. Dieser Zuschlag wird sowohl auf die Raumheizlast, als auch – in gleicher Höhe – auf die Gebäudeheizlast gewährt. Er richtet sich nach der Bauschwere, dem zulässigen Temperaturabfall im Gebäude und der maximalen Wiederaufheizzeit. Für ein mittelschweres Gebäude mit einer zulässigen Auskühlung von 2 K und einer Wiederaufheizung innerhalb einer Stunde ergibt sich beispielsweise ein Zuschlag von etwa 22 W/m² bezogen auf die Grundfläche. Die Bandbreite reicht von 2 bis etwa 45 W/m².

Die Transmissionswärmeverluste werden unter Berücksichtigung der Wärmebrückeneffekte bestimmt. Auf die Wärmedurchgangskoeffizienten von Einzelbauteilen werden bei der detaillierten Berechnung Zuschläge von 0 ... 0,34 W/(m²·K) angesetzt. Für das vereinfachte Verfahren ist ein Zuschlag von 40 % vorgesehen. Diese Werte sind besonders für bestehende Gebäude sehr hoch. Temperaturen in Nachbarräumen werden geringer als nach DIN 4701 angenommen. Beispielsweise ist für beheizte und unbeheizte Räume in angrenzenden Nachbargebäuden die mittlere Außentemperatur maßgeblich. Der Ansatz für die Berechnung der Lüftungsverluste wurde unter anderem dahingehend verändert, dass die Dichtheit des Gebäudes (n_{50} -Wert) zur Berechnung herangezogen wird. Aufgrund der geänderten Randbedingungen wird die Heizlast der Räume und vor allem des Gebäudes nach eigenen Abschätzungen deutlich über den Werten nach DIN 4701 liegen.

Wahl von Heizflächen

Grundlage für die Bemessung der Heizflächen ist die nach den geltenden Normen bestimmte Raumheizlast. Für die Wahl des Temperaturniveaus und der Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur gibt es keine verbindlichen Normen. Die Empfehlungen der Vergangenheit gingen überwiegend von Herstellern der entsprechenden Komponenten aus. So verminderte sich die empfohlene Auslegungstemperaturpaarung für Heizkörperheizungen von 90/70 °C (etwa 1930 bis Mitte der 1970er Jahre) über 70/55 °C (Niedertemperaturtechnik) bis etwa 55/45 °C (Brennwerttechnik). Die installierten Heizflächen verminderten sich nicht proportional zur Heizlast. Die zitierten Empfehlungen gehen von gleicher Spreizung für alle Heizflächen aus, so dass sich an jedem Heizkörper annähernd die gleiche Rücklauftemperatur einstellt. Es besteht freie Wahl der Breite, Höhe und Tiefe des Heizkörpers.

Dem gegenüber steht die Richtlinie VDI 6030 [170]. Sie legt die Heizkörpergröße anhand der Fensterbreite und Brüstungshöhe fest. Die Übertemperatur des Heizkörpers wird durch eine Strahlungsbilanz bestimmt, wobei der "Strahlungsentzug" kalter Außenflächen durch die "Strahlungslieferung" des Heizkörpers kompensiert wird. Die raumweise variable Rücklauftemperatur

ergibt sich aus der geforderten Übertemperatur und der innerhalb einer Bandbreite festgelegten Vorlauftemperatur. Eine passende Bautiefe des Heizkörpers wird so gewählt, dass der Heizkörper die Raumheizlast deckt. Das Problem liegt in oft nicht verfügbaren verschiedenen Bautiefen (z.B. bei Radiatoren). SPROTEN [4] – selbst Mitglied des Richtlinienausschusses – kritisiert, die Richtlinie sei wegen "zweifelhafter Überdimensionierung der Heizflächen" für das ausführende Handwerk keine Regel der Technik. Eine zugehörige Broschüre des BDH wird daher über den Fachverband SHK in Nordrhein-Westfalen nicht mehr verbreitet [4].

Wahl von Wärmeerzeugern und Pumpen

Wärmeerzeuger werden nach der Gebäudeheizlast bemessen, wobei es keine verbindlichen Vorschriften gibt. Es müssen angemessene Zuschläge für die Trinkwarmwasserbereitung gemacht werden. Die im Jahr 2002 außer Kraft getretene VDI 3815 [169] legte ein Vorgehen zur Bemessung von Wärmeerzeugern im Bestand fest. Für die Leistungsbemessung von Pumpen ist eine Rohrnetzrechnung notwendig, für die es keine verbindlichen Normen gibt.

Fazit für die QS heute

Der wissenschaftliche Hintergrund der Heizlastberechnung hat sich ständig erweitert. Der Aufwand stieg derart an, dass eine Bemessung ohne Computer heute undenkbar erscheint. Die Lasten der Gebäude werden immer kleiner und die dynamischen Heizfälle nehmen tendenziell zu. Die Heizflächen- und Wärmeerzeugerwahl passt sich diesen veränderten Randbedingungen an. EN 12831 und VDI 6030 reagieren mit Sicherheitszuschlägen. Die installierten Massen bleiben jedoch annähernd gleich. Trotzdem muss davon ausgegangen werden, dass nur ein geringer Teil der heutigen Wohngebäude einer Heizlastberechnung unterzogen wird oder worden ist.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Leistungsbemessung nach DIN 4701-1 und 2 (1983) vor Inkrafttreten des dritten Teils, d.h. ohne 15 % Zuschlag auf die Raumheizflächen, etwa das rechnerische Minimum für die Heizlast bedeutet. Sowohl mit den Normausgaben der früheren Ausgaben der Heizlastberechnung als auch mit der neuen europäischen Norm ergeben sich größere Normleistungen, also installierte Heizkörperflächen und Wärmeerzeugerleistungen. Für die QS bedeutet dies, dass die untere Leistungsgrenze für einen behaglichen Betrieb abgesteckt werden kann. Sie liegt geringfügig oberhalb der Normwerte von 1983.

2.3.3. Technische Regeln zu Rohrnetzrechnung und Hydraulik

Die Dimensionierung von Leitungsnetzen für die Trinkwarmwasserversorgung wird in DIN 1988 erläutert, die Auslegung von Zirkulationsnetzen wird durch das DVGW-Arbeitsblatt W553 ergänzt. Diese Regeln sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vertieft werden.

Zur Rohrnetzrechnung und der Vorgehensweise eines hydraulischen Abgleichs in der Heizungstechnik gibt es keine verbindlichen DIN-Normen oder Richtlinien. Die VDI 2073 [163] behandelt zwar hydraulische Schaltungen in heiz- und raumluftechnischen Anlagen, jedoch nicht die konkrete Vorgehensweise beim hydraulischen Abgleich. Als Regeln der Technik gelten dementsprechend Veröffentlichungen in der Fachliteratur. Die Entwicklung dieser Regeln für den hydraulischen Abgleich und die Rohrnetz Bemessung werden nachfolgend kurz umrissen.

RECKNAGEL [120] berechnet bereits in den *1920er Jahren* vorwiegend Schwerkraftheizungen. Der Rechengang der Rohrnetzberechnung ist im Prinzip identisch mit der heutigen Vorgehensweise. Es werden Druckverluste über gerade Rohre und Einzelwiderstände bestimmt. Es wird auch der Verlust an Schwerkraftdruck aufgrund der Rohrwärmeabgabe berücksichtigt. Die Rohrdämmung wird so empfohlen, dass sich im Vor- und Rücklauf gleiche Wärmeverluste ergeben. Für die manuelle Kesselregelung (durch den Heizer) wurden Vorlauftemperaturen je nach Außentemperatur tabelliert – eine Vorstufe der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung [120].

Ab den *1930er Jahren* werden Probleme eines fehlenden hydraulischen Abgleichs, d.h. ungleichmäßige Wiederaufheizung der Räume nach einer Abschaltung, angesprochen. RESCHKE beschreibt das Problem der Über- und Unterversorgung durch schlechte Hydraulik [149]. Die noch heute übliche Theorie von Rohrnetz- und Pumpenkennlinie ist bekannt (H,Q -Diagramm). STAMMINGER beschreibt den hydraulischen Abgleich mit Hilfe der gleichen Rohrlängen nach Tichelmann bzw. den Abbau von Überschussdruck durch voreinstellbare Ventile [148].

Grundlagenwerke zur Hydraulik behandeln Anfang der *1950er Jahre* die Schwerkraft- und die Pumpenheizung noch immer parallel, da Pumpenheizungen noch nicht wirtschaftlich sind. Das Problem der ungleichmäßigen Wärmeverteilung ist noch ungelöst, weil der Drucküberschuss nicht mit den vorhandenen Bauteilen weggedrosselt werden kann [196]. Mitte der *1960er Jahre* beschreibt RAIß [128] im Standardwerk "Rietschel/Raiß" die Theorie des hydraulischen Abgleichs in Pumpenheizungen. Zusätzliche Druckverluste werden durch geeignete Wahl von Rohrdurchmessern erzeugt oder Handventile mit voreinstellbaren Zusatzdrosseln eingesetzt. Um die Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können, bestand praktisch ein Zwang, Netze hydraulisch abzugleichen. Die heute noch übliche Rohrnetzberechnung etabliert sich [128].

Mit dem Aufkommen des Thermostatventils in der Praxis der Pumpenwarmwasserheizung verbreitete sich die Ansicht, eine Einregulierung der Volumenströme sei nicht mehr nötig. Diese Aufgabe würden die Ventile übernehmen. Aufgrund zahlreicher Probleme mit der Nachrüstung von THKV in bestehende Anlagen erscheinen Ende der *1970er Jahre* eine Reihe von Publikationen über die Möglichkeiten und die Vorgehensweise eines Thermostatventilaustausches.

In den *1980er Jahren* setzt sich die wissenschaftliche Rohrnetztheorie – Verschaltung von hydraulischen Widerständen analog der Elektrotechnik – durch [129]. Es kommen rechnergestützte Modelle für die Berechnung zum Einsatz. Zahlreiche Planungsregeln für die Wahl von Thermostatventilen werden abgeleitet. Da die Theorie sehr komplex ist, die Anlagentechnik aber auch ohne Rohrnetz bemessung funktioniert, setzt sich der hydraulische Abgleich in der Praxis nicht durch. PANZHAUSER [185] beurteilt 1986 das Erscheinungsbild von Mehrfamilienhäusern: etwa 10 % der Räume sind untertemperiert, 20 % übertemperiert, es ist also kein hydraulischer Abgleich vorhanden. Auch ungedämmte Leitungen seien – trotz geltender Heizungsanlagenverordnung – an der Tagesordnung [185].

In der Ausbildung des Fachhandwerks werden die hydraulischen Zusammenhänge – auch wegen fehlender technischer Regeln – nur unzureichend oder falsch behandelt [2]. So verwundert

es nicht, wenn BACH Mitte der *1990er Jahre* feststellt, dass die meisten Netze in der Praxis nach Erfahrungswerten berechnet sind – also eine genaue hydraulische Berechnung ein Ausnahmefall ist [181].

Fazit für die QS heute

Die detaillierte Bemessung von Rohrnetzen in Wohnbauten ist trotz vielseitiger Planungsmöglichkeiten am Computer und einer über 100 Jahre stetig weiterentwickelten Theorie in der Praxis nicht weit verbreitet. Dies könnte sich ggf. ändern, wenn es verbindlichen Normen gäbe und ein entsprechender Rechtszwang sowie eine angemessene Honorierung vorhanden wären.

2.3.4. Weitere Technische Grundlagen

Leistungsbemessung für Warmwassersysteme

Die Leistungsbemessung für Trinkwarmwassersysteme kann nach verschiedenen Ansätzen erfolgen: nach Verbrauchskurven, Leistungskennzahlen oder mit Hilfe von Gleichzeitigkeitsfaktoren. Durchgesetzt hat sich das Verfahren der DIN 4708 [40], das anhand von Leistungskennzahlen sowohl die Erzeugerleistung als auch die Speichergröße für die Trinkwarmwasserbereitung im Wohnungsbau bestimmt.

Wärmedämmung der Anlagentechnik

Die Wärmedämmung von Anlagentechnik wird je nach Bauteil in verschiedenen Regelwerken behandelt. Die Dämmung von wärmeführenden Rohrleitungen der Heizung und Trinkwarmwasserbereitung wird in der EnEV geregelt. Die VDI 2055 enthält Formeln zur Berechnung der Wärmeverluste von Rohrleitungen, jedoch keine Mindestwerte für Dämmdicken [159]. Diese sind beispielsweise in der EnEV und in EN 12828 [42] festgelegt. Für die Dämmung von Speichern gelten je nach Speicherprinzip verschiedene DIN-Normen. Es gibt weitere Regelwerke für die Dämmung von Komponenten, auf die an dieser Stelle nicht vertieft eingegangen wird.

Die von RAISCH [149] auf dem Kongress für Heizungs- und Lüftungstechnik 1935 über den Wärmeschutz in Heizungsanlagen gemachten Aussagen erweisen sich auch fast 70 Jahre später noch immer als zutreffend: "Wärmeschutz hat keine große Bedeutung. Die Heizungsbranche begründet, daß die bei den Heizungskesseln und Rohrleitungen auftretenden Wärmeverluste nicht als solche gelten können, da sie doch als Heizungswärme den Bauten und Räumen zugute kommen ... es ist, vom technischen Standpunkt aus gesehen, unrichtig, die Wärme irgendwo ohne eine Regelungsmöglichkeit austreten zu lassen, wenn diese wie Heizkörper wirkenden Stellen nicht während der ganzen Heizzeit und in immer gleichmäßiger Stärke Wärme abgeben sollen ... Aus Kreisen der Wärmeschutztechnik wird immer wieder der Vorwurf erhoben, daß die Auswahl der Abdämmung von Heizungsanlagen selten nach Wirtschaftlichkeit erfolgt, sondern für die Ausführung nur der Preis maßgebend ist" [149].

Anweisungen für den Bau von Anlagentechnik von 1955 [27]

Basis der heutigen AMEV-Richtlinien zur Ausführung und zum Betrieb von Anlagen sind die "Anweisungen für den Bau von HLW-Anlagen (Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung)", z.B. in der Ausgabe von 1955. Sie forderten eine QS, die in dieser Art und Weise heute nicht

mehr zu finden ist. Für öffentliche Gebäude musste bereits im Vorentwurf ein Konzept für die Anlagentechnik incl. verbindlicher Kostenabschätzung vorliegen.

Die Höhe der Vergütung für die Wärmebedarfsberechnung musste vor der Auftragserteilung vereinbart werden. Berechnungen für den Wärmebedarf, Kessel, Schornstein, Heizkörper, Lüftungsanlagen sowie eine Brennstoffbedarfsrechnung mussten im Rahmen der Planung durchgeführt und bei Bauantragstellung vorgelegt werden. Die Wärmebedarfsberechnung war nach Fertigstellung des Baus unter Berücksichtigung von Änderungen zu berichtigen. Bei der Abnahme wurde geprüft, ob die Heizkörper gleichmäßig warm werden. Die Wärmedämmung für Behälter und Rohre war nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu berechnen und anzugeben. Rohrnetzberechnung und hydraulischer Abgleich waren nicht explizit vorgeschrieben, jedoch durch die Forderung einer gleichmäßig warmen Heizungsanlage indirekt impliziert [27].

Abnahme und Inbetriebnahme von Anlagen

Für die Inbetriebnahme von Heizungs- und Warmwasseranlage zum Zeitpunkt der Abnahme eines Gebäudes fordert die Richtlinie VDI 3809 unter anderem die vollständige Dokumentation durch Zeichnungen, wärmetechnische Berechnungen nach DIN 4701 mit Bemessung der Heizflächen, die Schornsteinauslegung nach DIN 4705, die Rohrnetz- und Ventilauslegung, Datenblätter und Beschreibung der Anlage, Protokolle, Prüfbescheinigungen und Verträge [119] [168].

2.3.5. Umgang mit Anlagentechnik im Bestand

Für die Bemessung der Leistung und Fragen der Hydraulik bestehender Anlagentechnik gelten prinzipiell die gleichen Vorschriften und Regeln wie für den Neubau. Größtes Problem für die nachträgliche QS bzw. die Anwendung der Planungsnormen des Neubaus auf den Bestand ist die Erhebung der bestehenden Daten. Sind diese detailliert bekannt, kann eine konventionelle Heizlastberechnung oder Rohrnetzberechnung durchgeführt werden.

Um die Datenerhebung zu vereinfachen und kostengünstiger zu gestalten, sind für den Bestand Verfahren zur vereinfachten Heizlastberechnung und Rohrnetzoptimierung notwendig. Zur überschlägigen Bestimmung der Heizlast sind in der Literatur mehrere praktikable Ansätze veröffentlicht [192] [203]. Die Vorschläge zur überschlägigen Rohrnetzberechnung sind jedoch oft sehr wage [28] [83]. Viele Autoren beschränken sich auf die Aussage, dass eine überschlägige Berechnung notwendig ist, Hilfen für die praktische Umsetzung fehlen jedoch. Einzelne Lehrbücher halten die Rohrnetzberechnung im Gebäudebestand für unmöglich. Ein Überblick über wichtige bestehende Ansätze in der Fachliteratur folgt in Kapitel 5.3.1.

Fazit für die QS heute

Die vorhandenen Verfahren zur Planung im Bestand weisen mehr oder minder praktikable Ansätze auf. Es mangelt an Standardwerken und verbindlicher Anwendungspflicht. Die vorliegenden Ansätze für die Leistungsanpassung und den hydraulischen Abgleich im Neubau müssen daher in Richtung Bestandsbewertung weiterentwickelt werden. Ein mögliches Verfahren ist in [88] veröffentlicht.

2.4. Hemmnisse bei der Umsetzung von Qualitätssicherung

Die fehlende Umsetzung von QS in der Praxis hat vielfältige Ursachen, zu verwandten Fragestellungen sind Fachaufsätze veröffentlicht worden. USEMANN definiert beispielsweise verschiedene Problemfelder bei Sanierungen [176], REIß beleuchtet Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen [53]. Auf Basis dieser und anderer Quellen sowie eigener Erfahrungen sollen die wichtigsten Randbedingungen und Hemmnisse bei der Umsetzung von QS im Folgenden näher beleuchtet werden, eine Übersicht gibt Bild 2-2.

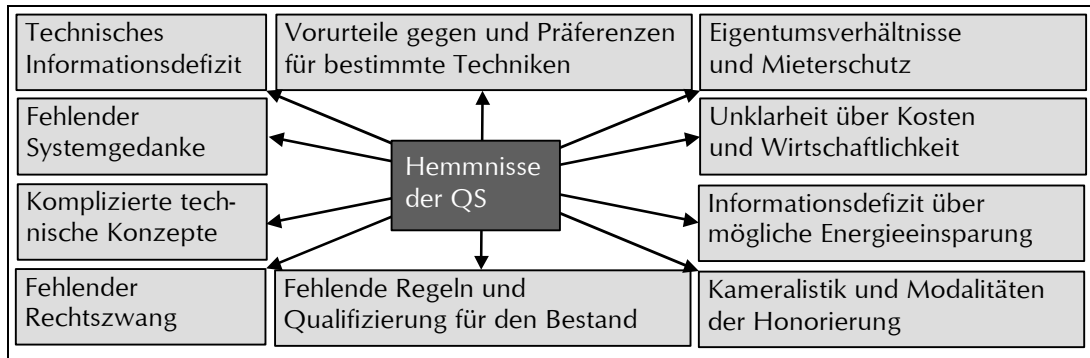


Bild 2-2 Hemmnisse der Qualitätssicherung

Technisches Informationsdefizit

Die mangelnde Information aller Beteiligten (Planer, Handwerk, Auftraggeber/Investor, Nutzer, Eigentümer) über Konsequenzen einer erfolgreichen oder unterlassenen Qualitätssicherung hemmt deren Umsetzung. Die Anlagentechnik funktioniert auch ohne QS, wenn auch energetisch und wirtschaftlich suboptimal. Es besteht also für Planer und Ausführende kein (technischer) Zwang, sich mit hydraulischen Zusammenhängen zu befassen, wie es zu Zeiten der Schwerkraftheizung üblich und funktionsrelevant war. So sieht das Fortbildungskonzept eines Pumpenherstellers [197] die Optimierung von Heizungsanlagen heute als reine Mängelbekämpfung, nicht als Ursachenforschung. Es wird geschätzt, dass bei mehr als 80 % der Anlagen die Hydraulik, die Druckhaltung und Entlüftung nicht korrekt funktionieren [197].

Die Meinung der Fachwelt über den hydraulischen Abgleich gibt LEUSCHNER kritisch wieder: der "hydraulische Abgleich wird von allen fachlichen Beteiligten in der Theorie gefordert und in der Praxis nach Möglichkeit umgangen" [175]. Diese Aussage beschreibt die Situation der Qualitätssicherung im Allgemeinen. LEUSCHNER stellt weiterhin fest, dass der hydraulische Abgleich unpopulär ist und dem Kunden als nicht sinnvoll, nicht notwendig und nicht bezahlbar erscheint [171]. Diese Meinung des Fachhandwerks schlägt sich in der Kundenberatung nieder, so dass die Verbraucherzentralen Informationskampagnen für den hydraulischen Abgleich starten [187].

Fehlender Systemgedanke

Eine Nebenerscheinung des technischen Informationsdefizits ist die fehlende Systemplanung und -ausführung technischer Anlagen. Dies gilt gleichermaßen für das Zusammenspiel der technischen Komponenten in der Anlage als auch für die Abstimmung der Gewerke untereinander. REIß [53] beklagt das Informationsdefizit, dass sich aus der Produktdarstellung der Hersteller

ergibt. Es wird der Eindruck erweckt, allein neue Komponenten verhelfen dem Gebäude zu einem optimal abgestimmten Anlagensystem. Fachhandwerker sind mit der rasanten Produktentwicklung überfordert und handhaben die Umsetzung nach altbekannten Grundsätzen (da der "Handwerker nur macht, was er kennt"). Auch Planern fehlt fächerübergreifendes Wissen [53].

Die integrierte Planung mit Abstimmung der Gewerke untereinander hat sich zum großen Teil noch nicht durchsetzen können [15]. POSERT stellt fest, dass die Um- und Nachrüstung praktisch gänzlich am Planer vorbeigeht [177].

Vorurteile gegen und Präferenzen für bestimmte Techniken

"Energieeinsparung hat in Deutschland kein Image", erklärt REIß [53]. Dies trifft auch auf die QS zu. Während die Investition in regenerative Energien zum Prestigeobjekt ausgebaut werden kann, bleibt die QS für jeden Außenstehenden unsichtbar. Schon konventionelle Einsparmaßnahmen wie erhöhter Wärmeschutz oder der Kesselaustausch – die selbst wenigstens eine Lobby unter den Fachhandwerkern besitzen – haben mit geringer Akzeptanz in Nutzerkreisen zu kämpfen. Für die QS sieht die Lage ungleich schlechter aus. Vorurteile und Unsicherheiten gegenüber energieeinsparenden Maßnahmen sind viele Jahre nach der Einführung in den Markt noch immer aktuell. So berichtet SCHOLER beispielsweise noch 1996 über die Ablehnung von Thermostatventilen; trotz mündlicher und schriftlicher Einweisung erfolgte die Temperaturregelung durch Ablüften [173]. Hier ist in der Praxis noch Aufklärungsarbeit zu leisten.

Komplizierte technische Konzepte

Komplizierte technische Konzepte vermindern die Akzeptanz von Energiespartechiken in Fachkreisen und in der Bevölkerung. Weil die QS – vor allem im Bestand – von Fachunternehmen als schwierig angesehen wird, wird sie oft unterlassen. Dabei ist eine korrekt geplante Hydraulik und Regelung die Grundlage für alle einfachen und komplizierten technischen Konzepte.

Ein bezeichnendes Beispiel ist der Bericht über die Anlaufschwierigkeiten einer komplizierten Gebäudeversorgung mit mechanischer Lüftung und Solartechnik [173]. Die Energieeinsparprognosen konnten zunächst nicht erfüllt werden. Trotz technischer und wissenschaftlicher Begleitung musste massiv nachgebessert und nach Fehlern gesucht werden [173]. In der normalen, unbegleiteten Praxis wäre dieser Aufwand vermutlich nicht betrieben worden, da die Anlage ja funktionierte. Höchstens die Symptome wären bekämpft worden.

Fehlende technische Regeln und Qualifizierung für den Bestand

Energieeinsparung durch QS ist ein Markt für Anlagen im Bestand. Die Gebäude aus den Nachkriegsjahren sind vielfach bereits baulich modernisiert oder eine Sanierung steht bevor. Hier könnte flächendeckend eine Optimierung der Anlagentechnik vorgenommen werden. ARENDT [180] bemerkt aber noch 1990 sehr treffend, dass es im Normenwerk und in der Lehre prinzipiell keinen "Altbau" gibt. Normen gehen von Neubau aus. Bildung im Bereich der Bestandsaufnahme fehlt in Deutschland. Die Lehre hängt 10 ... 20 Jahre hinter der praktischen Erkenntnis her [180].

Es gibt nur wenige praktikable Quellen, die sich mit der umfassenden Optimierung von Anlagensystemen im Bestand befassen. Ansätze aus der Fachliteratur kapitulieren oft vor dem Problem,

nicht zuletzt wegen fehlender Gebäudedaten. So verwundert auch OSWALDS [69] Aussage nicht, dass Architekten, Ingenieure und Handwerker es nicht gewohnt sind, sich zunächst mit der Substanz des Bestehenden zu beschäftigen, um anschließend über angemessene Maßnahmen zu entscheiden [69].

Informationsdefizit über Energieeinsparungen, Kosten und Wirtschaftlichkeit

Über die Auswirkungen fehlender bzw. den Erfolg durchgeführter Qualitätssicherung der Anlagentechnik liegen nur wenige belastbare Studien vor. Vorhandene Untersuchungen behandeln vielfach nur die bauliche Optimierung und resultierende Energieeinsparungen (z.B. [71] [123]). Derzeit muss von einem Informationsdefizit aller Beteiligten über mögliche Ersparnisse durch QS ausgegangen werden. Da Energieeinsparung neben den Gesichtspunkten des Klimaschutzes, der für den Einzelnen oft nicht greifbar ist, vor allem wirtschaftliche Bedeutung hat, ist das Wissen über die eingesparten Energiekosten sowie die notwendigen Investitionskosten bedeutsam. In der Regel kennen Gebäudenutzer jedoch nicht einmal den eigenen Energieverbrauch.

REIß [53] benennt – wie viele andere – vor allem die zu geringen Energiepreise als Bremse von Einsparmaßnahmen. Die externen Folgekosten der verbrauchsabhängigen Emissionen tragen zudem indirekt alle Bürger [53]. Ein weiteres Hemmnis ist das Absatzdenken der Energieversorger. Diese stehen einer Energieeinsparung i.d.R. nur dann positiv gegenüber, wenn sie ihr Marktfeld im gleichen Maße auf andere Bereiche ausdehnen können. Für sie wird die QS interessant, wenn sie die Energieversorgung als Dienstleistung zur Bewirtschaftung von Flächen und nicht zur Abrechnung von verbrauchten Kilowattstunden verkaufen können.

Die Planungskosten von QS sind derzeit nicht oder nur schwerlich abschätzbar. Die Planungsleistungen einer Modernisierung entsprechen in der Abfolge etwa denen eines Neubaus, sind aber sehr viel aufwendiger [28]. HÖH sieht als eines der Hauptprobleme für Baumaßnahmen im Bestand, dass die HOAI dem extrem hohen Aufwand für die problemgerechte Ermittlung der Planungsgrundlagen auch mit dem Umbauschlag für Sanierungen nicht gerecht wird [180]. POSERT fordert klar, dass Planungsleistungen im Bestand getrennt zu vergüten oder Anlagenbetreiber über die negativen Folgen unterlassener Planung schriftlich hinzuweisen sind [177].

Hinzu kommt, dass beispielsweise die Durchführung des hydraulischen Abgleichs bisher als Nebenleistung aufgeführt wurde und auch mit der Neuausgabe der VOB/C ATV [36] noch immer nicht klar geregelt ist, wer die Berechnung durchzuführen hat. Der Ausführende hat die Pflicht der Überprüfung der Planungsvorgaben.

Eigentumsverhältnisse und Mieterschutz

Eingriffe in bestehende Gebäude, die sich im Besitz von Eigentümergemeinschaften befinden, unterliegen erschwerten Bedingungen. Hier müssen – auch bei Optimierungsmaßnahmen – Mehrheitsentscheidungen getroffen werden, bevor Investitionen getätigt werden. Das Vermieter-Mieter-Problem mit den Kosten und dem Nutzen der Energieeinsparung ist bei der anlagentechnischen QS ebenso vorhanden wie bei allen Energieeinsparinvestitionen. Der Eigentümer bzw. Vermieter trägt die Investitionskosten und der Mieter hat den Nutzen, die verminderten Energiekosten [91].

Bei Durchführung von QS im vermieteten Wohnbau muss mit verstärkten negativen Reaktionen, z.B. von Mieterschutzvereinigungen, gerechnet werden. Dies zeigen Erfahrungen aus parallel zu dieser Arbeit begleiteten Projekten. Wenn die vorher möglichen überhöhten Raumtemperaturen (über 25 °C) nach der QS nicht mehr erreicht werden können oder dauerhaft geöffnete Fenster zur Raumauskühlung führen, kommt es zu Mieterbeschwerden. Diese können im schlimmsten Fall eine Optimierung nachträglich verhindern.

Kameralistik und Modalitäten der Honorierung

Öffentliche Investitionen, z.B. in Qualitätssicherung, werden in der Praxis durch die Teilung des Haushaltes nach dem kameralistischen Prinzip in den Vermögens- und Verwaltungshaushalt behindert. Auch die heute übliche Honorierung für Architekten und Ingenieure (HOAI) nach den Investitionskosten spricht gegen die Planung optimierter Gebäude. Der Gesamtkostengedanke fehlt in beiden Systemen.

Fehlender Rechtszwang

Obwohl die Regeln der Technik (incl. VOB) den hydraulischen Abgleich, korrekte Dimensionierung und andere Punkte der QS ausdrücklich fordern, wird in der Praxis der Rechtszwang so gering angesehen, dass sie dennoch unterlassen werden. Vermutlich, weil die Anlage auch ohne QS technisch funktioniert. Es sei darauf hingewiesen, dass eine zivilrechtliche Klage der Nutzer wegen "Unwirtschaftlichkeit" auch im Nachhinein nicht ausgeschlossen ist.

Mit der Einführung der Energieeinsparverordnung hat das Bundesland Schleswig-Holstein den Rechtszwang zumindest für den Neubau erhöht: der Fachhandwerker muss bei Fertigstellung des Gebäudes eine Fachunternehmererklärung unterschreiben, in der er auch den hydraulischen Abgleich bestätigt [157].

2.5. Praktische Umsetzung von QS

Die Umsetzung einer Qualitätssicherung am Bau gewinnt in den letzten Jahren stärker an Bedeutung. So wird seit mehreren Jahren in Neubauprojekten eine bauliche Qualitätssicherung, z.B. in Form der Luftdichtheitsmessung und Wärmebrückenoptimierung, durchgeführt. Zumindest die Luftdichtheitsmessung hat sich über die Stufe der begleiteten Feldprojekte hinaus mittlerweile flächendeckend am Markt etabliert. Für die Heizungsanlagentechnik ist jedoch bislang keine solche Entwicklung festzustellen. WALCH und KRÜGER bemerken sogar – und bestätigen damit auch andere Autoren – dass es in den letzten Jahren und Jahrzehnten eine Abkehr von den bewährten hydraulischen Auslegungsgrundsätzen gegeben hat [98]. Abnahmen von Anlagen und entsprechende Protokollierung scheinen nicht einmal in Modellvorhaben üblich zu sein [198].

Der Gebäudebestand wird seit Mitte der 1990er Jahren verstärkt thematisiert. Zahlreiche Projekte zu den Grenzen der Möglichkeiten bei der Modernisierung des Baukörpers wurden wissenschaftlich begleitet. Die Anpassung der Anlagentechnik an neue Gegebenheiten gewinnt erst in letzter Zeit an Bedeutung. Ziel der Umsetzung der QS für Anlagentechnik muss jedoch langfristig sein, eine Verbreitung im normalen Bauablauf zu erreichen.

3. Grundlagen der Energiebilanz

Im Folgenden werden etablierte Energiebilanzansätze auf die mögliche Bewertung von Qualitätssicherung, v.a. der Anlagentechnik und Nutzung, hin untersucht.

3.1. Allgemeine Energiebilanzansätze

Für ein Gebäude lassen sich hinein und hinaus fließende Energieströme (Input, Output) bilanzieren. Die hineinfließenden Energien treten in Form von Wärmeenergie, elektrischer Energie, Strahlungsenergie oder chemisch gebundener Energie auf. Im Gebäude werden sie genutzt, d.h. teilweise umgewandelt, und treten im Allgemeinen in Form von Wärmeenergie (incl. Strahlung) aus dem Gebäude aus. Eine Energiebilanz erfasst alle oder einen Teil dieser Energieströme in einer definierten Zeitperiode, z.B. ein Jahr. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Input oder Output bilanziert wird, aufgrund der Energieerhaltung sind beiden Ströme gleich groß (Bild 3-1).

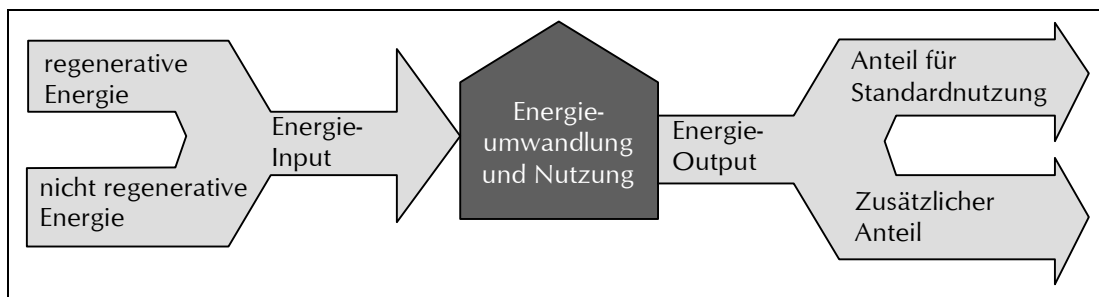


Bild 3-1 Energiezufluss und -abfluss eines Gebäudes

Ziel der Energiebilanz ist i.d.R. die Bestimmung des zugeführten Anteils an *nicht regenerativer Energie*, für dessen Bereitstellung ein Primärenergieträger bzw. ein endlicher Rohstoff verbraucht wird. In den üblichen Energiebedarfsbilanzen wird der Betrag der nicht regenerativen (i.d.R. zu bezahlenden) Energien indirekt bestimmt. Unter Voraussetzung einer bestimmten Nutzung, der Beschaffenheit des Baukörpers und der Anlagentechnik werden die Verluste des Gebäudes (Energieoutput) bestimmt. Mit Hilfe der dem Gebäude zugeführten *regenerativen Energien*, die sowieso anfallen oder die keinen endlichen Rohstoff verbrauchen (z.B. Fremdwärme), wird der zwangsläufig notwendige nicht regenerative Restanteil des Inputs über Differenzbildung bestimmt.

Auch für die Bestimmung des Energieoutputs nach Bild 3-1 gibt es verschiedene Ansätze. Rein formal gibt es in der Bilanz einen *Anteil für Standardnutzung* und einen *zusätzlichen Anteil* der aus dem Gebäude abfließenden Energieströme. Nur der Anteil für Standardnutzung wird in den üblichen Bilanzverfahren bestimmt. Ihm liegen Wärmeverluste der Transmission und Lüftung, die mit Standardnutzungsdaten ermittelt werden, sowie die anlagentechnischen Verluste der Wärmebereitstellung zugrunde. Der *zusätzliche* Energieanteil wird in der üblichen Bilanz nicht explizit bestimmt. Er umfasst Wärmeverluste über die genormte Nutzung hinaus, die aus einem Überschuss an nicht nutzbarer Fremdwärme und aus Abweichungen gegenüber der Standardnutzung resultieren. Dieser Anteil wird i.d.R. indirekt durch den Fremdwärmenutzungsgrad festgelegt.

Seine Höhe hängt vom Bilanzverfahren ab. In der Realität ist die Grenze zwischen dem Anteil aus Standardnutzung und zusätzlichen Verlusten fließend.

Die zur Bewertung von QS weiterentwickelten Bilanzansätze (Kapitel 6.4 und 7.1 ff.) basieren auf den hier vorgestellten allgemeinen Grundlagen. Sie betrachten in einem integrierten Ansatz Baukörper, Anlagentechnik, Nutzung und ihre QS – sowie die Wechselwirkungen untereinander – und nutzen Energiekennwerte zur Beschreibung des Gesamtsystems.

3.2. Energiekennwerte im Detail

Bei der folgenden Erläuterung werden vor allem Probleme der Abgrenzung und Ermittlung von Energiekennwerten aufgegriffen, die mit der Bewertung der Qualität und QS zusammenhängen. Eine Übersicht wichtiger Begriffe, die nachfolgend erläutert werden, zeigt Bild 3-2.

	Heizung	Trinkwarmwasserbereitung
Nutzenergie	Heizwärmebedarf, Wärmeabgabe der Heizflächen, Transmission und Lüftung, Fremdwärme, Wärmegewinne	Nutzwärme der Trinkwarmwasserbereitung
Verlustenergie	technische Verluste der Verteilung, Gesamtnutzungsgrad,	Speicherung und Erzeugung Gesamtaufwandszahl
Endenergie	Heizenergie	Endenergie für Trinkwarmwasserbereitung

Bild 3-2 Energiekennwerte der Nutz- und Verlustenergien

Wärme, Energie und Leistung

In der Energiebilanz werden die Begriffe *Energie* und *Wärme* parallel verwendet, obwohl strenggenommen unter *Wärme* nur die *thermischen Energien* zu verstehen sind. Der Begriff *Wärme* wird oft für die Abgrenzung des energetischen Nutzens gegenüber dem Gesamtaufwand, der als *Energie* bezeichnet wird, verwendet.

Eine Energiebilanz bestimmt Energiemengen Q für eine definierte Zeiteinheit, z.B. ein Jahr. Dabei wird häufig nicht das Integral der momentanen *Leistung* \dot{Q} über den Zeitraum gebildet, sondern eine mittlere Leistung \dot{Q}_{Mittel} bestimmt, die mit der Länge des Betrachtungszeitraumes t multipliziert wird.

Bezugsfläche und Bezugsvolumen

Je nach Bilanzverfahren werden zur Bildung flächenbezogener Energiekennwerte verschiedene Flächen herangezogen. Zwei Bezugsflächen haben sich – v.a. bei der Bewertung von Wohnbauten – durchgesetzt: die Energiebezugsfläche A_{EB} und die Gebäudenutzfläche A_N .

Die Energiebezugsfläche A_{EB} ist die Summe aller (Netto-) Wohn- bzw. Nutzflächen eines Gebäudes, für deren Nutzung eine Beheizung notwendig ist [103]. Die Gebäudenutzfläche A_N wird dagegen aus dem äußeren Volumen eines Gebäudes V_{er} , das die beheizten Räume umschließt,

berechnet. Sie ist eine fiktive Größe und im Mittel für untersuchte EFH um etwa 25 ... 27 % [102], für MFH etwa 15 ... 20 % [205] größer als die Energiebezugsfläche A_{EB} . Als Bezugsvolumen werden das umbaute Volumen V_e oder das Nettoluftvolumen V verwendet.

Heizgrenztemperatur und Heizzeit

Die theoretische Heizgrenztemperatur ϑ_{HG} ist die Außentemperatur, oberhalb der ein Gebäude nicht mehr durch die Heizungsanlage versorgt werden muss. Der Fremdwärmeanfall reicht dann aus, um die Wärmeverluste des beheizten Bereiches zu decken. Die Heizzeit t_{HP} (auch Anzahl der Heiztage oder Heizperiode) umfasst die Tage eines Jahres, an denen ein Gebäude durch die Heizungsanlage versorgt werden muss.

Die reale Heizgrenztemperatur und die reale Heizzeit hängen über die Einflüsse der Witterung und des Baukörpers hinaus, stark von der Nutzung sowie der Heizungsregelung ab. Die Heizzeit kann durch entsprechende Reglereinstellungen verlängert werden, wenn die Anlage noch bis in den Sommer hinein Wärme vorhält. Auch ohne eine Heizwärmeanforderung der beheizten Räume kann die Anlagentechnik bis zum Erreichen der praktischen Heizgrenze in Betrieb sein.

Für jedes Gebäude ergeben sich individuelle Werte für die Heizgrenze. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Vereinfachung bei der Verbrauchsuntersuchung kann ein Gebäude je nach Baualtersklasse, Nutzeranforderung und lokaler Witterung näherungsweise einer definierten Heizgrenze (z.B. 10 °C, 12 °C, 15 °C) zugeordnet werden.

Außentemperatur

Die mittlere Außentemperatur $\vartheta_{a,m}$ in der Heizzeit hängt von der Heizgrenztemperatur ab. Sie wird anhand der Tagesmitteltemperaturen während der Heizzeit bestimmt. Sie ist umso geringer, je kürzer die Heizzeit ist, da die Heiztage sich dann in den Kernwinter verschieben. Die mittlere Außentemperatur kann auch monatsweise angegeben werden, wobei dann alternativ alle Tage oder nur die Heiztage zur Mittelwertbildung herangezogen werden. Die Außentemperatur wird hinreichend genau als Außenlufttemperatur ohne Strahlungsanteile bestimmt [110].

Die Außentemperatur eines Standortes wird bestimmt von dessen Höhenlage, Breitengradlage (Sonneneinstrahlung), Längengradlage (in Deutschland: Kontinentaleinflüsse) sowie einer Stadt- oder Landlage. Tages-, Monats- und Jahresmittelwerte sind für diverse Standorte in Deutschland ermittelt und archiviert [34] [41]. Für Erdreich und Grundwasser können ebenso im Jahres-, Heizzeit- oder Monatsmittel entsprechende Temperaturen ermittelt werden. Diese sind an den Außentemperaturverlauf gekoppelt, jedoch mit einer zeitlichen Verschiebung und mit geringerer Amplitude zwischen Minimal- und Maximalwert über ein Jahr.

Innentemperatur und Wärmeübergabeverluste

Die Innentemperatur des beheizten Raumes ϑ_i wird in den verschiedenen Energiebilanzverfahren unterschiedlich verstanden: zum einen kann eine ideale Innentemperatur zum anderen auch eine reale Innentemperatur herangezogen werden. Weiterhin sind Luft- und Empfindungstemperatur definiert. In den gängigen Bilanzverfahren wird die Empfindungstemperatur zur Energiebilanzierung herangezogen.

Die ideale Innentemperatur ist der Sollwert der Temperatur in den Räumen. Sie hängt von den Nutzungsansprüchen ab. Haben die Räume eines Gebäudes verschiedene Sollwerte, können sie zu Zonen mit einer repräsentativen Mitteltemperatur zusammengefasst werden. Sollwertverschiebungen der Raumtemperatur durch Nutzereingriff und räumliche Teilbeheizung (TEB) können ebenso als veränderte Solltemperatur erfasst werden.

Die reale oder mittlere Innentemperatur ($\vartheta_{i,m}$) berücksichtigt neben dem Temperatursollwert auch die Einflüsse der Regelung und Fremdwärme. Absenk- oder Abschaltphasen der Raumheizung (ZEB) werden dabei ebenso berücksichtigt wie erhöhte Temperaturen aufgrund der Güte der realen, mit Regelabweichungen verbundenen Temperaturregelung im Raum im Zusammenspiel mit der zentralen Vorregelung. Die Effekte der Regelung auf die Wärmeverluste eines Raumes werden in einigen heute etablierten Energiebilanzverfahren als Wärmeverlust der Wärmeübergabe Q_{ce} bezogen auf eine ideale Regelung bestimmt. In diese Größe fließen je nach Bilanzverfahren zusätzlich die Einflüsse der eingeschränkten Beheizung (ZEB, TEB) ein.

Die reale Innentemperatur liegt bei erhöhtem Fremdwärmeanfall ggf. oberhalb der Solltemperatur – z.B. in den Übergangsmonaten, wenn Fremdwärme aufgrund nutzungsbedingter, regelungs-, anlagentechnischer oder baulicher Gegebenheiten nicht genutzt werden kann. Diese Temperaturerhöhungen werden in üblichen Bilanzverfahren i. A. nicht berücksichtigt; allein die baulichen Einflüsse werden indirekt über den Fremdwärmenutzungsgrad verrechnet.

Gradtagszahl und Heizgradtage

Die Gradtagszahl Gt ist das Zeitintegral der Innen- und Außentemperaturdifferenz über die Heizzeit. Sie kann ebenso mit Hilfe der mittleren Innen- und Außentemperatur in der Heizzeit bestimmt werden. Gradtagszahlen erhalten zur Kennzeichnung üblicherweise zwei Indizes: die Innentemperatur und die Heizgrenze – siehe Gleichung (3-1). Bei der Bestimmung der Gradtagszahl kann entweder die mittlere Innentemperatur $\vartheta_{i,m}$ inklusive aller Regelungs- und Fremdwärmeeinflüsse oder die ideale Sollinnentemperatur ϑ_i herangezogen werden.

Die Heizgradtage G sind das Zeitintegral der Differenz zwischen Heizgrenztemperatur und Außentemperatur über die Heizzeit. Sie können alternativ mit Hilfe der mittleren Außentemperatur in der Heizzeit bestimmt werden. Heizgradtage werden mit einem Index, der Heizgrenztemperatur, gekennzeichnet – Gleichung (3-2).

$$Gt_{\vartheta_{i,m},\vartheta_{HG}} = \int_{HP} (\vartheta_i - \vartheta_a) dt = (\vartheta_{i,m} - \vartheta_{a,m}) \cdot t_{HP} \quad (3-1)$$

$$G_{\vartheta_{HG}} = \int_{HP} (\vartheta_{HG} - \vartheta_a) dt = (\vartheta_{HG} - \vartheta_{a,m}) \cdot t_{HP} \quad (3-2)$$

Die Ansätze der Gleichungen (3-1) und (3-2) können auch auf andere Zeiträume (z.B. Monate) übertragen werden. Das maßgebliche Zeitintervall ist dann nicht die Heizzeit, sondern die Zahl der Tage (oder Heiztage) pro Monat.

Wärmedurchgangskoeffizient, Transmissionsheizlast und Transmissionswärmeverlust

Der Wärmedurchgangskoeffizient für den stationären Wärmedurchgang eines Bauteils U (früher k) wird bestimmt durch die Wärmeleitung im Bauteil und durch den Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen. Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche Materialien bzw. Materialkombinationen und Einbausituationen sind genormt bzw. tabelliert.

Für ein Gebäude kann ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient U_m (auch H_T) der wärmeübertragenden Umfassungsflächen A des beheizten Bereichs angegeben werden. Dieser Mittelwert berücksichtigt i.d.R. auch die unterschiedlichen Temperaturen der außen an das Bauteil grenzenden Medien (Außenluft, unbeheizte Räume im Dach bzw. Keller, Erdreich oder Grundwasser) und ggf. den Einfluss von Wärmebrücken U_{WB} . Für den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten gilt somit der Zusammenhang nach Gleichung (3-3). Trotz der Temperaturabhängigkeit wird der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient vereinfacht als eine reine Gebäudeeigenschaft angesehen.

$$U_m = \frac{\sum_j U_j \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{a,j})}{(\vartheta_i - \vartheta_{a,m})} + U_{WB} \quad (3-3)$$

Die Transmissionsheizlast H_T des Gebäudes ist das Produkt des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_m und der wärmeübertragenden Umfassungsfläche A des beheizten Bereiches. Der Transmissionswärmeverlust als Energiemenge Q_T ergibt sich durch Multiplikation der Transmissionsheizlast H_T mit der Gradtagszahl Gt .

Luftwechsel, Lüftungsheizlast und Lüftungswärmeverlust

Der Luftwechsel n ist ein Maß dafür, wie oft das beheizte (bzw. als beheizt definierte) Luftvolumen in einer Zeiteinheit durch Außenluft ersetzt wird. Er ist eine in der Praxis kaum messbare Größe. Nur Momentanwerte können mit Hilfe komplexer Messverfahren, z.B. mit Hilfe einer Tracergasmessung, erfasst werden. Der Luftwechsel ist eine Überlagerung von Fugen- und Fensterlüftung sowie dem Anlagenluftwechsel, wenn eine Lüftungsanlage vorhanden ist.

Der *Fugenluftwechsel* wird maßgeblich bestimmt durch die Dichtheit des Gebäudes und herrschende Wind- und Auftriebsdrücke sowie die Art der Strömungsverhältnisse (turbulent oder laminar) in den Fugen. Der *Luftwechsel aus Fensterlüftung* hängt von der Art und Anordnung der Fenster (Querlüftung), Strömungswiderständen im Gebäude und vor allem den Lüftungsgewohnheiten der Nutzer ab. Der *Anlagenluftwechsel* richtet sich in der Auslegung oft nach einem notwendigen Mindestluftwechsel aufgrund der Personenbelegung, der zu belüftenden Fläche bzw. des zu belüftenden Volumens oder einer erwarteten Schadstoffbelastung.

Fugen- und Fensterluftwechsel können in der Praxis oft nicht getrennt angegeben werden. Sie werden deshalb oft als *natürlicher Luftwechsel* oder *Restluftwechsel* (neben dem mechanischen Anlagenluftwechsel) zusammengefasst. Für die Bilanzierung der Lüftungswärmeverluste wird entweder der Gesamtluftwechsel oder der energetische Luftwechsel eingesetzt. Der *energetische*

Luftwechsel verrechnet die zurückgewonnene Wärme einer Lüftungsanlage als verminderten Luftwechsel. Der *Gesamtluftwechsel* ist die Summe der Einzelluftwechsel ohne Berücksichtigung einer ggf. vorhandenen Wärmerückgewinnung. Der Gesamtluftwechsel und seine Teilluftwechsel sind im Verlauf eines Jahres nicht konstant. Aufgrund des thermischen Antriebs ist der Luftaustausch durch Gebäudeundichtheiten im Winter am größten. Der Nutzer überlagert dieses physikalische Phänomen, da vor allem in den Übergangsjahreszeiten ein hohes Bedürfnis nach Lüftung besteht [125] [185]. In einer Energiebilanz wird mit zeitlichen Mittelwerten gerechnet.

Allen etablierten Bilanzverfahren ist gemein, dass sie einen *Bedarfsluftwechsel* definieren. Dieser Wert umfasst nicht den ggf. zusätzlich notwendigen Luftwechsel, um nicht nutzbare Fremdwärme aus einem Gebäude abzutransportieren. In der Praxis kann ein realer Luftwechsel definiert werden, der diesen Effekt (Ablüften) mit berücksichtigt.

Die bezogene Lüftungsheizlast H_V des Gebäudes ist das Produkt aus Luftwechsel n , dem belüfteten Volumen V und den Stoffeigenschaften der Luft (Dichte ρ und spezifische Wärmespeicherkapazität c_p). Der Lüftungswärmeverlust als Energiemenge Q_V ergibt sich durch Multiplikation der Lüftungsheizlast H_V mit der Gradtagszahl Gt . Er schwankt monatlich – sowohl durch die unterschiedliche mittlere Außentemperatur als auch durch den unterschiedlichen Luftwechsel. Dabei sind die beiden Tendenzen "Erhöhung des Luftwechsels" und "Verminderung des Temperaturgefälles innen – außen" in den Übergangsjahreszeiten gegenläufig.

Wärmeverluste des beheizten Bereiches

Unter den Wärmeverlusten des beheizten Bereiches Q_{T+V} versteht man die Summe aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten. Weil bereits bei der Bestimmung der Einzelgrößen unterschiedliche Ansätze gewählt werden, sind die Wärmeverluste des beheizten Bereiches nach verschiedenen Bilanzverfahren häufig nicht miteinander vergleichbar.

Innere Fremdwärme

Innere Fremdwärme Q_I tritt ungeregelt auf und entstammt i. A. Wärmequellen, deren Temperatur oberhalb der Raumtemperatur liegt. In den meisten Bilanzverfahren wird nur die Abwärme von Personen und des elektrischen Energieverbrauchs (Beleuchtung und Geräte) als innere Fremdwärme angesehen [44] [79] [161]. Der andere Teil der inneren Fremdwärme – die ungeregelt anfallende Abwärme von Komponenten der Anlagentechnik – wird oft vernachlässigt. Weitere Ausführungen hierzu folgen in Kapitel 6.2.

Passive solare Fremdwärme

Passive solare Fremdwärme Q_S ist die Folge von Sonneneinstrahlung durch die Gebäudehülle. In einer vereinfachten Bilanz werden nur die transparenten Flächen berücksichtigt. Die passive solare Fremdwärme hat einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang (Sonnenstandwanderung). Dies kann insbesondere in den Übergangsjahreszeiten zu einer starken Überversorgung des Gebäudes mit Wärme führen.

Der solare Fremdwärmeanfall wird durch die Größe, Ausrichtung und den Energiedurchlassgrad der transparenten Flächen sowie von Einflüssen der Verschattung und Verschmutzung bestimmt.

Der eigentlich veränderliche Energiedurchlassgrad eines Materials wird häufig vereinfachend als konstant angesehen [110]. Unter der Globalstrahlung wird die Energiemenge verstanden, die unter einem bestimmten Höhenwinkel, in einer bestimmten Himmelsrichtung und einer bestimmten Zeit auf eine Fläche auftrifft. Werte sind beispielsweise je Monat oder in der Heizzeit tabelliert [44]. Die Angabe der Globalstrahlung als Jahreswert verlangt auch immer die Angabe der zugehörigen Heizgrenze. In der Literatur sind Werte für 10 °C, 12 °C oder 15 °C Heizgrenze zu finden [55] [103] [161].

Fremdwärmeanfall, Nutzbarkeit von Fremdwärme und Fremdwärmenutzungsgrad

Der unregelmäßig auftretende Fremdwärmeanfall Q_{f+s} fasst den passiven solaren Q_s und den inneren Fremdwärmeanfall Q_i zusammen. Die momentane Fremdwärmeleistung kann nur bis zur Höhe der momentanen Verlustleistung (bei normalen Temperaturen und Luftwechseln) der beheizten Räume genutzt werden. Darüber hinaus erhöht der Fremdwärmeanfall zunächst die Innentemperatur. Eine Aussage über die Nutzbarkeit des Fremdwärmeanfalls erfordert daher eine Integration der Leistungsanteile über den Untersuchungszeitraum.

Die Nutzbarkeit der Fremdwärme hängt sehr eng mit der Speicherfähigkeit eines Gebäudes zusammen. In realen, speicherfähigen Gebäuden wird ein Teil der überschüssigen Wärme in den Speichermassen eingelagert, bis die Speicher eine erhöhte Raumtemperatur erreicht haben. Diese Wärme kann später wieder abgegeben werden. Temperaturerhöhungen sind in realen Gebäuden jedoch nicht unbegrenzt möglich. Wenn die Behaglichkeits- oder Toleranzgrenze des Nutzers erreicht ist, erfolgt ein Ablüften der Überschüsse. Die Toleranzgrenze wird in der Literatur bei 23 ... 24 °C angesetzt [110] [125]. Im Sinne aller etablierten Bilanzverfahren ist ein Fremdwärmeanfall also nicht voll für die Raumheizung nutzbar, d.h. der nicht nutzbare Anteil führt zu Temperaturen und Luftwechseln über das normale Maß hinaus. Der Anteil der so definierten, nicht nutzbaren Menge von Fremdwärme nimmt zu, je höher der Fremdwärmeanfall bezogen auf die Wärmeverluste des beheizten Raumes ist.

Auch die Regelung der Anlagentechnik beeinflusst die Nutzung von Fremdwärme. "Jede Fremdwärme in einem System muss als verloren angesehen werden, wenn sie nicht durch die Regelung erfaßt wird" [21]. Regelsysteme, die auf Änderungen der Raumtemperatur träge oder gar nicht reagieren, d.h. die Wärmezufuhr in den Raum nicht drosseln, provozieren einen starken Raumtemperaturanstieg, so dass der Nutzer die Überschüsse ablüften muss. Dies entspricht einem schlechten Ausnutzungsgrad von Fremdwärme.

Der Fremdwärmenutzungsgrad η_f beschreibt den Anteil der Fremdwärme, der zur Aufrechterhaltung der definierten Nutzungsbedingungen eines Raumes dient und der nicht zu erhöhten Verlusten führt. Er ist i.A. das Ergebnis von Simulationsrechnungen (thermische Gebäudesimulation) typischer Gebäudemodelle ohne Berücksichtigung der Regelungstechnik und anlagentechnischer Randbedingungen. Der Fremdwärmenutzungsgrad wird in den Bilanzverfahren nach verschiedenen Formelansätzen bestimmt. Teilweise sind Festwerte definiert oder es werden empirische Formeln herangezogen. Eine nähere Untersuchung einzelner Bilanzverfahren folgt in Kapitel 3.4, eine kritische Stellungnahme in Kapitel 6.2.

Die Weiterentwicklung der Bilanzverfahren in Kapitel 6.4 zeigt, dass auf die Verwendung eines Fremdwärmenutzungsgrades ggf. gänzlich verzichtet werden kann. Dazu müssen die Fremdwärmeanteile, die zu einer Überwärmung der beheizten Räume bzw. zum Ablüften von Wärme führen, als erhöhte Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sichtbar gemacht werden.

Unter dem Wärmegewinn ist der nutzbare Anteil des Fremdwärmeanfalls zu verstehen. Er ist das Produkt aus Fremdwärmeanfall und Fremdwärmenutzungsgrad.

Heizwärmebedarf und Wärmeabgabe der Heizflächen

Die in einem Gebäude frei werdenden Energien, können der geregelten und der ungeregelten Wärmeabgabe zugeordnet werden. Unter geregelter Wärmeabgabe wird die von den Heizflächen (oder durch Luftauslässe bei einer Luftheizung) geregelt innerhalb des Gebäudes abgegebene Energie verstanden. Fremdwärme fällt dagegen unregelt an.

Der Heizwärmebedarf nach Gleichung (3-4) ist die nicht messbare Energiemenge, die sich aus Transmissions- und Lüftungswärmeverluste abzüglich der Wärmegewinne aus solarer Einstrahlung sowie Personen- und Geräteabwärme ergibt. Diese Definition wird in den meisten Energiebilanzverfahren verwendet. Durch teilweise andere Ausgangsgrößen sind Rechenergebnisse unterschiedlicher Bilanzverfahren nicht universell vergleichbar. Der Heizwärmebedarf entspricht nicht der Wärmeabgabe der Heizflächen, obwohl dies in der Literatur oft behauptet wird (z.B. HEGNER in [60]). Er ist in der Praxis nicht messbar. Tatsächlich setzt er sich zusammen aus der geregelten Wärmeabgabe der Heizflächen und der ungeregelten Wärmeabgabe aller anderen Komponenten der Anlagentechnik, weitere Erläuterungen folgen in Kapitel 3.3.

$$Q_h = (Q_T + Q_V) - \eta_F \cdot (Q_S + Q_I) \quad (3-4)$$

Soll tatsächlich die Wärmeabgabe der Heizflächen bestimmt werden, muss die innere Fremdwärme Q_I nach Gleichung (3-4) alle inneren Fremdwärmeeinträge – auch Fremdwärme aus der Anlagentechnik – enthalten. Ein weiterführender Ansatz, der zusätzlich auf die Verwendung des Fremdwärmenutzungsgrades verzichtet, wird in Kapitel 6.4 beschrieben.

Nutzen der Trinkwarmwasserbereitung

Die Warmwassernutzwärme Q_{tw} wird bestimmt von der gezapften Warmwassermenge in einem Zeitabschnitt, der Eintrittstemperatur des Kaltwassers in das Gebäude und der Nutzttemperatur des Warmwassers sowie der spezifischen Wärmekapazität.

Technische Verluste, Gesamtnutzungsgrad und Gesamtaufwandszahl

Die Endenergie für Heizung (Heizenergie) enthält neben der Nutzenergie (Heizwärmebedarf oder Wärmeabgabe der Heizflächen) zusätzliche Verlustwärmemengen, die technischen Verluste Q_t . Diese umfassen die Wärmeverluste der Verteilung, der Speicherung und der Wärmeerzeugung sowie je nach Bilanzverfahren zusätzlich Wärmeübergabeverluste. Sie können als absolute Energiemengen bestimmt werden oder zusammengefasst in einem Gesamtnutzungsgrad oder als Gesamtaufwandszahl angegeben werden.

Der Gesamtnutzungsgrad ist das Verhältnis der Nutzenergie (Heizwärme) zur Endenergie (Heizenergie). Die Gesamtaufwandszahl ist der Kehrwert des Nutzungsgrades. Beide Größen können auch unter Berücksichtigung der Trinkwarmwasserbereitung bestimmt werden. Die technischen Verluste werden im Folgenden einzeln besprochen.

Wärmeverluste der Wärmeverteilung und -speicherung

Die Wärmeverluste der Wärmeverteilung Q_d und Wärmespeicherung Q_s sind je nach Bilanzverfahren unterschiedlich definiert. Einerseits kann die gesamte Wärmeabgabe der Speicher und Leitungen über einen Zeitraum bestimmt werden. Andererseits kann auch nur der außerhalb des beheizten Bereiches auftretende Wärmeverlust, der nicht zur Raumheizung beiträgt, berechnet werden. Weitere Ansätze sind verbreitet.

Bei der Berechnung spielen Leitungslängen bzw. Speichervolumina, deren Dämmstandard, das Temperaturgefälle bezogen auf die Umgebung und die Bilanzzeit eine Rolle. Instationäre Zustände, d.h. zeitlich veränderliche Temperaturverläufe in Verteilnetzen und Speichern, werden i.A. durch mittlere Betriebstemperaturen wiedergegeben. Es besteht die Möglichkeit, die Wärmeverluste der Verteilung und Speicherung als Verteilungs- oder Speichernutzungsgrad ggf. auch zusammengefasst anzugeben. Gleiches gilt für entsprechende Kehrwerte, die Aufwandszahlen.

Wärmeverluste, Nutzungsgrade, Aufwandszahlen und Deckungsanteile von Erzeugern

Jeder Wärmeerzeuger ist der Teil der Anlagentechnik, in dem aus einem beliebigen, primär zugeführten Energiestrom ein sekundär abfließender Wärmestrom produziert wird. Es kann eine Energieumwandlung, wie beispielsweise in Kesseln oder Wärmepumpen stattfinden. Obwohl in einem Fern- oder Nahwärmeanschluss keine Energieumwandlung erfolgt, zählt er dennoch i.A. zu den Wärmeerzeugern. Werden alle Wärmeerzeuger nach diesem Schema betrachtet, dann können auch Solaranlagen und die Wärmerückgewinnung einer Lüftungsanlage als Wärmeerzeuger angesehen werden.

Der Prozess der Wärmeerzeugung kann anhand verschiedener Energieeinzelkennwerte beschrieben werden. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung von absoluten Wärmeverlusten der Erzeugung Q_g . Die Verluste sind die Differenzenergiemenge zwischen der dem Erzeuger zugeführten und der als Nutzen abgegebenen Energiemenge. Sie können in betriebsbedingte (z.B. Abgasverluste bei Kesseln) und fixe Verluste (z.B. Bereitschaftsverluste bei Kesseln) unterschieden werden [35] [89]. Die Wärmeverluste an den umgebenden Raum können als Fremdwärme bilanziert werden, wenn der Erzeuger im beheizten Bereich aufgestellt ist. Die Angabe absoluter Wärmeerzeugerverluste wird derzeit praktisch kaum verwendet.

Üblich ist die Bestimmung eines Wärmeerzeugernutzungsgrades η_g . Dabei wird das Verhältnis aus abgegebener Nutzwärme (Nutzen) und zugeführter Energie (Aufwand) bestimmt. Betrachtungszeitraum für diese Angabe ist üblicherweise ein Jahr. Aufwandszahlen e_g sind Kehrwerte von Nutzungsgraden, die aus den gleichen Ausgangsgrößen bestimmt werden. Da die bilanzierten zugeführten Energien per Definition nur den nicht regenerativen Energieanteil umfassen, haben rein regenerative Erzeuger (Solaranlagen, Wärmerückgewinnungsanlagen) Aufwandszahlen von null, denn es ist kein Aufwand vorhanden.

Deckungsanteile a sind Hilfsgrößen für die Bewertung von Anlagen mit mehr als einem Wärmeerzeuger. Sie geben den energetischen Anteil eines Erzeugers an der gesamten Wärmelieferung der Erzeugungsanlage an. Da alle Erzeuger zusammen die Energieanforderung voll erfüllen müssen, ist die Summe aller Deckungsanteile eins. Anstelle von Deckungsanteilen kann auch mit absoluten Energiemengen gearbeitet werden.

Durchgehende Bilanzgleichung für die thermischen Energien

Aus den beschriebenen Energiekennwerten, deren Formelzeichen an dieser Stelle nicht noch einmal wiederholt werden sollen, kann die durchgehende Energiebilanzgleichung für die thermischen Energien abgeleitet werden. Einen Querschnitt typischer Ansätze gibt Bild 3-3 wieder.

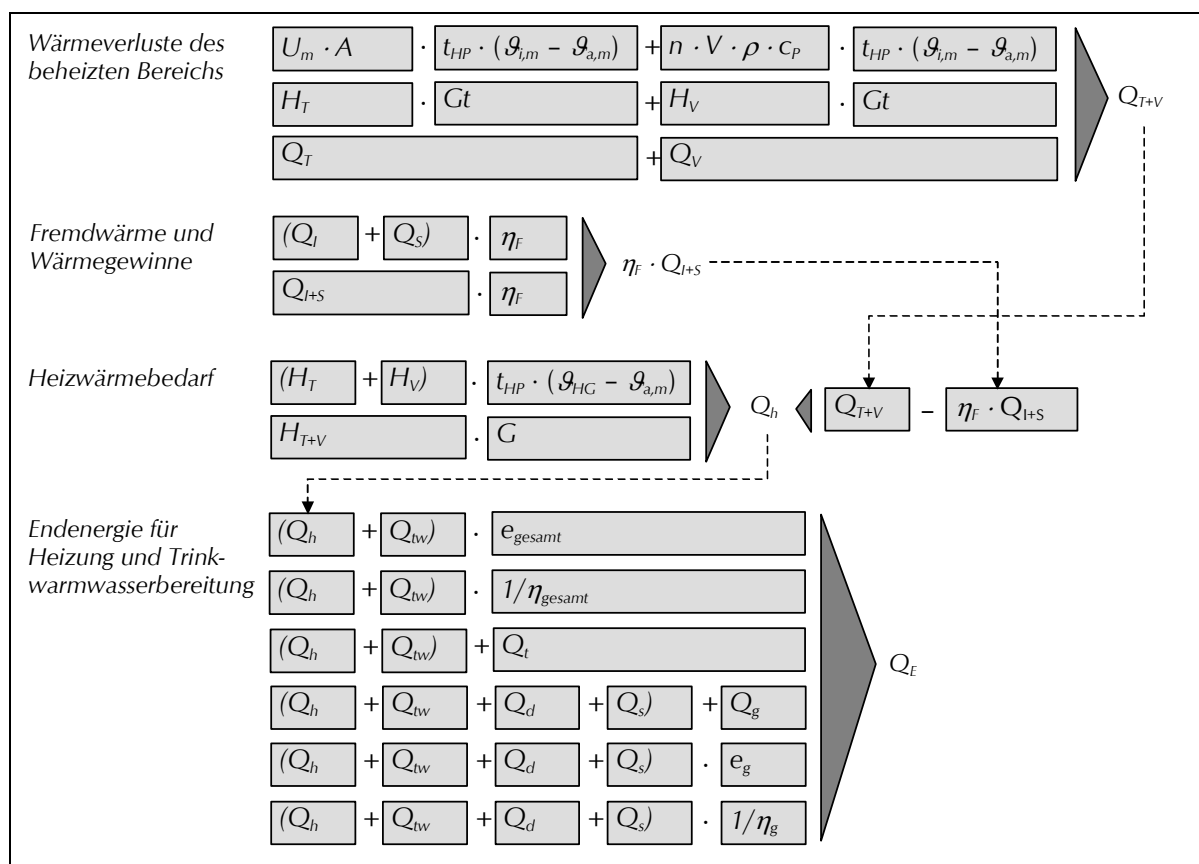


Bild 3-3 Verknüpfung der Kennwerte zu Bilanzgleichungen

Aus den Wärmeverlusten des beheizten Bereiches für Transmission und Lüftung sowie den Fremdwärmegewinnen wird der Heizwärmebedarf bestimmt. Zusammen mit der Nutzenergie der Trinkwarmwasserbereitung und den technischen Verlusten ergibt sich die Endenergie.

Regenerative Energien

Zu den wichtigsten regenerativen Energiequellen bei der Energiebilanz zählen die unregelmäßig anfallende passive solare Fremdwärme bzw. die innere Fremdwärme durch Personen und aktiv in Wärmepumpenprozessen, Wärmerückgewinnungsanlagen und Solaranlagen gewonnene Umweltwärme. Aktiv gewonnene regenerative Energien können auf verschiedene Weise bilanziert werden. Als absolute Energiemengen bilanziert, mindern sie rechnerisch den nicht regene-

rativen Energieinput in das Gebäude. Die zurückgewonnene Wärme aus Lüftungsanlagen mit Wärmeübertrager wird dagegen oft sofort als energetischer Luftwechsel bilanziert. Gewonnene Umweltwärme aus Wärmepumpenprozessen wird durch entsprechende Leistungs- oder Arbeitszahlen ausgedrückt. Gewonnene Umweltwärme aus Solaranlagen wird beispielsweise als solarer Deckungsanteil dargestellt.

Hilfsenergien

Hilfsenergien sind elektrische Energien, die unmittelbar mit der Versorgung eines Gebäudes mit Raumwärme und Trinkwarmwasser in Verbindung stehen. Zu den Hilfsgeräten zählen Pumpen, Ventilatoren und elektrisch betriebene Regeleinrichtungen. Sie werden zum wirtschaftlichen und primärenergetischen Vergleich unterschiedlicher Versorgungssysteme mit herangezogen. Die Bilanz von Hilfsenergien soll nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit sein.

Primärenergiefaktor, CO₂-Äquivalent und Energieinhalt

In Umweltbilanzen werden die über die Gebäudegrenze fließenden Energien zusätzlich aufgrund ihrer Umweltwirksamkeit bewertet. Dies erfolgt anhand der Menge und Art der Endenergien mit Primärenergiefaktoren bzw. mit CO₂-Äquivalenten. Der Primärenergiefaktor f_p berücksichtigt für jeden Energieträger den Aufwand, der bei seiner Förderung, ggf. Umwandlung und beim Transport bis zum Endverbraucher anfällt. CO₂-Äquivalente sind ein Maß für die Treibhauswirkung eines Energieträgers. Umweltbilanzen sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur am Rande behandelt werden.

Der Energieinhalt wird üblicherweise für chemisch gebundene Energien angegeben: Gas, Öl, Kohle oder Holz. Er kann auf den Brennwert (H_o) oder den Heizwert (H_u) bezogen angegeben sein und wird zur Umrechnung von Energie- in Stoffströme (und damit Geldströme) benötigt.

3.3. Arten der Energiebilanzierung

Einen Überblick über verschiedene Ansätze bei der Energiebilanzierung zeigt Bild 3-4.

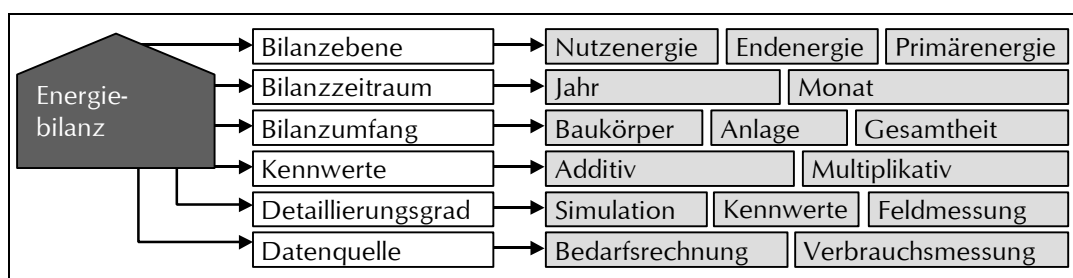


Bild 3-4 Arten der Energiebilanz

Art der Bilanzebene: Nutz-, End- und Primärenergie

Die *Nutzenergie* des Gebäudes umfasst die Anteile für Trinkwarmwasserbereitung und Raumheizung. Die Bilanzierung des Nutzens der Raumheizung ist dabei in einzelnen Verfahren unterschiedlich definiert, wobei meist fünf Energiekennwerte verwendet werden, siehe Gleichung (3-4) auf Seite 44.

Dies sind: die Wärmeverluste durch Transmission Q_T und Lüftung Q_V , die solare und innere Fremdwärme Q_S bzw. Q_I und ein Fremdwärmenutzungsgrad η_F . Das Ergebnis wird i.d.R. als Jahresheizwärmebedarf bezeichnet. Trotz gleicher Nomenklatur kann diese Größe zahlenmäßig andere Werte haben, weil die Ausgangskennwerte bereits anders bestimmt werden (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.2). Beispielhaft seien hier die Bestimmung der Lüftungswärmeverluste mit oder ohne Wärmerückgewinnung oder der verschieden definierte Fremdwärmenutzungsgrad genannt. Größtes Unterscheidungskriterium ist jedoch die unterschiedlich weite Betrachtung von Fremdwärme, insbesondere der Anlagentechnik. RAIB [128] sagt bereits 1968 zu diesem Thema: "Nutzwärme ist weder unmittelbar noch mittelbar (als Restglied der Wärmebilanz aus Wärmeaufwand und Verlustwärme) zuverlässig zu bestimmen. Damit verliert auch der Begriff des Wirkungsgrades einer Heizungsanlage an Bedeutung." [128].

Für die Bestimmung der *Endenergie* eines Gebäudes muss der Bilanzumfang definiert werden. Es kommen Aufwendungen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung, zukünftig auch für Kühlung, Klimatisierung, Haushaltsstrom usw. in Betracht. Die Jahresendenergie nimmt in verschiedenen Bilanzverfahren durch unterschiedlichen Bilanzumfang und Rechenverfahren jeweils andere Werte an. Zur Bilanzierung werden die in Kapitel 3.2 beschriebenen Energiekennwerte verwendet. Üblich ist der folgende allgemeine Ansatz für den Wohnbau: Die Jahresendenergie ist die Energiemenge (nicht regenerativer Energien), die im Verlaufe eines Jahres zum Zwecke der Heizung, Lüftung und Trinkwarmwasserbereitung über die Gebäudegrenze fließt.

Die *Primärenergie* eines Gebäudes lässt sich unmittelbar aus der Endenergiebilanz (Wärme- und Hilfsenergien) ableiten. Endenergien werden entsprechend des Energieträgers, der für ihre Bereitstellung verbraucht wird, in Primärenergien umgerechnet. So kann der – global betrachtet – nicht regenerative Teil des Energieverbrauchs bzw. -bedarfs abgebildet werden. Da Primärenergiefaktoren teilweise politisch festgelegt sind [89], ist die Aussagekraft der Primärenergie begrenzt.

Grad der Detaillierung: Simulation, Kennwertbilanz, Feldmessung

Eine Gebäudeenergiebilanz kann mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad bzw. Rechenaufwand durchgeführt werden. Der geringste Rechenaufwand entsteht bei einer Energiebilanz aus Verbrauchswerten einer *Feldmessung*. Die Auswertung der Ergebnisse eines mit Messtechnik ausgestatteten Gebäudes lässt Rückschlüsse auf den Energieverbrauch zu. Durch Typologisierung kann der Energiebedarf für andere, ähnliche Objekte vorausgesagt werden. Je größer der Umfang der Messdaten, desto genauer wird die Aufteilung des Gesamtenergieverbrauchs auf die einzelnen Energieverbraucher. Aus einem Mittel vieler Felduntersuchungen können typische Energiekennwerte – vor allem das Nutzerverhalten betreffend – abgeleitet werden. Jede weitere Untersuchung bestätigt den bestehenden Wert oder korrigiert ihn in die richtige Richtung.

Den höchsten Rechenaufwand erfordern *Simulationsberechnungen*. Diese basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und bekannten mathematischen Rechenalgorithmen. In einem Rechnermodell werden der Energiebedarf eines Gebäudes und die Aufteilung auf Einzelkennwerte nachgebildet. Meist sind stündliche Klimadaten die Ausgangsbasis. Wegen der sehr gro-

ßen Datenmenge werden oft nur Teilbereiche – z.B. einzelne Räume – statt des gesamten Gebäudes abgebildet. Simulationen erfordern die Festlegung von wichtigen Randbedingungen, z.B. der Nutzung. Diese können realistisch nur aus Feldmessungen entnommen werden. Aus Fachkreisen wird oft der Vorwurf erhoben, dass das Nutzerverhalten in Simulationen falsch interpretiert wird. Der Energieverbrauch ist dann in der Praxis höher als berechnet (z.B. SIEBERT in [9]).

Die in der Praxis angewandten *Kennwertbilanzen* liegen in ihrem Rechenaufwand zwischen den beiden Extremen. Sie folgen dem Rechenalgorithmus der Simulation, nutzen aber oft typische (mittlere) Energiekennwerte – z.B. Jahresmittelwerte – die ihrerseits aus Feldmessungen und Simulationen abgeleitet sein können. Die Verfahren sind bewusst einfach gehalten, um überschaubare Rechnungen zu ermöglichen.

Art des Bilanzzeitraums: Jahres- und Monatsbilanz

Für die übliche Energiebilanzierung (v.a. Kennwertbilanzen) haben sich Monats- oder Jahresbezüge durchgesetzt. Mit beiden Vorgehensweisen wird i.d.R. ein Jahresenergieverbrauch oder -bedarf bestimmt. Dieser ist bei monatlichen Berechnungen die Summe der Monatswerte. In Monatsbilanzverfahren kann ggf. ein höherer Detaillierungsgrad erreicht werden.

Art des Bilanzumfangs: durchgehende und geteilte Bilanzverfahren

Eine Energiebilanz sollte einen integrierten Ansatz aufweisen, d.h. sowohl Klimadaten, Bau- und Anlagentechnik als auch das Nutzerverhalten berücksichtigen. Die etablierten Bilanzverfahren haben ihren Umfang im Laufe der Entwicklung stetig erhöht. Dabei können durchgehende Bilanzverfahren entstehen [79] [143] oder im Lauf der Zeit gewachsene, geteilte Bilanzen mit getrennten Berechnungsvorschriften für den Baukörper und die Anlage [44] [45] [160] [161]. Letztere erfordern eine genaue Definition von Übergabe- bzw. Schnittstellengrößen, damit konsistente Bilanzen entstehen. Fehlen diese, wird die Anwendung erschwert bzw. die Ergebnisse sind anfechtbar – dies ist derzeit bei den beiden Normen zur Energieeinsparverordnung der Fall [89].

Art der Kennwerte: Additive und multiplikative Verfahren

Energiekennwerten können additiv nach Gleichung (3-5) oder multiplikativ analog Gleichung (3-6) verrechnet werden. In heute verwendeten Bilanzverfahren werden beide Ansätze verfolgt.

$$Q = \Sigma(Q_j) = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (3-5)$$

$$Q = Q_o \cdot \Pi(f_j) = Q_o \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n \quad (3-6)$$

Additive Energiekennwerte sind absolute oder bezogene Größen (Fläche, Volumen) mit einer SI-Einheit. Verfahren wie die DIN V 4701-10 [45] oder der Hessische Energiepass [103] verwenden eine Vielzahl additiver Kennwerte. Additive Kennwerte weisen dann eine hohe Anschaulichkeit auf, wenn die abgebildeten Prozesse unabhängig von vor- oder nachgeschalteten Prozessen einen relativ konstanten Energieaufwand haben. Ein Beispiel für die sinnvolle Verwendung eines additiven Kennwertes ist die Bestimmung der Wärmeabgabe eines Rohres über seine Oberfläche. Der Wärmeverlust (z.B. in kWh/a) ist nahezu unabhängig von der Art der vorgeschalteten Wärmeerzeugung oder der Höhe der nachfolgenden Wärmeabnahme.

Eine multiplikative Bilanz muss mindestens einen einheitenbehafteten Kennwert als Eingangsgröße der Bilanz aufweisen. Multiplikative Kennwerte sind beispielsweise Nutzungsgrade oder Aufwandszahlen, sie sind einheitenlose Größen. VDI 2067 [162] verwendet zahlreiche multiplikative Kennwerte. Diese sind dann anschaulich, wenn der zu beschreibende Prozess abhängig von vor- oder nachgeschalteten Prozessen ist. Ein Beispiel hierfür ist die Energieumwandlung in einem Kessel. Abhängig von der eingesetzten Brennstoffmenge ergibt sich die umgewandelte Wärmemenge. Um die Relevanz eines multiplikativen Energiekennwertes abschätzen zu können, muss i.A. die Bezugsgröße bekannt sein.

Reale Prozesse weisen häufig sowohl abhängige als auch unabhängige Verlustanteile auf, z.B. Umwandlungs- und Bereitschaftsverluste eines Kessels. Sie können daher ggf. mit zwei Kennwerten, einem additiven und einem multiplikativen, beschrieben werden [35] [89]. Dies ist für Kessel in Kapitel 3.2 beschrieben.

Art der Datenquelle: Bedarfsbilanz und Verbrauchsbereinigung

Eine *Energieverbrauchsbilanz* basiert auf einer verbrauchten Energiemenge aus Messdaten. Energieverbrauchsbilanzen werden zur überschlägigen Bewertung bereits bestehender Gebäude angewendet. Gebäude gleicher Art und Nutzung können miteinander verglichen werden, Einsparmaßnahmen können beurteilt, entschieden und kontrolliert werden. Sie sind ein Analyse-Instrument (Benchmarking). Eine Witterungsbereinigung auf ein Standardklima und ggf. einen Standardstandort macht Verbrauchsdaten untereinander vergleichbar (vgl. Kapitel 3.4.5). Rechnerische Rückschlüsse auf Einzelwärmemengen sind möglich.

Im Gegensatz dazu bewertet die *Energiebedarfsbilanz* zunächst alle Einzelwärmemengen anhand der Charakteristik des Gebäudes und der Anlage sowie auf Basis typischer Nutzungsprofile. Diese Vorgehensweise erlaubt anschließend den Rückschluss auf die Endenergiemenge. Energiebedarfsbilanzen werden vor allem eingesetzt, wenn reale Verbräuche noch nicht vorliegen. Sie ermöglichen die Prognose künftig benötigter Energiemengen, sind ein Planungsinstrument. Energiebedarfswerte verschiedener Berechnungsverfahren differieren stark, vor allem weil die Einflussgrößen unterschiedlich gewichtet werden [118]. Sie sind nur Größenordnungsabschätzungen des Verbrauchs, da über den größten Unsicherheitsfaktor, den Nutzer und insbesondere dessen Lüftungsverhalten, nur spekuliert werden kann [118].

3.4. Etablierte Energiebilanzverfahren

Die Analyse von vorhandenen Energiebilanzverfahren hat das Ziel, Vorgehensweisen bei der Bestimmung und Verrechnung von Einzelkennwerten zu vergleichen. Mögliche Ansätze zur Bewertung der Qualität der Anlagentechnik werden untersucht, um im Rahmen dieser Arbeit ein entsprechend geeignetes Bilanzverfahren weiterzuentwickeln (Kapitel 6.2 ff.). Besonderes Augenmerk liegt auf der Art der Bewertung der Wärmeübergabe und Regelung zusammen mit dem hydraulischen Abgleich, des eingeschränkten Heizbetriebs (räumlich eingeschränkt TEB, zeitlich eingeschränkt ZEB), der Verteilverluste der Heizung, der Lüftungswärmeverluste sowie der Verrechnung von Fremdwärme als Gewinn.

3.4.1. Bedarf: Normen zur EnEV

Seit dem Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung [55] werden zwei Bilanzverfahren für den rechtlichen Nachweis des Energiebedarfs von Neubauten verwendet. Die zweistufige Bilanz erfolgt mit der DIN V 4108-6 [44] zur Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs und der DIN V 4701-10 [45] zur Bewertung der Anlagentechnik. Beide Normen wurden während der Erstellung dieser Arbeit – im Jahr 2003 – neu herausgegeben, wobei inhaltliche Änderungen sich nicht auf die hier getroffenen Aussagen auswirken. Wichtige Eigenschaften sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Merkmal	Erläuterung
Bilanzgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ End- und Primärenergiebedarf ▪ Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Lüftung, Hilfsenergien
Bilanzzeiträume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIN V 4108-6: Jahresheizwärmebedarf mit Monats- oder Jahresbilanz ▪ DIN V 4701-10: Anlagentechnik in Jahresbilanz
Art der Energiekennwerte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIN V 4108-6: überwiegend absolute Energien ▪ DIN V 4701-10: flächenbezogene und dimensionslose Kennwerte
Berücksichtigung des eingeschränkten Heizbetriebes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TEB ist pauschal in der mittleren Innentemperatur von 19 °C erfasst ▪ DIN V 4108-6, Monatsbilanz: ZEB ist detailliert als verminderter Verlust (Transmission, Lüftung) berechenbar ▪ DIN V 4108-6, Jahresbilanz: ZEB pauschal erfasst ▪ DIN V 4701-10: eingeschränkter Heizbetrieb nicht erfasst
Berücksichtigung der Wärmeübergabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ flächenbezogene Kenngröße der Wärmeübergabeverluste in kWh/(m²·a) je nach Übergabe- und Regelsystem
Berücksichtigung und Bilanzierung von Wärmegevinnen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIN V 4108-6, Jahresbilanz: konstanter Ausnutzungsgrad für Wärmegevinne aus Personen/Geräten und Solareinstrahlung ▪ DIN V 4108-6, Monatsbilanz: variabler Ausnutzungsgrad für Wärmegevinne aus Personen/Geräten und Solareinstrahlung ▪ DIN V 4701-10: konstanter Ausnutzungsgrad für innere Gewinne aus Anlagentechnik
Bilanzierung der Verteilung und Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeverluste jeweils innerhalb und außerhalb des beheizten Bereiches ▪ für Heizung und Lüftung werden nur die zur Raumheizung nicht nutzbaren Anteile als Verlust bilanziert (verminderte Verluste) ▪ Verluste der Trinkwarmwasserverteilung und -speicherung werden voll als Verlust bilanziert; teilweise Gutschrift der Verluste im beheizten Bereich für die Raumheizung (Verluste und Gutschrift)
Bilanzierung der Wärmeerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bilanzierung über Aufwandszahlen und Deckungsanteile (Kessel, Wärmepumpen, Übergabestationen, Solaranlagen usw.)

Tabelle 3-1 Bilanzverfahren: Normen zur EnEV (Ausgaben 2000/2001)

Besonderheiten der DIN V 4108-6

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs kann mit Hilfe des Jahres- oder Monatsbilanzverfahrens erfolgen, wobei nur im Jahresbilanzverfahren eine Heizgrenze von 10 °C vorausgesetzt wird. Der Fremdwärmenutzungsgrad wird im Monatsbilanzverfahren anhand des Gewinn/Verlust-Verhältnisses bestimmt. Zu den Gewinnen zählen die solare und innere Fremdwärme (ohne Anlagentechnik), Verluste resultieren aus Transmission und Lüftung (ohne Effekte der Raumtempe-

raturabweichung aufgrund der Regelung und Wärmeübergabe). Die Zeitkonstante des Gebäudes wird berücksichtigt, jedoch keine Einflüsse der Regelung (oder der Anlagentechnik allgemein). Dieses Vorgehen erweitert FEIST für die Bewertung von Niedrigenergie- und Passivhäusern [59]. Er berücksichtigt die innere Fremdwärme aus Heizungs- und Trinkwarmwasserverteilung und setzt entsprechend des Gewinn/Verlust-Verhältnisses einen einheitlichen Nutzungsgrad an.

Besonderheiten der DIN V 4701-10

Einganggröße für die Berechnung ist der Heizwärmebedarf. Bewertet werden die Prozessschritte Übergabe, Verteilung, Speicherung, Erzeugung und Primärenergieumwandlung. Die Randbedingungen und viele gemittelte Kennwerte gelten für eine Heizgrenze von 10 °C. Entsprechend wird im Standardfall von 185 Heiztagen ausgegangen. Für Fremdwärme aus Heizung und Lüftung gilt ein Fremdwärmenutzungsgrad von pauschal 85 ... 90 %. Für die Wärmeabgabe von Leitungen der Trinkwarmwasserbereitung gilt ein Fremdwärmenutzungsgrad von 85 %.

Bedeutung der Verfahren für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Die DIN V 4701-10 bietet sehr detaillierte Rechenansätze zur Bestimmung von anlagentechnischen Kennwerten. Negativ ist die fehlende Möglichkeit zur Bewertung des eingeschränkten Heizbetriebes. Viele Größen, mit denen die Qualität der Anlage ausgedrückt werden könnten, sind allerdings fixe Werte bzw. nach festen Rechenalgorithmen zu bestimmende Größen. Einflüsse der Regelung lassen sich nur standardisiert erfassen. Das Verfahren gilt für eine Ausführung der Anlage nach den Regeln der Technik und ist daher in vorliegender Fassung nur bedingt dazu geeignet, die anlagentechnische Qualität zu bewerten.

3.4.2. Bedarf: SIA 380/1 und LEG

Im Folgenden werden die Schweizer Norm SIA 380/1 in den Ausgaben von 1988/1993 und von 2001 sowie deren deutsche Adaption, das LEG-Verfahren (Leitfaden für Energiebewusste Gebäudeplanung) von 1996, vorgestellt.

SIA 380/1, Ausgabe von 1988/1993 [143]

Die Norm umfasst das Verfahren zur Bestimmung von Energiekennwerten als auch einzuhalten- de Grenz- und anzustrebende Zielwerte des Energieverbrauchs. Es ist zur Bewertung von Neubauten und bestehenden Bauten (nach einer Gesamtanierung) anwendbar. In 6 Nutzungsprofilen für den Wohn- und Nichtwohnungsbau werden z.B. Innen- und Heizgrenztemperaturen festgelegt. Innentemperaturen von 18, 20 oder 22 °C korrespondieren mit Heizgrenztemperaturen von 10, 12 und 14 °C. Die Anlagentechnik wird mit einem Gesamtnutzungsgrad bewertet, der anhand vorher bestimmter Einzelverlustenergiemengen ermittelt wird.

Die Bestimmung des Fremdwärmenutzungsgrades erfolgt für die Jahres- oder Monatsbilanz mit je einer Näherungsformel. Hauptparameter ist das Verhältnis der Fremdwärme zu den Verlusten der Transmission und Lüftung. Der Einfluss der Regelung und Nachtabstaltung kann zusätzlich für zwei Fälle berücksichtigt werden: eine zentrale Vorregelung jeweils mit und ohne THKV. Fremdwärme aus der Heizung im beheizten Bereich wird zu 100 % nutzbar angesehen, Wärmeverluste des Trinkwarmwassersystems im beheizten Bereich dagegen als Fremdwärme vernachlässigt. In der Norm SIA 380/1 werden keine Kennwerte für Wärmeerzeuger, k-Werte, Leitungs-

längen usw. angegeben, hier wird auf andere Publikationen – z.B. auf den Leitfaden zur Anwendung der SIA 380/1 – verwiesen. Weitere Eigenschaften sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Merkmal	Erläuterung
Bilanzgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endenergiebedarf der Wärmeenergien ▪ Heizung, Lüftung, Trinkwarmwasserbereitung
Bilanzzeiträume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jahres- oder Monatsbilanz für den Heizwärmebedarf ▪ Jahresbilanz bevorzugt
Art der Energiekennwerte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ überwiegend absolute Energiemengen
Berücksichtigung des räumlich und zeitlich eingeschränkten Betriebes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ZEB und TEB wird mit der mittleren Innentemperatur erfasst ▪ keine Bewertung für die Anlagentechnik
Berücksichtigung der Wärmeverluste der Wärmeübergabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine
Berücksichtigung und Bilanzierung von Wärmegewinnen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ solare und innere Gewinne für Personen und Geräte berücksichtigt, für Anlagentechnik nicht berücksichtigt ▪ variabler Ausnutzungsgrad für Fremdwärme je nach Gewinn/Verlust-Verhältnis mit Berücksichtigung der Regelung
Bilanzierung der Verteilung und Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung der Wärmeverluste von Leitungen und Speichern der Heizung nur außerhalb des beheizten Bereiches ▪ Verluste des Trinkwarmwassersystems werden innerhalb und außerhalb des beheizten Bereiches voll als Verlust bilanziert
Bilanzierung der Wärmeerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bilanzierung als absolute Kenngrößen (Betrieb und Bereitschaft) ▪ nur Kesselanlagen

Tabelle 3-2 Bilanzverfahren: SIA 308/1 (Ausgabe 1983/89)

SIA 380/1, Ausgabe von 2001 [144]

Die Neuausgabe dient der schrittweisen Anpassung an die europäische Normung. Das Jahresbilanzverfahren für den Heizwärmebedarf entfällt. Die Berechnung des Nutzungsgrades für die Heizungsanlage sowie die vorher enthaltenen Planungshinweise für Gebäude sind in andere Normen ausgelagert. Die Bewertung der Anlage kann – bis alle neuen Verfahren fertig gestellt sind – weiterhin anhand der Ausgabe von 1988 erfolgen.

Es sind 12 Gebäudekategorien mit Standardnutzungsdaten definiert. Die benannten Innentemperaturen enthalten bereits die Effekte einer Absenkung. Eine zusätzliche Nachtabenkung kann nach dem Verfahren der EN 832 berechnet werden, darf aber nicht im SIA-Nachweis berücksichtigt werden. Ähnliches gilt für die Wärmerückgewinnung einer Lüftung. Der Fremdwärmenutzungsgrad wird nach dem Ansatz der EN 832 bestimmt, jedoch kann zusätzlich der Einfluss der Regelung als Minderungsfaktor F_g auf den Fremdwärmenutzungsgrad berücksichtigt werden. Drei Regelstrategien sind als Standardfälle vorgegeben: die Einzelraumregelung ($F_g = 1,0$), die Referenzraumregelung ($F_g = 0,9$) und die Außentemperaturregelung ($F_g = 0,8$).

LEG, Ausgabe 1996 [79]

Das LEG-Verfahren orientiert sich sehr streng an der SIA 380/1 (Ausgabe 1988/1993). Es übernimmt sowohl das Bilanzverfahren als auch die Richtwerte. Wichtige Unterschiede werden im Folgenden kurz benannt: Der Bezug von Energiekenngrößen erfolgt nicht auf die Brutto-

geschossfläche, sondern auf die Energiebezugsfläche. Zusätzlich kann eine solare Heizung und Trinkwarmwasserbereitung über Deckungsanteile berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt je nach Nutzungsprofil mit Innentemperaturen von 20 oder 22 °C bei korrespondierenden Heizgrenzen von 12 und 15 °C. Es ist eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsberechnung enthalten.

Bedeutung der Verfahren für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Sowohl SIA 380/1 als auch das LEG-Verfahren bieten positive Ansätze zur Bewertung der Anlagentechnik. So werden für Kessel die absoluten Wärmeverluste bestimmt und Verteilnetze der Trinkwarmwasserbereitung und Heizung sehr detailliert anhand realer Dämmstandards bewertet. Der Einfluss der Regelung auf die Fremdwärmenutzung wird berücksichtigt. Negativ ist die unterschiedliche Bewertung der Fremdwärme – je nach Herkunft – sowie die fehlende Bewertungsmöglichkeit für eingeschränkten Heizbetrieb.

3.4.3. Bedarf: Hessischer Energiepass

Der Hessische Energiepass [103] ist eine Weiterentwicklung des LEG-Verfahrens. Die letzte gedruckte Ausgabe stammt aus dem Jahr 1997; die Fortschreibung des Verfahren im Zuge des Inkrafttretens der EnEV ist als Datei erhältlich [101]. Die Anlagentechnik wird mit einem Gesamtnutzungsgrad bewertet. Dessen Bestimmung umfasst unter anderem eine detaillierte Berechnung der absoluten Wärmeverluste des Verteilsystems. Weitere Merkmale der gedruckten Ausgabe des Hessischen Energiepasses sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Merkmal	Erläuterung
Bilanzgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endenergie, Primärenergie, Äquivalenter CO₂-Ausstoß ▪ Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Lüftung, Hilfsenergien
Bilanzzeiträume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jahresbilanz
Art der Energiekennwerte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ überwiegend absolute Kennwerte und Nutzungsgrade
Berücksichtigung des eingeschränkten Heizbetriebes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ZEB vermindert die Gradtagszahl ▪ TEB wird in der mittleren Innentemperatur erfasst ▪ eingeschränkter Betrieb wird bei Bestimmung der Hilfsenergien erfasst, bei Berechnung von anlagentechnischen Wärmeverlusten jedoch nicht
Berücksichtigung der Wärmeübergabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeübergabe nicht explizit erfasst ▪ ggf. Änderung der Innentemperatur möglich
Berücksichtigung und Bilanzierung von Wärmegewinnen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung von solaren Gewinnen, inneren Gewinnen aus Personenabwärme und Geräten und ggf. aus Trinkwarmwasserbereitung ▪ keine Fremdwärme aus Heizung berücksichtigt ▪ variabler Ausnutzungsgrad für Fremdwärme je nach Gewinn/Verlust-Verhältnis
Bilanzierung der Verteilung und Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung der Wärmeverluste der Heizungsverteilung nur außerhalb des beheizten Bereiches ▪ Verluste der Trinkwarmwasserverteilung und -speicherung werden innerhalb und außerhalb des beheizten Bereiches als Verlust bilanziert
Bilanzierung der Wärmeerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ tabellierte Deckungsanteile und Nutzungsgrade ▪ für Kessel, Solaranlagen, BHKW, Wärmepumpen, Übergabestationen usw.

Tabelle 3-3 Bilanzverfahren: Hessischer Energiepass (Ausgabe 1997)

Für Innentemperaturen und Luftwechsel werden verschiedene Nutzungsprofile vorschlagen. Die Heizgrenze ist standardmäßig auf 12 °C unabhängig vom Gebäudealter festgelegt. Die Fremdwärme aus inneren Quellen (Personen, elektrischer Energieverbrauch) und solarer Einstrahlung kann detailliert berechnet werden. Fremdwärme aus Heizungsanlagentechnik wird nicht berücksichtigt. Der Ausnutzungsgrad richtet sich nach dem Gewinn/Verlust-Verhältnis. Die Art der Regelung spielt keine Rolle.

Bedeutung des Verfahrens für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Positiv ist die mögliche Verwendung projektspezifischer Randdaten bei gleichzeitig breiter Angabe typischer Kennwerte. Negativ ist die fehlende Bewertung des zeitlich eingeschränkten Betriebes für anlagentechnische Kenngrößen. Der Fremdwärmenutzungsgrad wird nicht für Fremdwärme aus Anlagentechnik verwendet und Rückkopplungen der Regelung im Raum vernachlässigt. Das Verfahren kann potentiell zur Bewertung von QS weiterentwickelt werden.

3.4.4. Bedarf: VDI 2067

Die Erstausgabe der VDI 2067 stammt aus dem Jahr 1957. Die Richtlinie wurde und wird ständig fortgeschrieben und enthält neben der Bilanzierung des Energiebedarfs für die Heizung auch wirtschaftliche Grundlagen, Bewertungsmöglichkeiten für die Klimatisierung, Dampferzeugung etc. Die folgenden Untersuchungen beschränken sich auf den Bereich Heizenergie.

Ausgaben von 1957, 1974, 1979 und 1985

In der Erstausgabe aus dem Jahr 1957 wird aus der Heizlast nach DIN 4701 (Ausgabe 1947), einer Gradtagszahl und mit Hilfe dreier Korrekturfaktoren der Heizenergiebedarf bestimmt. 1974 sind bereits sieben additiv verknüpfte Korrekturfaktoren $x_1 \dots x_7$ zur Bewertung der Heizlast nach DIN 4701 (Ausgabe 1959) vorhanden. Mit der Ausgabe von 1979 werden die additiven Korrekturwerte durch neun multiplikative Korrekturfaktoren $f_0 \dots f_8$ ersetzt. Basis der Berechnung bleibt auch in der Ausgabe von 1985 die Heizlast nach DIN 4701 (Ausgabe 1959). Die inneren und solaren Gewinne werden erstmals gesondert bestimmt und bewertet.

Ausgaben von 1991 (Entwurf) und 1993

Die Richtlinie besteht aus 7 inhaltlich aufeinander abgestimmten Blättern. Sie behandeln Wirtschaftlichkeit, Raumheizung (Blatt 2, zurückgezogen 2002, [161]), Raumluftechnik, Warmwasserbereitung (Blatt 4 [160]), Dampfbedarf, Wärmepumpen und BHKWs. Da die durchgehende Berechnung von Heizungsanlagen mit der derzeitigen Neuausgabe der Richtlinie noch nicht möglich ist, wird das zurückgezogene Blatt 2 im Folgenden näher untersucht.

Die Grundlage der Bilanz ist die Gebäudeheizlast nach DIN 4701 (Ausgabe 1983), die mit Faktoren $f_1 \dots f_5$ bewertet wird. Diese Faktoren berücksichtigen die mittlere Außentemperatur, zusätzliche Lüftungsverluste, zeitlich und räumlich eingeschränkten Heizbetrieb, Regelungseinflüsse und abweichende Sollraumtemperaturen. Die Effekte des zeitlich eingeschränkten Heizbetriebes werden mit Hilfe der Gebäudekonstanten bei verschiedenen Betriebsweisen (Absenkung, Abschaltung, Optimierung) bestimmt. Die Bewertung der Art der Regelung und deren Einflüsse auf die Wärmeverluste erfolgt analog zu VDI 3808 als Korrektur der Innentemperatur. Der Fremdwärmenutzungsgrad für die inneren und solaren Gewinne entspricht dem Faktor f_6 .

Einflüsse der Regelung auf den Fremdwärmenutzungsgrad werden zusätzlich berücksichtigt. Eine Übersicht über weitere Eigenschaften des Verfahrens zeigt Tabelle 3-4.

Merkmal	Erläuterung
Bilanzgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endenergie (Wärmeenergien, teilweise Hilfsenergien) und Kosten ▪ Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Klimatisierung, etc.
Bilanzzeiträume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jahresbilanz, Heizgrenze 15 °C
Art der Energiekennwerte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ absolute Energien, Korrekturfaktoren, Nutzungsgrade
Berücksichtigung des räumlich und zeitlich eingeschränkten Betriebes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solltemperatur wird korrigiert, sofern ZEB und/oder TEB vorliegt ▪ Berücksichtigung von ZEB auch für die technischen Verluste der Heizung und Trinkwarmwasserbereitung
Berücksichtigung der Wärmeverluste der Wärmeübergabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korrekturfaktoren für die Raumtemperaturen
Berücksichtigung und Bilanzierung von Wärmegewinnen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ innerer Fremdwärmeanfall aus Personen und Geräten sowie solarer Fremdwärmeanfall werden aus Anhaltswerten bestimmt ▪ Ausnutzungsgrad der Fremdwärme hängt von der Art der Regelung und der Höhe der solaren Gewinne zu den Wärmeverlusten der Transmission und Lüftung sowie einer Gebäudekonstanten ab ▪ Anlagentechnikverluste sind keine inneren Gewinne
Bilanzierung der Verteilung und Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bilanzierung mit absoluten Kennwerten für Trinkwarmwasserbereitung ▪ für die Heizung Bilanzierung anhand eines Verteilungsnutzungsgrades
Bilanzierung der Wärmeerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kessel in Blatt 2 mit Hilfe von Nutzungsgraden

Tabelle 3-4 Bilanzverfahren: VDI 2067 (Ausgabe 1993)

Die nach VDI 2067 (Ausgabe 1993) berechneten Energiebedarfswerte stimmen – verglichen mit Ergebnissen anderer Bilanzverfahren – gut mit realen Messwerten überein [118].

Noch unvollständige Ausgabe von 1998 ff.

Eine Überarbeitung der VDI 2067 erfolgt seit 1998 [162]. Im Zuge der Neuerscheinungen einzelner Blätter werden die vorhandenen Teile sukzessiv zurückgezogen. Die Richtlinie mit Ausgabe 1998 ff. bilanziert ausgehend vom Bedarf bis zum Aufwand in den Prozessschritten Nutzenübergabe, Verteilung und Erzeugung mit Hilfe von Aufwandszahlen. Der Bedarf wird mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation ermittelt. Erschienen sind bis Ende 2003 die Grundlagen der Wirtschaftlichkeit, die Beschreibung und Randbedingungen der Simulationsrechnung, Energiebedarfswerte und Bewertung der Nutzenübergabe für Trinkwarmwasserbereitung sowie die Blätter mit Kennwerten für die Nutzenübergabe der Heizung und Raumlufttechnik. Die Ergebnisse sind nicht mit denen alter Ausgaben der VDI 2067 und mit der Praxis vergleichbar [174].

Bedeutung des Verfahrens für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Die Ansätze der VDI 2067 (Version 1993) in Hinblick auf die Bewertung von Anlagentechnik, insbesondere der Regelungstechnik, sind detailliert. Durch die Verwendung von Korrekturfaktoren, die aus Simulationen abgeleitet sind, und im Fall der Heizungsverteilung von pauschalen Nutzungsgraden können die Effekte einer Qualitätssicherung jedoch nur schwer nachvollzogen werden. Die Neuausgabe kann noch nicht verwendet werden, sie ist noch unvollständig.

3.4.5. Verbrauch: VDI 3807

Ein Verfahren zur Verbrauchsdatenauswertung für Gebäude wird in VDI 3807 beschrieben. Blatt 1 (neueste Ausgabe 1994) [164] behandelt die Grundlagen zur Berechnung von Energiekennwerten. Die Blätter 2 (neueste Ausgabe 1998) [165] und 3 (neueste Ausgabe 2000) [166] liefern typische Verbrauchskennwerte und Zielkennwerte für Heizenergie und Strom bzw. Wasser. Einflüsse der Witterung (konkret der Außentemperatur) auf die gemessenen Verbrauchswerte sowie der Länge des Messzeitraumes werden durch eine Bereinigung ausgeglichen. Anschließend sind die gebildeten bereinigten Kennwerte mit denen anderer Gebäude vergleichbar.

Die Bereinigung von Verbrauchskennwerten der Heizung erfolgt unabhängig von Typ und Alter des Gebäudes mit Hilfe der Heizgradtage G_{15} (vergleiche Bild 3-5) bezogen auf ein langjähriges klimatisches Mittel und i.d.R. auf einen mittleren Standort in Deutschland. Es wird dabei nicht in witterungsabhängige und witterungsunabhängige Anteile des Verbrauchs unterschieden. Wasser- und Stromverbrauchskennzahlen werden allein anhand der Messzeit auf einen Vergleichszeitraum (i.d.R. ein Jahr) bereinigt.

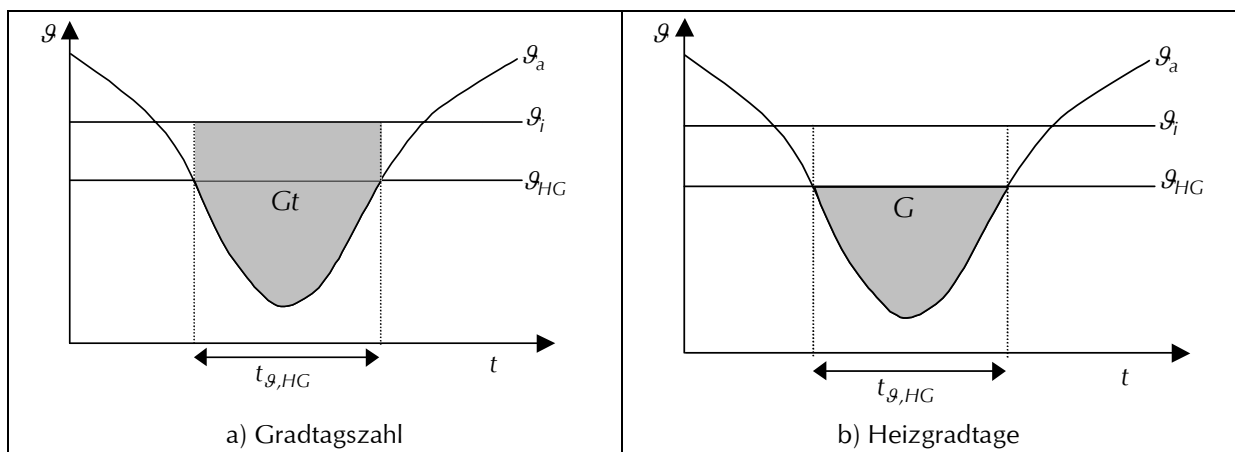


Bild 3-5 Definition von Gradtagszahl und Heizgradtagen

In der Praxis erfolgt die Bereinigung vielfach mit der Gradtagszahl [15]. Dies bedeutet eine rechnerische Vernachlässigung der Fremdwärmegewinne an den Heiztagen. Die Abweichung der mit G oder G_t bereinigten Daten untereinander ist umso größer, je mehr die klimatischen Verhältnisse des Untersuchungsjahres vom Standardjahr abweichen. Die Verwendung von Gradtagszahlen entstammt den Anfängen der Energiebilanzierung [128] und wurde – wegen größerer Praxisnähe – mit der VDI 3807 in die Verwendung von Heizgradtagen geändert. Die VDI 3807 wird während der Erstellung dieser Arbeit überarbeitet, wobei für die Neuausgabe die Bereinigung mit der Gradtagszahl G_t wieder erwogen wird.

Bedeutung des Verfahrens für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Das Verfahren der VDI 3807 ist die Grundlage für die Verbrauchsuntersuchungen von Feldprojekten. Da der Energieverbrauch eines Gebäudes – vor allem wegen des Nutzerverhaltens – nicht proportional zur Außentemperatur sein muss, sind Weiterentwicklungen der Ansätze denkbar, um eine Qualitätssicherung der Anlagentechnik sichtbar zu machen, siehe Kapitel 6.2.

3.4.6. Verbrauch: VDI 3808

Die VDI 3808 (neueste Ausgabe 1993) [167] dient der Berechnung von Energieeinsparungen durch gebäude- und anlagentechnische Optimierungsmaßnahmen. Grundlage ist der gemessene Jahresenergieverbrauch des Gebäudes. Mit Hilfe von Kennzahlen wird die voraussichtliche Verbrauchsminderung bestimmt. Für die Bilanz werden vier Hauptgrößen benötigt: der Normwärmebedarf bzw. die Heizlast nach DIN 4701 (Ausgabe 1983) oder einem Näherungsverfahren, die Vollbenutzungsstunden der Anlage, der Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers und der Verteilungsnutzungsgrad. Diese Kenngrößen werden vor und nach der Optimierung bestimmt. Die Bereinigung von Verbrauchsdaten erfolgt mit Hilfe von Gradtagszahlen.

Der Verteilungsnutzungsgrad muss nicht explizit berechnet werden, sondern kann anhand der Dämmung der Leitungen und der Betriebstemperaturen qualitativ abgeschätzt werden. Es ist jedoch ein Verfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustes je Meter Rohrlänge angegeben. Die Einflüsse der Regelung wirken sich auf die Vollbenutzungsstunden der Heizung, den Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers und den Verteilungsnutzungsgrad aus. Der Gütefaktor f_R zur Korrektur der Raumtemperatur ist ein Maß für die mittlere Regelabweichung aufgrund von zentraler und dezentraler Regelung. Der eingeschränkte Heizbetrieb führt abhängig von der Gebäudekonstante, der Art des Anlagenbetriebs und anderer Einflüsse ebenfalls zu einer Raumtemperaturkorrektur (Faktor f_E).

Zur Bewertung der inneren (Personen und elektrischer Energieverbrauch) und solaren Fremdwärme wird ein Reduktionsfaktor r_F – analog zum Fremdwärmenutzungsgrad – definiert. Er hängt sowohl von der regelungstechnischen Ausstattung des Gebäudes ab als auch vom Gewinn/Verlust-Verhältnis (solare und innere Fremdwärme ohne Anlagentechnik, Verluste durch Transmission und Lüftung). Die VDI 3808 wird während der Erstellung dieser Arbeit novelliert. Das Rechenverfahren soll sich künftig an die neue Ausgabe der VDI 2067 anlehnen.

Bedeutung des Verfahrens für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Die Bewertung von regelungstechnischen Maßnahmen und deren Auswirkung auf die Energiebilanz hat in der Richtlinie Vorrang. Die Ansätze der VDI 3808 sind vielfach in die VDI 2067 (Ausgabe 1993) übernommen worden. Zur Bewertung von Fremdwärme aus Anlagentechnik sowie des hydraulischen Abgleichs besteht Bedarf zur Weiterentwicklung.

3.4.7. Weitere Berechnungsverfahren

Neben den ausführlich vorgestellten Energiebilanzverfahren zur Bedarfsberechnung und Verbrauchsbereinigung existieren zahlreiche weitere. Einzelne, relevante Besonderheiten weiterer Verfahren werden im Folgenden genannt. Die europäische Studie ENPER-TEBUC vergleicht darüber hinaus die verschiedenen Berechnungsansätze innerhalb der EU [190].

EN 832 und EN 14335

Die europäische Norm EN 832 [43] ist die Grundlage für zahlreiche europäische Rechenverfahren zur Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs. Die ISO 13790 [86] ist die der EN 832 ent-

sprechende internationale Norm. In ihren Inhalten und der Relevanz für die Bewertung der Qualitätssicherung gelten die in Kapitel 3.4.1 zur DIN V 4108-6 getroffenen Aussagen. Die EN 14335 [32] ist die europäische Norm, die inhaltlich der deutschen DIN V 4701-10 entspricht.

Internationale Normung zur ISO 13790, Stand 1986

WERNER definiert in Anlehnung an den Stand der Normung 1986 die akkumulierte Temperaturdifferenz ATD [194]. Dabei wird die nutzbare Fremdwärme als eine verminderte Innentemperatur (Basistemperatur) angesehen. Es ergibt sich zur Berechnung des Heizwärmebedarfs aus der Transmissions- und Lüftungsheizlast H_{T+V} der einfache Zusammenhang nach Gleichung (3-7). Die Basistemperatur entspricht im Prinzip einer monatlichen Heizgrenztemperatur. Die Größe ATD muss jedoch unter Berücksichtigung des Fremdwärmenutzungsgrades η und des Gewinn/Verlust-Verhältnis γ bestimmt werden – siehe Gleichung (3-8).

$$Q_h = ATD \cdot H_{T+V} \quad (3-7)$$

$$ATD = Gt \cdot (1 - \eta \cdot \gamma) \quad (3-8)$$

Verfahren von Hauser und Hausladen [70]

Die Energiebedarfsbilanz verwendet einen festen Fremdwärmenutzungsgrad von 85 % für die solare und innere Fremdwärme (ohne Anlagentechnik). Eine Besonderheit des Verfahrens ist, dass die Wärmeverluste der Heizungsverteilung innerhalb des beheizten Bereiches als nicht vollständig nutzbar angesehen werden. Nur ein Teil wird dem Heizwärmebedarf gutgeschrieben.

VDZ Energiepass [72]

Die Autoren schlagen vor, die verschiedenen Fremdwärmeanteile mit unterschiedlichen Nutzungsgraden zu bewerten, da dies realitätsnäher ist. Dabei hat die Nutzung der inneren und solaren Fremdwärme gegenüber der Fremdwärme aus Anlagentechnik Priorität. Die Anpassung von Bedarf und Verbrauch erfolgt mit Hilfe eines Faktors, der zwischen dem theoretisch berechneten und dem aus Verbrauchsdaten bestimmten Heizwärmebedarf steht. Einmal berechnet wird dieser Faktor auch bei der Abschätzung von Energieeinsparungen verwendet.

Bedeutung der Verfahren für die Bewertung von QS der Anlagentechnik

Fazit der Untersuchungen ist, dass eine QS der Anlagentechnik und ihre Effekte auf den Energiebedarf bzw. -verbrauch in den heute etablierten Energiebilanzverfahren nicht oder nur nach entsprechender Modifikation berücksichtigt werden kann. Auch die Bilanzierung von Fremdwärme sowie von Einflüssen der Regelung und Hydraulik ist nur unzureichend gelöst. Dennoch weisen die untersuchten Bilanzverfahren positive und detaillierte Ansätze für die Bestimmung von Einzelkennwerten auf, die zur Bewertung von QS weiterentwickelt werden können.

Ziel der Ableitung eines neuen Bilanzverfahren in Kapitel 6.2 ff. ist, alle Effekte der QS als Differenzenergiemengen bzw. als veränderte Innentemperaturen, Luftwechsel, Systemtemperaturen, Betriebszeiten und Hilfsenergiemengen sichtbar zu machen. Damit werden keine neuen Energiekennwerte eingeführt, sondern bekannte Größen und Ansätze weiterentwickelt.

4. Qualitätsmerkmale des Baukörpers und der Nutzung

Bauliche und nutzerbedingte Einflüsse auf die Energiebilanz und deren energetische Bewertungsmöglichkeit werden vorgestellt. Die Energiekennwerte werden einzeln besprochen, eine Verknüpfung zur durchgehenden Energiebilanz erfolgt in Kapitel 6. Es werden sowohl Qualitätsmerkmale des Neubaus untersucht, als auch Hinweise für den Bestand gegeben.

4.1. Qualitätsmerkmale des Baukörpers

Kompaktheit des Gebäudes

Die Optimierung der Kompaktheit eines Gebäudes ist ein wichtiger Teil der Neubauplanung. Dieses Qualitätsmerkmal bestimmt die Transmissionswärmeverluste und damit den Energieverbrauch des Gebäudes über seine gesamte Lebensdauer maßgeblich mit. Bei der Modernisierung kann der Kompaktheitsgrad i.A. nicht verändert, höchstens optimiert, werden.

$$q_T = \frac{Q_T}{A_{\text{Bezug}}} = \frac{A}{A_{\text{Bezug}}} \cdot U_m \cdot Gt = \frac{A}{V_{\text{Bezug}}} \cdot U_m \cdot Gt \cdot h_{\text{Bezug}} \quad (4-1)$$

Die auf die beheizte Fläche bezogenen Transmissionswärmeverluste q_T sind proportional zum Kompaktheitsgrad A/V_{Bezug} bzw. A/A_{Bezug} – siehe Gleichung (4-1). In der Regel werden als Bezugsvolumen das äußere Volumen V_e und als Bezugsfläche die beheizte (Nettogeschoss-) Fläche verwendet. Die Umrechnung der beiden Kennwerte erfolgt mit der Raumhöhe h_{Bezug} (Geschosshöhe unter Berücksichtigung der Wanddicken). Die wärmeübertragenden Umfassungsflächen A sowie das äußere Volumen V_e eines Gebäudes können z.B. nach Anhang B der DIN EN ISO 13789 ermittelt werden. Typische Kompaktheitsgrade sind in der Literatur angegeben [89] [143].

Wärmedurchgangskoeffizienten

Das wichtigste Qualitätsmerkmal des Baukörpers sind die Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Außenbauteile. Der Transmissionswärmeverlust nach Gleichung (4-1) verhält sich proportional zum mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_m . Die Festlegung und Optimierung der Wärmedurchgangskoeffizienten in der Planungsphase eines Gebäudes erfolgt unter baukonstruktiven und bautechnologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten. Die Qualität des Baukörpers wird darüber hinaus maßgeblich in einer mangelfreien Ausführung der Planung und Ausführung bestimmt. Diese Aussagen gelten für Neubauten ebenso wie für die Modernisierung von bestehenden Gebäuden.

Zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten gibt es zahlreiche Regelwerke und Untersuchungen. Für Neubauten wird auf einschlägige Normen und Baustoffdatenbanken verwiesen. Für die Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten im Gebäudebestand können Typologien herangezogen werden, die je nach Baualter, Standort, Gebäudetyp und anderen Merkmalen typische Werte vorschlagen [47] [101]. Die Ermittlung hinreichend sicherer Daten im Bestand erfordert in jedem Fall die Aufnahme der Bauteile vor Ort.

Wärmebrückenoptimierung

Einen weiteren wichtigen Einfluss auf die energetische Qualität des Baukörpers haben Wärmebrücken. Diese sollten in der Planung und Ausführung von Neubauten, aber auch bei Modernisierungen minimiert werden. Wärmebrücken sind nicht nur in energetischer, sondern auch in feuchteschutztechnischer Hinsicht zu untersuchen. Sie können ein-, zwei-, oder dreidimensional an Grenzschichten und -kanten von Bauteilen auftreten. Zu nennen sind hier beispielsweise die Einbindung von Fenstern, Rollladenkästen und Türen in die umgebenden Bauteile, Durchdringungen von Balkon- oder Terrassenplatten, Anschlusskanten von Bodenplatten und Dächern. Wärmebrücken können in der Praxis durch Thermographiemessungen sichtbar gemacht werden.

Die Wärmeverluste von Wärmebrücken können mit thermischen Simulationsprogrammen berechnet werden. Alternativ sind bestimmte Einbausituationen genormt [37], oder es werden pauschale Zuschläge auf den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten gewährt.

Thermische Speicherfähigkeit

Die thermische Speicherfähigkeit eines Gebäudes ist ein Qualitätsmerkmal, das sich nur indirekt in der Energiebilanz bewerten lässt. Begründen lässt sich dies durch die Auswirkung der Speicherfähigkeit auf instationäre Prozesse; im rein stationären Betrieb beeinflusst sie die Energiebilanz eines Gebäudes nicht. Eine hohe Speicherfähigkeit der Gebäudemassen bedeutet eine geringe Auskühlung des Gebäudes bei einer eingeschränkten Beheizung und ein hohes Potential, auf Fremdwärmeanfall zu reagieren. Es kann viel Wärme gepuffert werden, die Räume erwärmen sich langsam. Die Speicherfähigkeit eines Gebäudes und deren energetische Wirksamkeit sind stark an das Nutzerverhalten und die Qualität der Anlagentechnik gekoppelt. Bei einer baulichen Sanierung kann die thermische Speicherfähigkeit beeinflusst werden; sie sinkt z.B., wenn eine Innendämmung vorgesehen wird.

Die thermische Speicherfähigkeit und die Innentemperatur eines Gebäudes sind gekoppelt. Auswirkungen einer veränderten Speicherfähigkeit lassen sich z.B. in einer veränderten mittleren Innentemperatur darstellen.

Passive Solarwärmenutzung

Die bauliche Qualitätssicherung eines Gebäudes schließt auch die Nutzung passiver Solarwärme ein. Maßnahmen zur passiven Solarwärmenutzung in der Heizzeit – Ausrichtung und Größe von Fenstern, Energiedurchlassgrade, Verschattung und Verschmutzung sowie Rahmenanteile – können bei der Bestimmung des solaren Fremdwärmeanfalls berücksichtigt werden. Der Einfluss der passiven Solareinstrahlung auf die Innentemperatur und den Luftwechsel kann nur zusammen mit dem restlichen Fremdwärmeanfall bewertet werden.

Sommerlicher Wärmeschutz

Die energetische Optimierung von Gebäuden dient der Energieeinsparung. Es werden daher immer besser gedämmte Gebäude mit geringeren Heizlasten geplant oder auf entsprechenden Standard modernisiert. Bei gleichzeitig eher steigenden Fremdwärmemengen kann sich im Extremfall dadurch auch im Wohnungsbau ein sommerlicher Kühlbedarf einstellen. Die bauliche Planung muss auch den sommerlichen Wärmeschutz einschließen. Dieser ist eng mit der

passiven Solarwärmenutzung und der thermischen Speicherfähigkeit eines Gebäudes verbunden. Für jede Art von Kühlung – passiv oder aktiv – sind Gebäude mit großen Speichermassen sinnvoll [135]. Während im Winter die äußeren Verschattungen der transparenten Bauteile zu vermeiden sind, ist im Sommer ein ausreichender Wärmeschutz sicherzustellen. Fensterflächen mit direkter Sonneneinstrahlung sollten über einen wirksamen Sonnenschutz oder eine entsprechende Beschattungseinrichtung verfügen, wobei diese so auszuwählen sind, dass in Fensterhöhe genügend Tageslicht vorhanden ist.

Gebäudedichtheit und Infiltration

Ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal des Baukörpers ist die Luftdichtheit. Sie gewinnt bei steigendem Wärmedämmstandard im Neubau und der Modernisierung an Bedeutung, da die Lüftungswärmeverluste relativ zu den Transmissionswärmeverlusten steigen. Die Qualitätssicherung erstreckt sich über die Planung eines Dichtheitskonzeptes für alle Anschlüsse und Durchdringungen von Bauteilen und die fachgerechte Umsetzung des Konzeptes am Bau. Für die Sanierung von bestehenden Gebäuden bestehen die Forderungen an die Luftdichtheit und entsprechende Planung und Umsetzung ebenso.

Die Dichtheit kann mit dem *Blower Door Test* nach DIN EN 13829 geprüft werden. Damit ist diese Maßnahme der QS im Feld überprüfbar. Der bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen innen und außen gemessene Volumenstrom wird auf das beheizte Luftvolumen bezogen und so in einen mittleren Fugenluftwechsel umgerechnet. Dieser kann bei der energetischen Bewertung des Gebäudes berücksichtigt werden. Untersuchungen von GEIGER und ROUVEL zeigen, dass sich im Quervergleich verschiedener Gebäudeuntersuchungen mittlere Infiltrationsluftwechsel von 0,1 ... 0,3 h⁻¹ im Betrieb für dichte Gebäude ergeben [63].

Ob und wie der Grundluftwechsel durch Infiltration auf den Gesamtluftwechsel des Gebäudes angerechnet werden kann, wird derzeit in der Fachwelt diskutiert. Es ist denkbar, dass ein Teil des durch natürliche Undichtheiten hervorgerufenen Luftwechsels den nutzerbedingten Luftwechsel vermindern kann. Bei sehr undichten Gebäuden ist nach diesem Grundsatz der nutzerbedingte Luftwechsel (durch aktives Fensteröffnen) geringer als bei dichten Gebäuden. Die realen Zusammenhänge können nur durch Felduntersuchungen geklärt werden.

Wärmetransport innerhalb des Gebäudes

NEUGEBAUER spricht das Problem des Wärmetransportes innerhalb eines Gebäudes bereits 1935 wie folgt an: "... daß nun auch ein findiger Mann einfach sämtliche Heizkörper seiner Wohnung abstellen und seinen Wärmebedarf von den Flurnachbarn könnte decken lassen, sich also seine Heizwärme zusammenstehlen könnte, das geht doch wohl zu weit!" [149].

Der Wärmetransport innerhalb des Gebäudes wird auch als "Wärmeklau" oder "vagabundierende Wärme" bezeichnet. Er ist umso ausgeprägter, je geringer die Wärmedurchgangswiderstände der Innenwände verglichen mit denen der Außenwände sind. Bei neuen bzw. sanierten Gebäuden mit hochwärmegeprägten Außenwänden kann der Wärmefluss zwischen Räumen bzw. Wohneinheiten wegen der hohen inneren thermischen Kopplung größer sein als an die Umgebung. Dazu sind mit besserem baulichen Standard bereits kleine Temperaturspreizungen

zwischen zwei Räumen als treibende Kraft ausreichend. Der Wärmetransport innerhalb des Gebäudes verändert das Auskühlverhalten eines Gebäudes bei räumlich eingeschränkter Beheizung. Je höher der Wärmezufuss eines Raumes durch Innenwände verglichen mit dem Wärmeabfluss über Außenbauteile, desto geringer ist der energetische Effekt einer räumlichen Absenkung.

Die dynamischen Effekte des Wärmetransportes innerhalb von Gebäuden, die auch durch die Nutzung beeinflusst werden, können in veränderten Innentemperaturen erfasst werden. Die Wärmeströme zwischen Wohneinheiten verschiedener Nutzer müssen bei der Einzeluntersuchung von Wohnungen innerhalb eines Gebäudes berücksichtigt werden.

Übersicht der Kennwerte und Bewertungsmöglichkeit der QS

Die wichtigen baulichen Qualitätsmerkmale (vor allem der Ausführung) können nach den Ansätzen in Tabelle 4-1 energetisch bewertet werden. Dieses Vorgehen wird in einigen Bilanzverfahren bereits seit längerer Zeit praktiziert. Werden Qualitätsmerkmale energetisch bewertet, kann ein Einsparpotential für ein konkretes Objekt abgeschätzt werden.

Merkmal	Möglichkeit der Bewertung des Einflusses in der Energiebilanz
Kompaktheit	Anpassung des Kompaktheitsgrades
Wärmedurchgangskoeffizienten	Anpassung des mittleren U-Wertes
Wärmebrücken	Anpassung des U-Wertes bei der Bestimmung der Transmissionswärmeverluste
Gebäudedichtheit und Infiltrationsluftwechsel	Anpassung des baulich bedingten Luftwechsels bei der Berechnung der Lüftungswärmeverluste
Speicherfähigkeit und Wärmetransport innerhalb des Gebäudes	Änderung der mittleren Innentemperatur des Gebäudes
Passive Solarwärmenutzung	Berechnung der solaren Wärmegewinne

Tabelle 4-1 Bewertung der Qualität des Baukörpers

Viele bauliche Einflüsse, die vor allem die Qualität der Planung berühren (Lage der Fenster, Art der Dämmmaterialien, Kompaktheitsgrad) werden i.d.R. als fest vorgegeben bei der Bilanzierung berücksichtigt. Dynamische Effekte sollten sich in messbaren Eigenschaften, z.B. Innentemperaturen, ausdrücken. Im Rahmen der Arbeit wird die Qualitätssicherung der baulichen Ausführung nicht vertieft behandelt. Der Gebäudeentwurf bzw. das ausgeführte Gebäude wird in der Bilanz als gegeben angenommen. Zu Vertiefung wird auf andere Arbeiten verwiesen.

4.2. Qualitätsmerkmale der Nutzung

Die Merkmale der Nutzung sind fest verknüpft mit der Bewertung der Anlagentechnik und ihrer Qualität. Hervorzuheben sind insbesondere der Anspruch an thermische Behaglichkeit und das Lüftungsverhalten. SCHLOTT fordert für die reale Energieeinsparung ein "intelligentes Nutzerverhalten", nimmt gleichzeitig aber an, dass der breiten Bevölkerung kein detailliertes Fachwissen vermittelt werden kann [134]. Die Energieeinsparung muss also durch angepasste Anlagenkonzepte erfolgen, auch dies setzt grundsätzlich ein einsichtiges Nutzerverhalten voraus.

Belegungsdichte

Die Belegungsdichte eines Gebäudes (personenbezogene Fläche bzw. Volumen) bestimmt eine Reihe von Energiekennwerten, so z.B. die Ausprägung der räumlichen Teilbeheizung, die Höhe der inneren Fremdwärme, das Lüftungsverhalten, den Wasserverbrauch. Konventionelle Bilanzverfahren gehen von einer mittleren Belegung von 30 ... 35 m²/Person aus, die Auswertung statistischer Daten (Kapitel 2.2) belegt heute eine Wohnfläche von 45 m²/Person. Für die Auswertung konkreter Projekte ist die Bestimmung der realen Wohnfläche je Person empfehlenswert.

Raumtemperatur

Die Raumtemperatur ist neben dem Luftwechsel die wichtigste Einflussgröße des Nutzers auf die Energiebilanz. Der Nutzer gibt Temperatursollwerte vor. Diese können zu verschiedenen Tages- und Wochenzeiten unterschiedlich sein. Eine Sollwertveränderung wird im nächsten Abschnitt (Teilbeheizung) besprochen.

Das Einhalten definierter Temperatursollwerte hängt vom Dämmstandard und der Dichtheit des Gebäudes, von der Anlage, ihrer Regelung und vom Nutzer ab. Sofern die Anlage ausreichend Leistungskapazität hat, können die Sollwerte erreicht und ggf. überschritten werden. Die dezentrale oder in Ausnahmefällen die zentrale Regelung sorgen dafür, dass die Sollwerte annähernd eingehalten werden. Bei Regelgeräten mit hoher bleibender Regelabweichung oder Regelungenauigkeit ist ein zusätzlicher Nutzereingriff (Sollwertverschiebung) zu erwarten, so dass der gewünschte Raumtemperatursollwert annähernd erreicht wird. Daher können auch Regelsysteme mit schlechter Regelcharakteristik mit entsprechendem Nutzereingriff einigermaßen bedarfsgerecht betrieben werden. Wärmeübergabeverluste bezogen auf ein ideales Regelsystem können in diesem Fall nicht eindeutig bestimmt werden. Die Nutzung von Fremdwärme wird ebenfalls vom Nutzer mitbestimmt. Eine entscheidende Rolle spielt die Toleranz gegenüber der Temperaturerhöhung bzw. die Schwelltemperatur für das Ablüften.

Mit seinem Temperaturkomfortverhalten beeinflusst der Nutzer vor allem die Wärmeverluste der Transmission und Lüftung. Typische Innentemperaturen für den Wohnbau liegen bei 18 ... 22 °C [100] [201]. 20 °C ist ein weit verbreiteter Ansatz für die Energiebilanzierung, wobei dieser Wert noch keine Regeleffekte enthält [101]. REIB ET AL [121] stellen in der Heizzeit im Mittel etlicher untersuchten Häuser und Räume eine Temperatur von etwa 21 °C fest, wobei die Werte für das EFH etwas darunter, für das MFH etwas darüber liegen. Dieser Wert enthält alle Effekte der Regelung (Regelabweichungen und eingeschränkten Heizbetrieb) und Fremdwärmenutzung [121]. In den Übergangsmonaten ist die Temperatur höher.

Teilbeheizung

Unter Teilbeheizung ist der teilweise räumlich (TEB) und der zeitlich (ZEB) eingeschränkte Heizbetrieb durch gewollte Sollwertverschiebung der Innentemperatur zu verstehen. Auch eine Sollwertverschiebung zu höheren Werten kann analog der Teilbeheizung betrachtet werden. Der Nutzer löst eine Teilbeheizung durch Eingriff in die dezentrale (Raum-) Regelung und ggf. in die zentrale Regelung aus. Nutzerbedingte Teilbeheizung (positive und negative Sollwertverschiebung) und der nutzerbedingte Temperatursollwert können in der Energiebilanzierung nicht

getrennt werden. Messwerte für Raumtemperaturen sind immer von den Effekten der ZEB und TEB sowie der Regelung geprägt. Die Effekte der Teilbeheizung sind weiterhin stark vom baulichen Standard des Gebäudes abhängig. Wegen der hohen inneren thermischen Kopplung führt die nutzerbedingte Teilbeheizung in gut gedämmten Gebäuden nur zu einer geringen Auskühlung der Räume. Untersuchungen der Energieverbrauchswerte für 250 Gebäude unterschiedlicher Altersklassen zeigen, dass der Anteil der räumlichen Teilbeheizung abnimmt bzw. der Mittelwert der Innentemperatur in Gebäuden neueren Baualters ansteigt [51].

Jede Art der Teilbeheizung (positive und negative Sollwertverschiebung) – vor allem in Rückkopplung mit der dezentralen und zentralen Regelung sowie dem Auftreten von Fremdwärme – kann in einer mittleren Innentemperatur ausgedrückt werden.

Innere Fremdwärme aus Elektroenergieverbrauch und Personenabwärme

Die Nutzungsqualität eines Gebäudes wird stark durch den inneren Fremdwärmeanfall geprägt. Dieser wird in der üblichen Energiebilanz nur als Abwärme von Personen und aus dem Haushaltsstromverbrauch definiert (vgl. Kapitel 3.2). Die so definierte innere Fremdwärme weist einen ausgeprägten Tagesgang und eine räumlich starke Verteilung (Küche, Hauptnutzräume), jedoch einen geringer ausgeprägten Jahresgang auf. Im Winter ist der Fremdwärmeanfall etwa 35 % höher als im Sommer [126]. Die Ansätze für die Höhe der inneren Fremdwärme variieren. Die Angaben reichen von 1,9 W/m²... 2,6 W/m² (Sommer ... Winter) für das NEH und Passivhaus [126] bis 2,5 W/m²... 3,2 W/m² (EFH ... MFH) für den Gebäudedurchschnitt [103]. Ältere Untersuchungen ermitteln etwa 5 W/m² [110] [193].

Der Fremdwärmeanfall durch Haushaltsstromverbrauch kann aus Messwerten abgeschätzt werden. Es wird jedoch nur ein bestimmter Anteil des Verbrauchs als innere Fremdwärme wirksam. Die typische Nutzbarkeit wird mit 80 % geschätzt [143]. Insgesamt kann eine gute Korrelation zwischen der Wohnfläche und dem Stromverbrauch festgestellt werden. In Einpersonenhaushalten mit geringerer Belegungsdichte liegen die personenbezogenen Verbrauchswerte etwas höher. Für den Einzelfall sind Abschätzungen anhand der Personenbelegung, deren Anwesenheitsdauer und dem Haushaltsstromverbrauch sinnvoll.

Lüftungsverhalten

Der größte Nutzereinfluss auf den Energieverbrauch liegt im Lüftungsverhalten. Die Lüftung beeinflusst vor allem die Nachtauskühlung eines Gebäudes sehr viel stärker als Transmissionswärmeverluste. Dieser Einfluss steigt im besser gedämmten Gebäude. Ohne ein Absinken der Raumtemperatur können (überhöhte) Lüftungswärmeverluste nur durch entsprechende Reserven in der Heizleistung gedeckt werden.

Der zum Feuchteabtransport notwendige Luftaustausch ist in den Jahreszeiten verschieden. Er kann aus bauphysikalischer Sicht zur Vermeidung von Wasserdampfkondensation (Schimmelpilzbildung) und aus Komfortgesichtspunkten (maximale absolute Feuchte für Behaglichkeit) abgeschätzt werden. Die absolute Feuchte ist ein Indikator für das Aufnahmevermögen von Wasserdampf in der Luft. Untersuchungen haben gezeigt, dass für einen mittleren deutschen Standort bei üblicher Belegungsdichte des Gebäudes (ca. 35 ... 40 m²/Person) und normalen

Feuchtelasten (nach [125]) in den Kernwintermonaten mittlere wohnungsbezogene Luftwechsel von etwa $0,25 \text{ h}^{-1}$, in den Übergangsmonaten maximal $0,60 \text{ h}^{-1}$ allein zum Feuchteabtransport benötigt werden [158]. Weitere Ausführungen folgen in Kapitel 7.2.1.

RICHTER ET AL [125] bestimmen einen Mindestluftwechsel zur Schimmelpilzvermeidung. Dieser beträgt $0,15 \text{ h}^{-1}$... $0,20 \text{ h}^{-1}$ (EFH ... MFH) im gut gedämmten Neubau und $0,30 \text{ h}^{-1}$... $0,40 \text{ h}^{-1}$ (EFH ... MFH) im Bestand. Für das EFH liegen Wohnflächen von 30 m^2 pro Person, für das MFH 17 m^2 pro Person zugrunde [125]. Aus diesen Ergebnissen können Werte für eine durchschnittliche Belegungsichte abgeleitet werden. ERHORN stellt fest, dass der aus Feuchtegesichtspunkten notwendige Mindestluftwechsel in den Übergangsjahreszeiten zunimmt, so dass im Winter etwa zwei Drittel des Wertes der Übergangsjahreszeit ausreichen [177].

Der Luftwechsel, der zum Abtransport von Atemgasen (CO_2) aus der Raumluft notwendig ist, hängt vom Aktivitätsgrad der Personen und deren täglicher Anwesenheitsdauer ab. Bei normalem Aktivitätsgrad der Personen kann von einem mittleren personenbedingten Luftwechsel von $25 \dots 30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$ ausgegangen werden [54] [101] [143]. Für Raucher muss etwa mit der doppelten Menge gerechnet werden.

Die Akzeptanz von Lüftungsanlagen ist sehr verschieden ausgeprägt und hängt vor allem von der Nutzeraufklärung ab [107]. RICHTER ET AL [125] stellen bei Literatursauswertungen eine große Streubreite von $0,3 \dots 14,9 \text{ h/d}$ wohnungsbezogener Fensteröffnungsdauer fest. Der Wert gilt für Wohnungen ohne mechanische Lüftungsanlage und ist mit Lüftungsanlage insgesamt etwas geringer, aber ebenso gestreut [125]. Auch andere dokumentierte Untersuchungen zeigen nutzerbedingte Luftwechsel unabhängig vom Vorhandensein einer Lüftungsanlage [73] [122].

GEIGER und ROUVEL [63] stellen fest, dass tatsächliche Lüftungsdauern über den bei Befragungen von Nutzern angegebenen Werten liegen. Die Fenster sind überwiegend gekippt, es ist nur 10 % Starklüftung zu verzeichnen [63]. Untersuchungen von MFH im Geschosswohnungsbau zeigen, dass besonders in der Übergangszeit in etwa ein Viertel der Wohnungen mindestens ein Fenster längere Zeit auf Kipp steht [53]. Eine Querauswertung verschiedener Literaturquellen durch ERHORN [177] bestätigt dies. Mit abnehmendem Windeinfluss und mit höheren Außentemperaturen wird die Lüftung stark durch den Nutzer beeinflusst; in der Übergangszeit unterscheiden sich bewohnte Gebäude deutlich von unbewohnten [177].

Eigene Untersuchungen zeigen Luftwechsel von etwa $0,3 \dots 0,4 \text{ h}^{-1}$ in der Kernheizzeit [205]. REIß und ERHORN stellen Luftwechsel von $0,2 \dots 0,3 \text{ h}^{-1}$ in der Kernheizzeit (ohne Lüftungsanlagen) fest, während in den Übergangsjahreszeiten höhere Luftwechsel erreicht werden [124]. Wird der übliche Luftaustausch je Person von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ herangezogen ergeben sich Luftwechsel von $0,3 \dots 0,4 \text{ h}^{-1}$ bei typischer Personenbelegung ($45 \dots 30 \text{ m}^2/\text{Person}$).

Aus den zitierten Quellen kann ein Mindestluftwechsel für eine heute übliche Belegungsichte ($35 \dots 45 \text{ m}^2/\text{Person}$) abgeleitet werden. Für die Kernheizzeit erscheinen aus Komfortgesichtspunkten und zur Vermeidung von Schimmelpilzbefall Luftwechsel von $0,2 \dots 0,3 \text{ h}^{-1}$ ausreichend.

Diese Abschätzungen decken sich mit Erfahrungen aus Praxisprojekten. In der Übergangszeit ist die Gefahr der Taupunktunterschreitung und des Schimmelpilzbefalls kaum mehr gegeben. Zur Aufrechterhaltung der Behaglichkeit ergeben sich je nach Belegungsdichte und tolerierter Luftfeuchte Luftwechsel von etwa $0,4 \text{ h}^{-1}$. In der Praxis werden teilweise vielfach höhere Werte gemessen. Ermöglicht wird dies einerseits durch verstärkt anfallende Fremdwärme, aber auch durch das hohe Leistungspotential der Anlagentechnik.

Der Luftwechsel als Qualitätsmerkmal der Nutzung kann – da er praktisch nicht messbar ist – nur indirekt aus Verbrauchsdaten abgeschätzt werden.

Kalt- und Warmwasserverbrauch

Der durchschnittliche Warmwasserverbrauch liegt bei $600 \dots 700 \text{ kWh}/(\text{Person}\cdot\text{a})$ [103]. Die Auswertung von fast 5000 Wohneinheiten in MFH bestätigt diesen Wert; sie zeigt einen mittleren Kaltwasserverbrauch von $20 \dots 24 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{a})$ und Warmwasserverbrauch von $9 \dots 11 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{a})$ bei einer Temperatur von etwa $50 \text{ }^\circ\text{C}$ an den Zapfstellen [109].

Übersicht der Kennwerte und Bewertungsmöglichkeit der QS

Die Bewertungsmöglichkeiten der Nutzungsmerkmale zeigt Tabelle 4-2. Zur energetischen Bewertung der Nutzungsqualität können konkrete Nutzergewohnheiten mit Standardwerten verglichen werden, in dem die durchschnittlichen Energiekennwerte in einer Bilanz durch reale ersetzt werden.

Merkmal	Möglichkeit der Bewertung des Einflusses in der Energiebilanz
Belegungsdichte	Auswirkung auf andere Kennwerte, wie innere Fremdwärme, Luftwechsel, Wasserverbrauch, Teilbeheizung
Temperaturkomfort, Teilbeheizung	Raumtemperatur bei der Bestimmung der Verluste (Transmission, Lüftung etc.)
Nutzung des Fremdwärmeangebotes	erhöhte Temperaturen, Luftwechsel und ggf. längere Heizzeiten in der Bilanz
Lüftungskomfort	Erhöhung des Luftwechsels bei der Bestimmung der Lüftungswärmeverluste
Wasserverbrauch	Anpassung der Nutzwärme Trinkwarmwasser, die das gezapfte Volumen enthält

Tabelle 4-2 Bewertung der Qualität der Nutzung

Die Anpassung des Lüftungsverhaltens eines Nutzers in der Bilanz ist rein rechnerisch einfach, aber messtechnisch kaum zu belegen. Die Erhöhung des Luftwechsels in der Energiebilanz aufgrund der Nutzerangabe "Viellüfter" kann nur eine Schätzung sein. Die Effekte der Änderung der Raumtemperatur (Teilbeheizung, Fremdwärme, Regelung) sind in der Bilanz änderbar und durch Feldmessungen als Summenwert nachvollziehbar.

Die tatsächliche Nutzung eines angebotenen Fremdwärmepotentials lässt sich rein rechnerisch sehr einfach innerhalb einer Bilanz erfassen. Dass es tatsächlich genutzt wird – und dann in welcher Form (Temperatur, Luftwechsel, Heizzeit), kann im Einzelfall nur mit Hilfe von Verbrauchsdatenauswertungen nachgewiesen werden.

5. Qualitätsmerkmale der Anlagentechnik

Die energetische Qualität der Anlagentechnik soll im Zusammenspiel mit dem Baukörper und vor allem der Nutzung untersucht werden. Die Bewertung der QS in einer Energiebilanz ist komplex und in den heute etablierten Energiebilanzverfahren praktisch nicht vorgesehen. Daher sollen zunächst die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Anlagentechnik und ggf. der Nutzung nach der in Bild 5-1 gezeigten Vorgehensweise beschrieben werden. Die Verknüpfung zur durchgehenden Bilanz folgt in Kapitel 6.

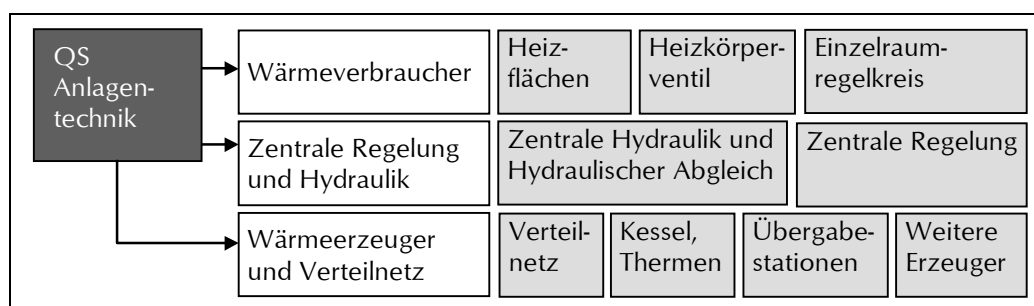


Bild 5-1 Vorgehensweise bei der Beschreibung der Anlagentechnik

5.1. Grundlagen der Bewertung

5.1.1. Verschwendungspotential und Zwangswärmekonsum

Unter dem *Verschwendungspotential* wird ein erhöhtes Leistungsangebot der Anlagentechnik verstanden. Es ermöglicht bzw. provoziert erhöhte Lüftungs- und Transmissionsverluste bezogen auf einen theoretisch möglichen Idealzustand. Es ist durch die fehlende QS der Anlagentechnik in Planung und Ausführung begründet. Hierzu zählen erhöhte Vorlauftemperaturen und/oder Heizwassermassenströme, ggf. zu große Heizflächen und Wärmeerzeuger. ESDORN definiert das Verschwendungspotential ganz allgemein durch den Begriff Überdimensionierung [57].

Ein Verschwendungspotential führt nicht automatisch zu einem Energiemehrverbrauch; der Nutzer bestimmt (meist ohne Kenntnis der Konsequenzen), ob er das Potential in Anspruch nimmt oder nicht. Die in der Anlage befindlichen Thermostatventile drosseln im Normalfall das übermäßige Leistungspotential entsprechend, wobei die Regelgüte in Form der Raumtemperaturkonstanz jedoch suboptimal ist, so dass ein Mehrverbrauch mit hoher Wahrscheinlichkeit auftritt. Weil die wenigsten Nutzer beispielsweise THKV richtig bedienen können, ist davon auszugehen, dass eine bereit gehaltene Leistungskapazität z.B. für Aufheizzustände bzw. ein bereitgestelltes Verschwendungspotential potentiell angenommen wird [56] [131]. ESDORN fordert daher, das Wärmeangebot so gering wie möglich zu halten, um einen Missbrauch von überschüssig angebotener Wärme zu verhindern [131].

Demgegenüber kann sich der Nutzer dem *Zwangswärmekonsum*, d.h. einem durch die Art der Anlagentechnik vorgegebenen Wärmeüberangebot, nicht entziehen. Ein Zwangswärmekonsum

liegt vor, wenn der Fremdwärmeeintrag der Anlagentechnik in den zu beheizenden Raum höher als die notwendige Nutzwärme zur Deckung der Transmissions- und Lüftungsverluste ist [109] [205]. Dies kann beispielsweise in Wohneinheiten mit ungedämmt durchlaufender Einrohrheizung der Fall sein. Aber auch in innenliegenden Bädern und Fluren, die praktisch keine Wärmeverluste aufweisen, führt die Wärmeabgabe durchlaufender Heizleitungen zu unnötiger Raumerwärmung. Im schlimmsten Fall, wenn die betroffenen Räume Überströmzonen oder Abluftzonen für Lüftungsanlagen sind, zum sofortigen Wärmeverlust [205].

Die entstehenden Wärmeverluste sind in beiden Fällen (Verschwendungspotential und Zwangswärmekonsum) weder aus energetischer noch aus hygienischer Sicht notwendig.

5.1.2. Materielle und immaterielle Merkmale

Die Merkmale der Anlagentechnik können in materielle und immaterielle Merkmale unterschieden werden. Zu den *materiellen Merkmalen* zählen die Technikkomponenten als Bauteile. Für die Änderung dieser Merkmale einer Anlagentechnik sind i.d.R. hohe Investitionen zu tätigen. Die *immateriellen Merkmale* umfassen dagegen die Bemessung und Einstellung einer Technikkomponente (z.B. Kessel und Brenner), die Einstellung der vorhandenen Regelung und Hydraulik etc. Abgesehen von der Arbeitskraft für die Planung und Umsetzung sind diese Merkmale weitgehend nicht investiv beeinflussbar. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Arbeit untersuchten Eigenschaften.

Materielle Merkmale	Immaterielle Merkmale
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Art des Wärmeerzeugers ▪ Art der Umwälzpumpe ▪ Art der Wärmeübergabe ▪ Art der zentralen und dezentralen Regelfunktionen (v.a. Thermostatventile) ▪ Verteilnetztyp ▪ Dämmung von Leitungen ▪ Ausstattung mit Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung (v.a. Zirkulation) ▪ Ausstattung mit Lüftungsanlagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leistungsbemessung und -begrenzung des Wärmeerzeugers ▪ Regelung und Einstellung der Umwälzpumpe ▪ Bemessung der Wärmeübergabe (v.a. Heizkörper) ▪ Auslegung und Einstellung der dezentralen Regelung (v.a. THKV) ▪ Einstellung der zentralen Steuer- und Regelfunktionen (v.a. der Vorlauftemperatur) ▪ hydraulischer Abgleich und Volumenstrombegrenzungen

Tabelle 5-1 Materielle und immaterielle Kennwerte

Die heutige Planung befasst sich primär mit der Wahl der Art der Technik, leider immer weniger mit der richtigen Dimensionierung. Die für die Umsetzung der immateriellen Merkmale verantwortliche Ausführung scheitert an fehlenden Planvorgaben. Im Neubau umfasst die Qualitätssicherung beide Arten von Merkmalen. Eine nachträgliche QS im Bestand kann dagegen häufig nur die immateriellen (nicht oder gering investiven) Merkmale verbessern.

5.1.3. Grundzusammenhänge der Merkmale

Die Einzelmerkmale der Anlagentechnik sind vielfältig miteinander verknüpft. Vor der in den Kapiteln 5.2 bis 5.7 folgenden Einzeluntersuchung sollen im Folgenden grundlegende Zusammenhänge aufgezeigt werden.

Bild 5-2 zeigt schematisch die Minderung der maximal zur Verfügung stehenden Leistung auf dem Weg des Heizwassers vom Erzeuger bis zum Verbraucher. Beeinflusst durch die Komponenten und ihr Zusammenspiel ist das Wärmeabgabepotential an den Raum und somit den Nutzer begrenzt. An welcher Stelle des Systems jeweils eine Leistungsbegrenzung auftritt, ist im individuellen Fall verschieden.

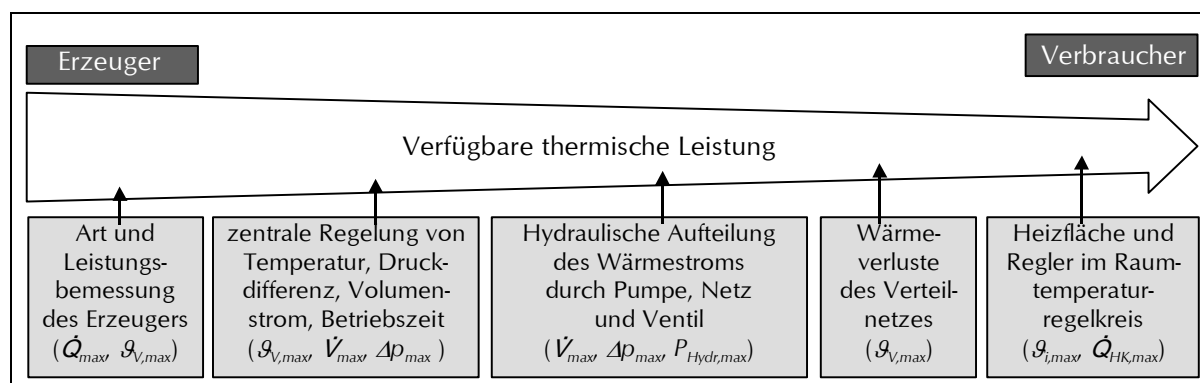


Bild 5-2 Minderung der verfügbaren Wärmeleistung auf dem Weg zum Verbraucher

Zu Erläuterung: Der Wärmeerzeuger stellt zunächst aufgrund seiner Bauart, Bemessung und Konstruktion und ggf. einer nachträglichen Leistungsbegrenzung eine maximale thermische Leistung \dot{Q}_{max} zur Verfügung und begrenzt die maximal erreichbare Vorlauftemperatur $\vartheta_{v,max}$. Durch die zentrale Regelung, d.h. alle zentral angeordneten Regelkomponenten (z.B. eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung, Differenzdruck- oder Volumenstromregler) sind die Vorlauftemperatur für das Netz $\vartheta_{v,max}$, der Volumenstrom \dot{V}_{max} und die verfügbare Druckförderhöhe Δp_{max} sowie die Betriebszeit der Anlage festgelegt. Die verfügbare Leistung des Wärmeerzeugers kann durch die zentrale Regelung begrenzt werden.

Die zur Verfügung stehende Leistung wird über den Heizwasserstrom hydraulisch im Netz verteilt. Abhängig von Pumpe, Ventilen und der Netzhydraulik (Abgleich) stehen an den Verbrauchern maximale Volumenströme \dot{V}_{max} zur Verfügung. Die Netzhydraulik wird durch die hydraulische Leistung $P_{Hydr,max}$ (Produkt aus Volumenstrom und Druckdifferenz) beeinflusst. Das Verteilnetz bestimmt durch vorhandene Leitungswärmeverluste auch die maximale am Verbraucher zur Verfügung stehende Vorlauftemperatur $\vartheta_{v,max}$. Jedem Verbraucher steht somit eine bestimmte, maximale thermische Leistung zur Verfügung.

Der Raumtemperaturregelkreis, d.h. das Zusammenspiel von Regler und Heizfläche begrenzt die verfügbare Wärmeleistung ggf. noch einmal. Die dezentrale Regelung kann beispielsweise eine maximale Raumtemperatur $\vartheta_{r,max}$ vorgeben. Die Art und Ausführung der Heizflächen ($\dot{Q}_{HK,max}$) bestimmt die maximal mögliche Wärmeabgabeleistung an den Raum. Dem Nutzer bleibt anschließend die Wahl, bis zu welcher Höhe er das angebotene Leistungspotential annimmt.

Je nach Nutzung der zur Verfügung gestellten Leistung innerhalb der Betriebszeit und der vorhandenen Technikkomponenten ergeben sich u.a. der Gesamtvolumenstrom, der Gesamtdruckverlust, die Systemrücklauftemperatur und die technischen Verlustkennwerte des Systems.

Unterscheidung in Groß- und Kleinanlagen

Bei der Beschreibung der Anlagentechnik eines System ist es im Folgenden an verschiedenen Stellen notwendig, die Anlagen in Groß- und Kleinanlagen einzuteilen – vgl. Bild 5-3.

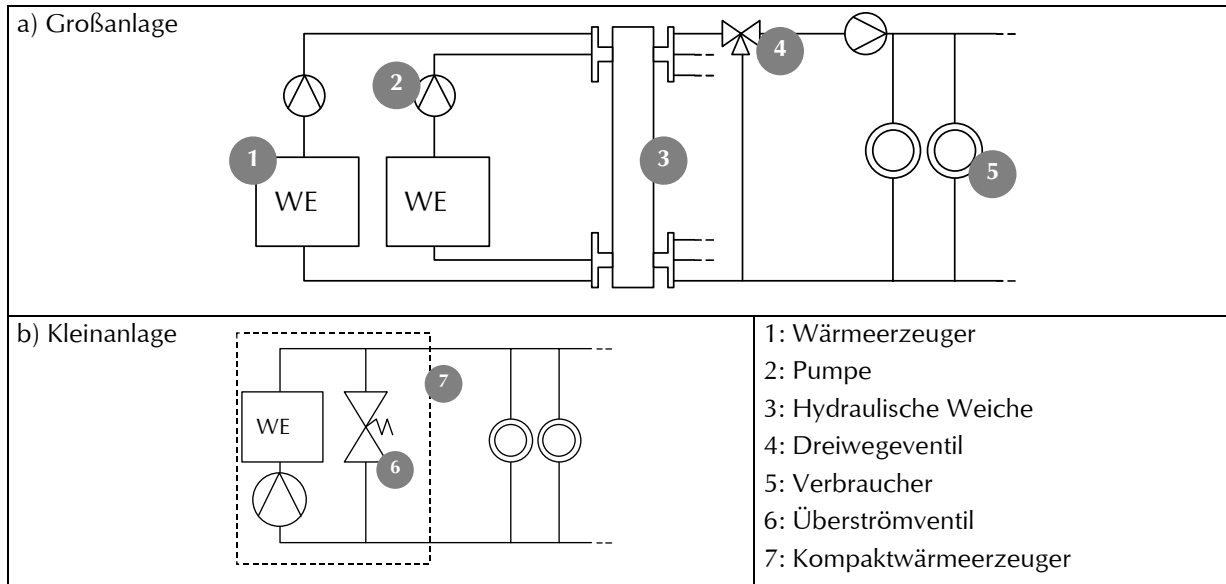


Bild 5-3 Unterscheidung von Groß- und Kleinanlage

In der *Großanlage* sind Wärmeerzeuger- und Wärmeverbraucherkreis häufig hydraulisch und regelungstechnisch entkoppelt und weisen separate Pumpen auf. Die hydraulische Entkopplung eines Anlagenteils bedeutet, den entsprechenden hydraulischen Kreis von Druckeinflüssen anderer Kreise zu trennen. Dies kann z.B. durch eine hydraulische Weiche erfolgen, die einen Druckausgleich zwischen Vor- und Rücklauf aller angeschlossenen Komponenten schafft. Verbraucherkreise können außerdem untereinander strangweise hydraulisch getrennt sein. In Großanlagen erfolgt zudem eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung mit Hilfe separater hydraulischer Schaltungen (z.B. Beimischschaltung mit Dreiwegeventil).

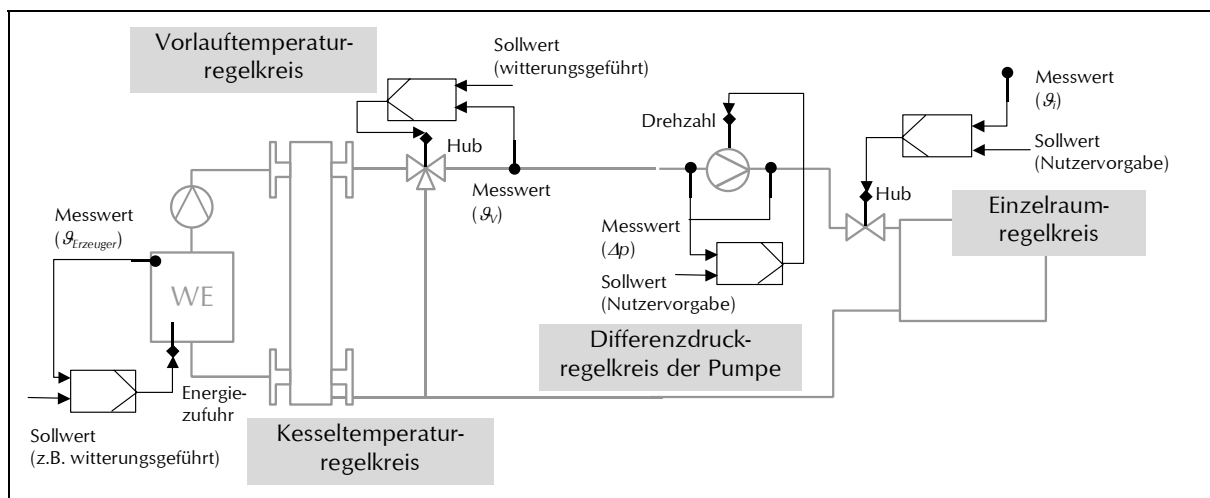


Bild 5-4 Regelkreise einer großen Heizungsanlage

Beispiele für Temperaturregelkreise einer großen Heizungsanlage sind der Kesseltemperatur- und ggf. ein getrennter Vorlauftemperaturregelkreis, die Einzelraumtemperaturregelkreise und der Speicherwassertemperaturregelkreis. Zusätzlich können der Differenzdruckregelkreis einer Pumpe oder eines autarken Differenzdruckreglers wirken. Wichtiger Regelkreise in einer Großanlage sind in Bild 5-4 gezeigt.

Kleinanlagen sind dagegen häufig mit Kompaktwärmeerzeugern ausgestattet (z.B. Kessel mit integrierter Pumpe und Überströmventil). Alle Komponenten sind hydraulisch gekoppelt in einem Pumpenkreis verschaltet. Die witterungsgeführte Regelung erfolgt i.d.R. allein über eine Anpassung der Wärmeerzeugertemperatur ohne separate hydraulische Schaltungen. Sofern eine Unterscheidung in die beiden Anlagentypen notwendig ist, wird im Folgenden darauf hingewiesen.

5.1.4. Definition der Überdimensionierung

Die Beschreibung eines Anlagensystems legt nach ESDORN (vgl. [56]) die Definition einer Überdimensionierung für Wärmeerzeuger, Pumpen und Heizflächen nahe. Die Überdimensionierung eines Wärmeerzeugers kann verhältnismäßig einfach angegeben werden, sie ist das Verhältnis der vorhandenen zur maximal (nach einer Heizlastberechnung) benötigten thermischen Leistung.

Pumpen- und Heizkörperüberdimensionierungen werden in der Fachwelt dagegen unterschiedlich beschrieben. Ganz allgemein kann festgestellt werden: die Angabe der Überdimensionierung dieser beiden Komponenten kann nicht getrennt werden und erfordert zudem eine Aussage über die Einstellung der Vorlauftemperatur. In der Praxis ist es üblich, die Überdimensionierung von Pumpe und Heizflächen bezogen auf eine typische Systemspreizung, möglichst die Auslegungsspreizung (z.B. 70/55 °C) anzugeben. Liegen die Bezugstemperaturen fest, kann die Mehrleistung der Heizflächen bei diesen Betriebstemperaturen gegenüber der Raumheizlast sowie die Pumpenüberdimensionierung bezogen auf die elektrisch notwendige Leistung bei diesen Betriebstemperaturen bestimmt werden. Die zusätzliche Fehleinstellung des Reglers in der Praxis wird bei dieser Betrachtungsweise häufig ignoriert.

Die Überdimensionierung der Anlagentechnik kann folgendermaßen beschrieben werden: die in einem Gebäude installierten Heizflächen, das Rohrnetz sowie die Vorlauftemperatur werden als fest vorgegeben betrachtet. Für jeden Heizkörper kann somit der notwendige Volumenstrom zur Deckung der Raumheizlast bestimmt werden (z.B. mit Bild 5-6 auf Seite 78). Aus dem Gesamtvolumenstrom und dem resultierenden Druckverlust im Netz können die notwendige Pumpenleistung und damit die Überdimensionierung der Pumpe bestimmt werden. Die Heizflächen sind nach dieser Betrachtungsweise nicht überdimensioniert, die am Regler eingestellte Vorlauftemperatur wird als richtig angesehen.

Diese Betrachtung hat den Vorteil, dass es nur einen Parameter zur Charakterisierung der Überdimensionierung gibt: den Anlagenvolumenstrom bzw. in Verbindung mit den Druckverlusten des Netzes die hydraulische Leistung der Pumpe (und daraus abgeleitet die elektrische Leistung der Pumpe). Diese neue Betrachtungsweise erweitert die üblichen Ansätze der Angabe einer Leistungsüberdimensionierung thermischer Leistungen auch auf die Hydraulik einer Anlage.

5.2. Wärmeverbraucher

Die Merkmale der Anlagentechnik werden nachfolgend von der Nutzwärme im Raum entgegen des Wärmeflusses bis hin zum Erzeuger betrachtet. Die Darstellung der Qualitätsmerkmale beginnt mit dem Wärmeverbraucherkreis, der die Heizflächen sowie die Einzelraumregelung mit Thermostatventil umfasst. Der Einzelraumregelkreis, sein Regelverhalten sowie der dezentrale hydraulische Abgleich werden näher beschrieben.

5.2.1. Heizflächen

Typische Heizflächen sind Platten- und Radiatorenheizungen, Fußbodenheizungen sowie Konvektorheizungen. Die Systeme weisen unterschiedliche Anteile für die als Strahlung und konvektiv abgegebene Wärme auf. Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile ist in der Literatur (z.B. [3]) zu finden und soll daher hier nicht wiedergegeben werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden schwerpunktmäßig Heizkörperheizungen behandelt, die Kernaussagen lassen sich auch auf Fußbodenheizungen übertragen.

Die verschiedenen Heizflächenarten zeichnen sich durch unterschiedliche Komforteindrücke für den Nutzer sowie durch verschiedene Trägheiten und Selbstregeleffekte (vgl. Erläuterungen zu Bild 5-7 auf Seite 79) im Zusammenspiel mit der Raumheizlast aus. KREMONKE stellt in Simulationen fest, dass die Art der Heizflächen keine so bedeutende Rolle für den Energieverbrauch spielt – wohl aber ihre Dimensionierung und die Art des Reglers [127]. Trotz dieser Ergebnisse erweisen sich in der Praxis Heizflächen mit geringem Wasserinhalt, d.h. mit geringer Wärmekapazität bei hoher Leistung, als vorteilhaft, weil sie für eine dynamische Leistungsanpassung besser geeignet sind.

Anordnung von Heizflächen und Behaglichkeit

Die Heizflächenanordnung und damit verbundene Behaglichkeit ist ein in Fachkreisen kontrovers diskutiertes Thema. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Strahlungsasymmetrie durch unterschiedlich temperierte Oberflächen im Neubau oder in nachträglich gedämmten Gebäuden gering ist. OLESEN sieht in neuen Gebäuden keine Probleme mit der thermischen Behaglichkeit, lediglich die Fallluftströme an hohen Fenstern seien kritisch [112]. Diverse Versuche zur Behaglichkeit zeigen, dass außer bei Anordnung des Heizkörpers an der Innenwand eines Raumes, alle praxisrelevanten Heizsysteme die Behaglichkeitskriterien erfüllen [184].

BACH [14] definiert eine Untertemperatur gegenüber der Raumtemperatur von 3 K bei den Umfassungsflächen eines Raumes als unbehaglich. Somit sind unbehagliche Zustände in Räumen mit U-Werten der Außenbauteile unter etwa $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nicht zu erwarten [14]. Bei heute üblichen Fenstern ($U > 0,6 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) ergibt sich daraus aber die Notwendigkeit, Heizkörper in Fensterbreite und Brüstungshöhe auszuwählen und unter dem Fenster anzuordnen, damit die kalte Abstrahlung kompensiert wird. Diese Überlegung findet sich in VDI 6030 wieder (siehe Kapitel 2.3.2).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Anordnung der Heizflächen im gut gedämmten Gebäude nur noch eine untergeordnete Rolle spielt, wenn normale Glasflächenanteile und übliche Lüftung vorliegen. Trotzdem ist die Anordnung an der Außenwand anzustreben [22].

VORLÄNDER ET AL ergänzen dazu: Heizkörper müssen nicht so breit wie das Fenster sein; zumindest sollten sie aber auch dann nicht deutlich überdimensioniert werden [191].

Dimensionierung und Überdimensionierung von Heizflächen

Die zur Bemessung von Heizflächen relevanten Normen und Richtlinien sind in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Relevant ist zum einen die berechnete Raumheizlast, zum anderen das Verfahren der Heizflächenauslegung. Erfolgt die Dimensionierung von Heizkörpern auf Basis der Raumheizlast nach DIN 4701, ergeben sich zu große Heizflächen. Zum einen liegt dies an der (meist standardmäßigen) Annahme unbeheizter Nachbarräume bei der Heizlastberechnung, zum anderen an dem nach Teil 3 zusätzlich möglichen Heizflächenzuschlag von 15 %. BUSCHER und WALTER schätzen die berechnete Heizlast etwa 15 ... 20 % zu groß [30]. ESDORN vermutet zusätzliche Heizflächenleistung von 15 ... 30 % [56]. STRIEBEL schätzt die Heizkörper in korrekt dimensionierten Anlagen sogar bis etwa 35 % zu groß [177].

Mit der neuen Heizlastberechnung nach EN 12831 [50] werden berechnete Raumheizlasten und damit die installierten Heizkörperleistungen noch bedeutend größer ausfallen (vgl. Kapitel 2.3.2). Nennenswert sind in diesem Zusammenhang die optionalen Zuschläge für die Wiederaufheizung und die hohe rechnerische Temperaturdifferenz zu Nachbarräumen. Da zum Abgabepunkt dieser Arbeit der nationale Anhang zur EN 12831 noch nicht erschienen ist, kann keine abschließende Bewertung zur Höhe der Dimensionierung und Überdimensionierung vorgenommen werden.

Bei der Heizflächenwahl kann im Neubau verschieden vorgegangen werden. Die Auswahl kann mit einheitlicher, fest vorgegebener Spreizung für alle Heizkörper erfolgen, auch das Vorgehen nach VDI 6030 mit fester Ansichtsfläche und Übertemperatur kommt in Frage. Die Wahl der Heizflächen ist mit den angestrebten bzw. vorhandenen Volumenströmen und Vorlauftemperaturen verknüpft. Diese Thematik wird weiter unten besprochen. Hinweise zur praxisgerechten Heizlastberechnung und Heizflächenbemessung finden sich in der Literatur (z.B. [191]).

Im Bestand liegen die Heizkörperflächen fest. Unabhängig davon, ob ursprünglich eine Heizlastberechnung und Heizkörperbemessung vorgelegen hat, muss hier von einer uneinheitlichen Heizkörperdimensionierung ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass von unterschiedlichen Verhältnissen der Heizkörpernormleistung zur Raumheizlast bzw. von uneinheitlichen Rücklauftemperaturen an den Heizkörpern auszugehen ist. Ein Grund dafür kann die nachträgliche bauliche Modernisierung sein, bei der sich die Transmissionswärmeverluste räumlich unterschiedlich vermindern [88]. Ähnliches trifft auf die Umstellung von Ein- auf Zweirohrheizsysteme zu. Weiter von der Pumpe entfernte Heizflächen sind nach der Umstellung teilweise entschieden zu groß. Auch der nachträgliche Einbau von Lüftungsanlagen verändert die Heizlast der Räume, da es je nach Lüftungssystem nun Zu-, Ab- und Überströmzonen gibt.

Typische installierte Heizkörpernormleistungen (bei Normtemperaturen 75/65°C nach EN 442) aus der Untersuchung realer Gebäude [200] zeigt Tabelle 5-2. Die Darstellung erfolgt bezogen auf die beheizte Fläche und alternativ auf die effektive Raumheizlast. Hierunter ist die Raumheiz-

last in Anlehnung an DIN 4701-1 und 2 zu verstehen, jedoch ohne Wärmeabfluss zu unbeheizten Räumen. Es zeigt sich, dass die installierten Heizkörperflächen in neueren Gebäuden abnehmen (siehe auch Bild A-5 auf Seite 212 im Anhang), die Überdimensionierung mit Werten um 2,0 jedoch in etwa gleich bleibt. Die Streuung der Heizkörperdimensionierung innerhalb eines Gebäudes ist mit 1,2 ... 4,9 beträchtlich [200].

Gebäude (Anzahl)	Gebäudealter	effektive Raumheizlast bezogen auf A_{EB} , in $[W/m^2]$	Heizkörpernormleistung (bei 75/65°C) bezogen auf A_{EB} , in $[W/m^2]$	Überdimensionierung Heizkörpernormleistung bezogen auf effektive Raumheizlast	Energiebezugsfläche A_{EB} je Heizkörper, in $[m^2]$
EFH (31)	bis 1977	86	162	1,9	13
	ab 1978	36	62	1,8	
	alle	61	113	1,8	
MFH (14)	bis 1977	88	198	2,3	10
	ab 1978	43	68	1,6	
	alle	70	148	2,1	
alle		68	138	2,0	11

Tabelle 5-2 Kennwerte für Heizkörper

Die verminderte Wärmeabgabe aufgrund metallischer Anstriche, Zubau durch Möbel, Verkleidungen oder Vorhänge, Wärmeabfluss an der Rückwand und Art des Anschlusses kann in der Praxis fast nicht vorhergesehen werden. Einzelne Kennwerte sind in der Literatur zu finden [28].

Über die Heizflächenüberdimensionierung in der Praxis kann nur eine Aussage gemacht werden, wenn die geplante Temperatursauslegung bekannt ist. Dies ist vielfach wegen fehlender Unterlagen oder gänzlich fehlender Planung nicht ohne Berechnung möglich. Die Auswirkungen der Heizflächenüberdimensionierung auf die Heizkörperleistung ist in Bild 5-5 dargestellt. Es ist dabei vorausgesetzt, dass der Massenstrom durch den Heizkörper korrekt eingestellt ist und dass die Raumtemperatur auch während der Leistungssteigerung 20 °C beträgt (Ablüften).

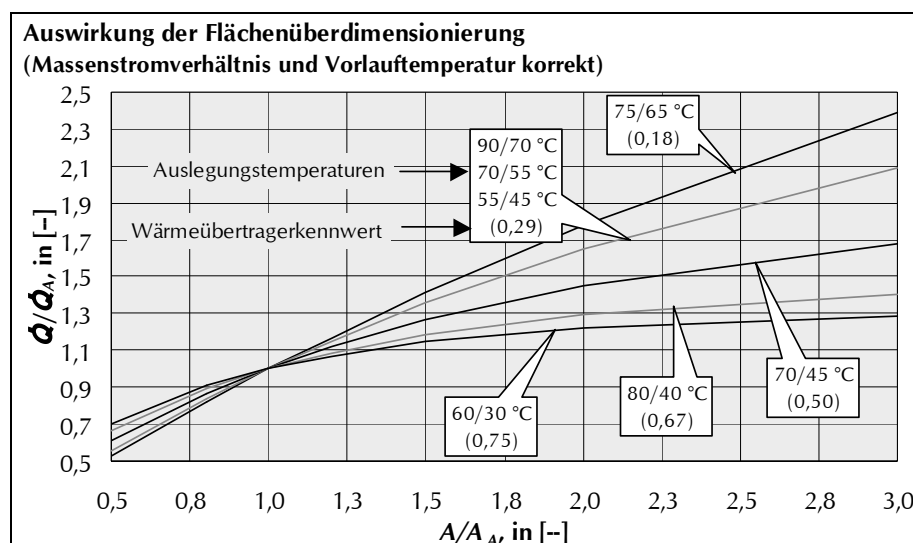


Bild 5-5 Auswirkungen der Flächenüberdimensionierung auf die Heizkörperleistung

Eine Flächenüberdimensionierung bewirkt bei Heizkörpern mit hohen Vorlauftemperaturen bei gleichzeitig geringen Spreizungen, d.h. mit geringem Wärmeübertragerkennwert (vgl. Gleichung (5-1) auf Seite 78) die größten Leistungssteigerungen [191].

Die Argumente für und gegen eine Überdimensionierung von Heizflächen sind vielfältig und in der Literatur umfassend diskutiert. Die Befürworter sehen darin eine Möglichkeit der Leistungssteigerung bei hoher dynamischer Beanspruchung, d.h. bei stark wechselnden Lasten [12] [22]. LÜDEMANN und SCHMITZ leiten beispielsweise eine notwendige Überdimensionierung der Heizflächen von 50 % ab, um den Komfortnachteil einer 30-minütigen Stoßlüftung im NEH auszugleichen [106]. Gegen eine Überdimensionierung spricht die vorhandene Leistungsreserve allein über die Anhebung der Vorlauftemperatur. ESDORN geht von einer möglichen 50-prozentigen Leistungssteigerung an 90 % aller Heiztage aus [56] und spricht sich wie auch andere Untersuchungen [94] [98] [192] gegen die Überdimensionierung aus. Regelungstechnische Lösungen für die bedarfsabhängige Vorlauftemperaturanhebung haben am Markt aber trotzdem praktisch keine Bedeutung.

Wahl von Temperaturniveau und Spreizung

In der Literatur sind die verschiedensten Auslegungsempfehlungen für das Temperaturniveau neuer Heizflächen zu finden. Es gibt zwei Haupttendenzen: die Auslegung mit *großen Spreizungen und hohen Vorlauftemperaturen* (kleine Heizflächen) und die Auslegung mit *geringen Spreizungen und niedrigen Vorlauftemperaturen* (große Heizflächen). Letzteres entspricht den Empfehlungen der VDI 6030. Folgende Empfehlungen zur Wahl des Temperaturniveaus sind der Literatur entnommen:

- WOLFF [207] und SCHRODE [138] fordern im Neubau die Auslegung auf 70/50 °C. Die höhere Übertemperatur führt zwar zu kleineren Heizflächen, bewirkt aber andererseits auch bei höheren Außentemperaturen noch fühlbare Wärme am Heizkörper. Trotz der kleinen Heizflächen sind immer noch Aufheizreserven durch Temperaturerhöhung vorhanden [173].
- Die VERBRAUCHERZENTRALE empfiehlt optimiert nach dem Preis-/Leistungsverhältnis 60/45 °C [187].
- Das HEIZTECHNISCHE KONZEPT empfiehlt 65/39 °C als gesamtwirtschaftliches Optimum eines Nahwärmenetzes [191].
- Das HANDBUCH FÜR HEIZUNGSTECHNIK schlägt die Auslegung mit einer Spreizung bis 20 K und einer Vorlauftemperatur von 50 ... 60 °C vor [22].
- BÖHM argumentiert für die Auslegung mit 55/40 °C bei Brennwertkesseln mit Zwangsumlauf, weil damit auch im Falle des Überströmens im Teillastfall noch die Taupunkttemperatur unterschritten wird, also Brennwertnutzung möglich ist [20].
- IHLE und PRECHTL empfehlen 55/45 °C [83].
- BUSCHER und WALTER fordern auch für Brennwertkessel Spreizungen von etwa 20 K [31].
- Das SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR ENERGIE empfiehlt als optimale Auslegungsspreizung (bei - 10 °C) für moderne Heizungen 22 K [24].

Die Wahl der Vorlauftemperatur und Spreizung wird von verschiedensten Randbedingungen beeinflusst, die in Tabelle 5-3 kurz benannt werden sollen. Nähere Erläuterungen finden sich in [88].

Randbedingung	Forderung	Begründung
Nutzer	hohe Vorlauftemperatur	fühlbare Wärme am Heizkörper, auch in der Übergangszeit
Brennwertkessel	niedrige Rücklauftemperatur	hoher Brennwerteffekt
Wärmepumpe	niedrige mittlere Temperatur bzw. Vorlauftemperatur	gute Arbeitszahl
Fernwärme	niedrige Rücklauftemperatur	gute Auskühlung (Vorgabe Versorger)
Konstanttemperaturkessel	hohe Vorlauftemperatur	Vermeidung von Kondensation
Hilfsenergie	hohe Spreizung	Verminderung der Pumpenstromkosten
Thermostatventile	geringe Spreizung	Verfügbarkeit von kleinen THKV
Wärmeübertragerkennwert	große Spreizung und/oder niedrige Vorlauftemperatur	gute Regelbarkeit der Heizflächen
Wärmeübergang bei Heizflächen	geringe Spreizung bzw. hoher Volumenstrom	Mindestvolumenstrom von ca. 30 ... 60 % des Auslegungsvolumenstroms zum Erreichen turbulenter Strömung (Reynoldszahl ≥ 2330) [147]
Heizkostenerfassung	hohe Übertemperatur*	korrekte Funktion der Erfassungsgeräte
Verteilverluste	niedrige Übertemperatur*	Verminderung von Wärmeverlusten
Thermische Eigenstabilität (Selbstregeleffekt)	niedrige Übertemperatur*	Starkes Absinken der Wärmeabgabe bei Lufttemperaturanstieg (gute Fremdwärmenutzung)
* die Übertemperatur ist im Bestand durch Heizlast und Heizfläche festgelegt		

Tabelle 5-3 Wahl des Temperaturniveaus

Die Auswertung von 31 EFH und 19 MFH zeigt, dass sich in der Praxis wegen sehr hoch eingestellten Vorlauftemperaturheizkurven zentraler Regler und der großzügigen Heizflächenbemessung näherungsweise folgende Auslegungsbedingungen fast unabhängig von Gebäudetyp und -alter ergeben: 80/40°C (nach [200]).

Heizkörpergleichungen, Heizkörperdiagramm und Leistungsregelung

Die Leistungsregelung von Heizflächen kann durch Anpassung der Vorlauftemperatur und des Massenstroms, im weiteren Sinne auch durch Änderung des Konvektionsvolumenstrom (z.B. bei Klappenkonvektoren) und der wärmeabgebenden Fläche erfolgen. Für Heizkörper – als die am weitesten verbreiteten Heizflächen – kommen die ersten beiden Möglichkeiten in Frage. Die Verminderung der wärmeabgebenden Fläche erfolgt bei sehr kleinen Massenströmen selbsttätig, wenn ein großer Teil des Heizkörpers bereits Raumtemperatur hat.

Zur Bestimmung der Wärmeleistung der Heizflächen werden die drei Grundgleichungen für Heizkörper verwendet. Die erste Heizkörpergleichung beschreibt die Leistungsabgabe des Heizwassers im Heizkörper, die zweite Heizkörpergleichung die Leistungsabgabe von den Heizflächen an die Raumluft und die dritte Heizkörpergleichung die Leistungsabgabe des Raumes an die Umwelt. Die Gleichungen finden sich im Anhang auf Seite 208. Die Heizkörpergleichungen

können graphisch als Heizkörperdiagramm nach BACH dargestellt werden – Bild 5-6. Die Auswirkungen zentraler (Vorlauftemperaturregelung) und dezentraler (Massenstromänderung) Regelung sowie des Fremdwärmeeinflusses auf die Leistung und die Rücklauftemperatur kann mit dem Diagramm einfach nachvollzogen werden. Es wird in den folgenden Kapiteln am mehreren Stellen zur Erläuterung einzelner Zusammenhänge herangezogen.

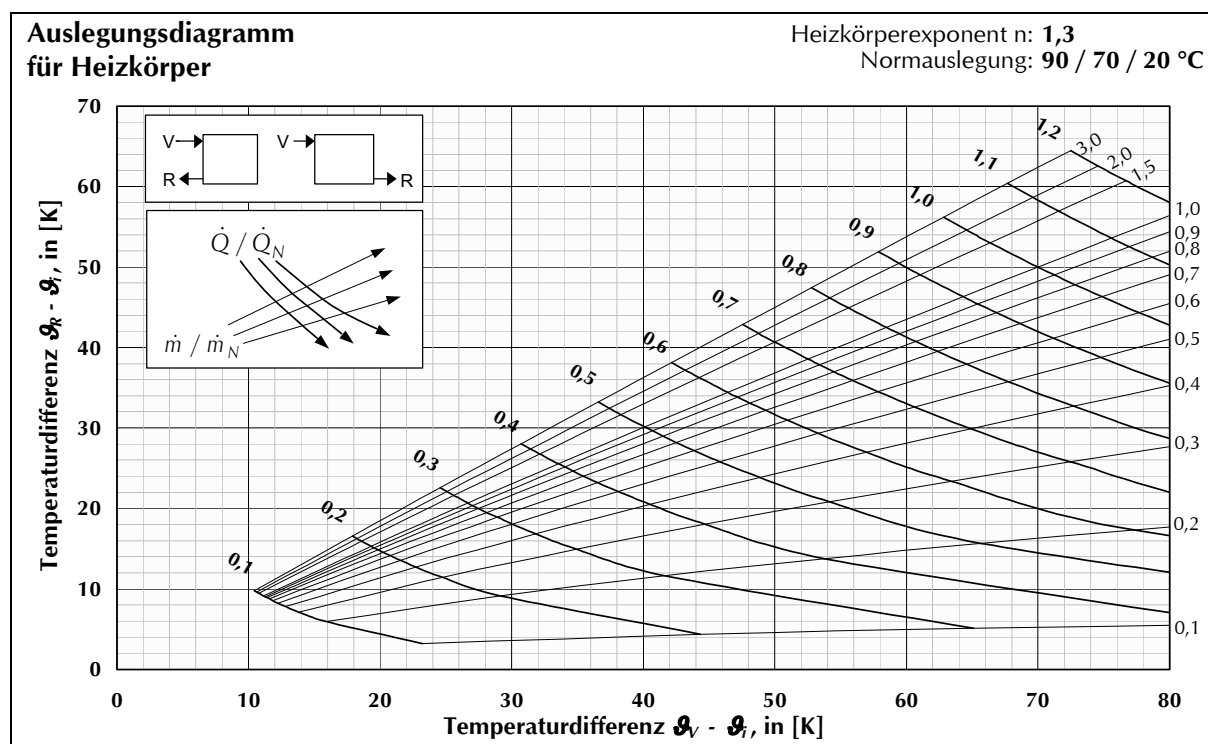


Bild 5-6 Heizkörperdiagramm

Übertemperatur und Selbstregeleffekt

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Wärmeabgabe hat die Raumtemperatur. Steigt sie, sinkt die Wärmeübertragung der Heizflächen. Der Effekt wird Selbstregeleffekt oder Eigenstabilität genannt. Einen hohen Selbstregeleffekt z.B. bei Fremdwärme haben Fußbodenheizungen und andere Niedertemperaturheizungen mit geringen Übertemperaturen. Hier ergibt sich im umgekehrten Fall aber auch ein erhöhtes Wärmeabgabepotential der Heizflächen bei Ablüften bzw. verminderten Raumtemperaturen. Die maßgebliche Größe ist die logarithmische Übertemperatur $\Delta\vartheta_{ln}$ nach Gleichung (5-1). Sie wird durch die Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkörpers (ϑ_V, ϑ_R) sowie die Lufttemperatur (ϑ_i) bestimmt.

$$\Delta\vartheta_{ln} = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln\left(\frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}\right)} \quad (5-1)$$

In Systemen mit geringen Übertemperaturen, d.h. mit großem Wärmeabgabepotential, merkt der Nutzer eine Verschwendung z.B. durch offen stehende Fenster erst spät [56], z.B. mit der Heizkostenabrechnung.

Im Bestand wird die notwendige Übertemperatur einer Heizfläche durch die Raumheizlast sowie die Charakteristik des installierten Heizkörpers bestimmt [88]. Die Übertemperatur kann durch verschiedene Paare von Vor- und Rücklauftemperaturen (und zugehörige Massenströme) realisiert werden. Wird eine geringe Vorlauftemperatur bei kleiner Spreizung gewählt, erfordert dies die unbedingte Einstellung der Heizkurve. Höhere Vorlauftemperaturen mit große Spreizungen führen dagegen zu sehr geringen Volumenströmen, für die keine passenden THKV gefunden werden können, weil diese nicht am Markt angeboten werden.

Wärmeübertragerkennwert

Der Wärmeübertragerkennwert a ist nach Gleichung (5-2) definiert. Er ist ein Maß für die Regelgüte der Heizflächen. Ist der Wärmeübertragerkennwert hoch, ergibt sich ein lineareres Wärmeübertragungsverhalten. Hohe Wärmeübertragerkennwerte werden in Netzen mit großen Spreizungen und möglichst gleichzeitig geringen Vorlauftemperaturen erreicht.

$$a = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\vartheta_V - \vartheta_i} \quad (5-2)$$

In Systemen mit geringem Wärmeübertragerkennwert bedeutet eine Massenstromänderung praktisch keine Leistungsänderung – vgl. Bild 5-7. Auswirkungen hydraulischer Fehler werden in Anlagen mit geringem Wärmeübertragerkennwert daher vermindert. Man spricht vom *Wunder der Heizungstechnik* bzw. von der *Gutmütigkeit der Heizungsanlage* [57].

ESDORN [56] fordert daher eine Auslegung mit eher geringen Wärmeübertragerkennwerten, weil Volumenstromschwankungen bzw. -abweichungen dann nur zu geringen Leistungsschwankungen führen. Dies beugt Praxisproblemen vor. Die dadurch verminderte Regelgüte des Regelkreises soll durch eine bessere Reglercharakteristik ausgeglichen werden [56].

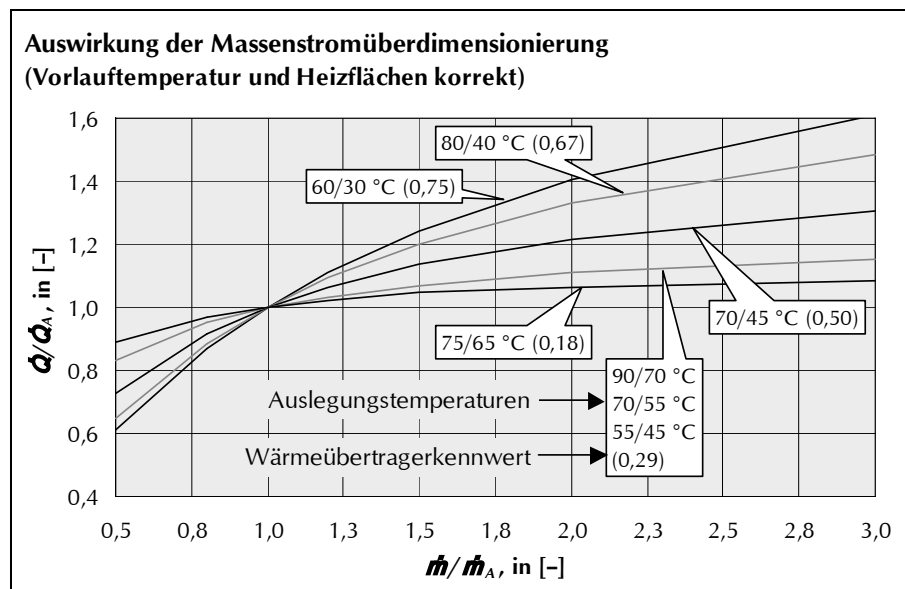


Bild 5-7 Auswirkungen der Massenstromüberdimensionierung auf die Heizkörperleistung

Bild 5-7 liefert eine zusätzliche Erkenntnis für nachträglich hydraulisch abgegliche Netze. Das Wärmeabgabepotential der Heizflächen ist im abgeglichenen größer als im unabgeglichenen Netz, wenn keine Verminderung des zentralen Volumenstroms erfolgt. Dies liegt an der Leistungssteigerung mit dem Massenstrom. Viele Heizkörper mit einer mäßigen Massenstromsteigerung können mehr Wärme abgeben als einzelne stark übertersorgte Heizkörper. Die Tatsache, dass das Leistungspotential mit dem hydraulischen Abgleich der Heizkörper untereinander steigt, untermauert die Notwendigkeit einer korrekten Pumpeneinstellung.

Rückkopplung der Heizflächengröße auf die eingeschränkte Heizung und die Regelung

Das Amtsgericht Hamburg hat im März 1996 geurteilt, dass die Schnellaufheizung eines Raumes von etwa 16 ... 17 °C auf mindestens 20 °C nicht länger als 30 ... 60 Minuten dauern darf. Zur Schnellaufheizung müssen daher entsprechende Leistungspotentiale vorhanden sein. Denkbar sind temporäre Massenstrom-, und/oder Vorlauftemperaturenanhebungen, immer vorhandene Heizflächenzuschläge oder zusätzlich zuschaltbare Heizflächen. Das Problem der Schnellaufheizung durch eine Heizflächenvergrößerung liegt im Normalbetrieb. Bei Normallast fließen dann nur sehr geringe Volumenströme, daher arbeiten THKV praktisch im Schließpunkt, oft mit Zweipunktregelverhalten. Dies sollte aus Komfortgründen zugunsten einer lastabhängigen (zusätzlich zur Außentemperaturabhängigen) Vorlauftemperaturenanhebung vermieden werden.

Bewertung der vorhandenen Heizflächen in der Energiebilanz

Bei der Bewertung der Heizflächenauslegung in der Energiebilanz muss immer das Zusammenspiel mit dem Massenstrom im Netz und der vorhandenen Vorlauftemperaturen beachtet werden. Bei der Auswertung von Gebäuden im Rahmen dieser Arbeit wird eine korrekte Heizkörperdimensionierung unterstellt und jede Überdimensionierung auf den Massenstrom übertragen (vgl. Kapitel 5.1.4).

5.2.2. Heizkörperventil

Die dezentrale Regelung erfolgt im Wohnungsbau üblicherweise mit Thermostatventilen (thermostatische Heizkörperventile THKV). Dies sind P-Regler ohne Hilfsenergie mit bleibender Regelabweichung. Seltener werden elektronische PI-Regler ohne bleibende Regelabweichung oder eine Referenzraumregelung (ohne dezentrale Regler) eingesetzt.

Die Aufgabe der dezentralen Regelung ist es, den Fremdwärmeanfall zu kompensieren und abweichende Temperatursollwerte zu realisieren. In begrenztem Umfang ist eine Kompensation von Mehr- oder Minderbedarf des Raumes gegenüber der vorgesehenen Heizleistung möglich. SCHROWANG beschreibt darüber hinaus sehr treffend, dass es nicht die Aufgabe eines THKV ist, Störgrößen wie die Vorlauftemperaturen oder schwankenden Differenzdruck auszuregeln [139].

THKV als Reihenschaltung von Widerständen, Voreinstellung

Ein Thermostatventil kann als hydraulische Reihenschaltung von Einzelwiderständen angesehen werden. Der Gesamtwiderstand setzt sich aus dem festen Gehäusewiderstand und dem veränderlichen Widerstand des Regelkegels zusammen. Bei Ventilen mit Voreinstellung ist zusätzlich ein manuell veränderlicher Drosselwiderstand in Reihe geschaltet (Bild 5-8).

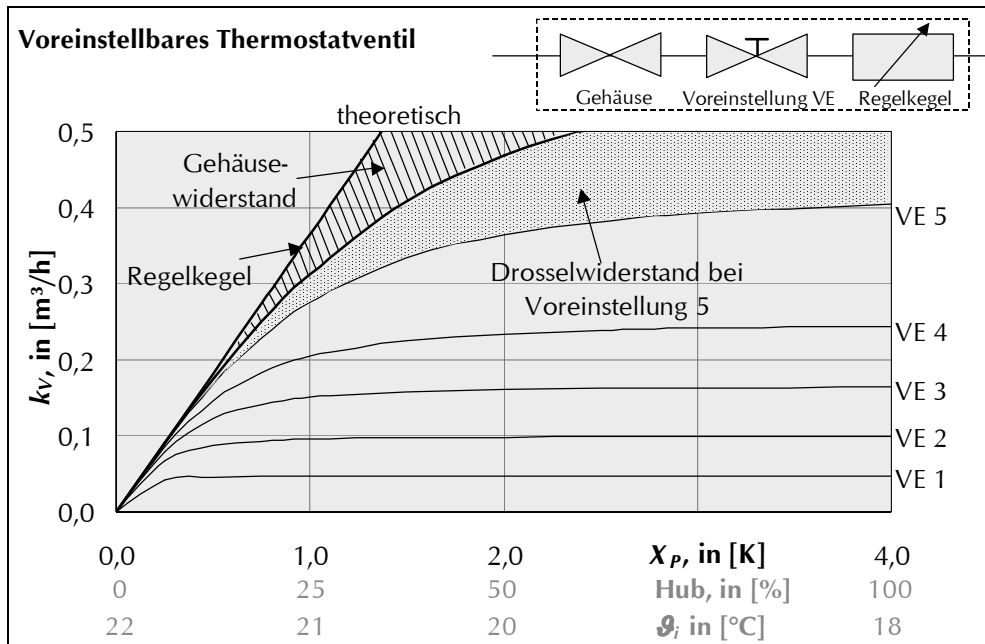


Bild 5-8 THKV mit Voreinstellung (VE)

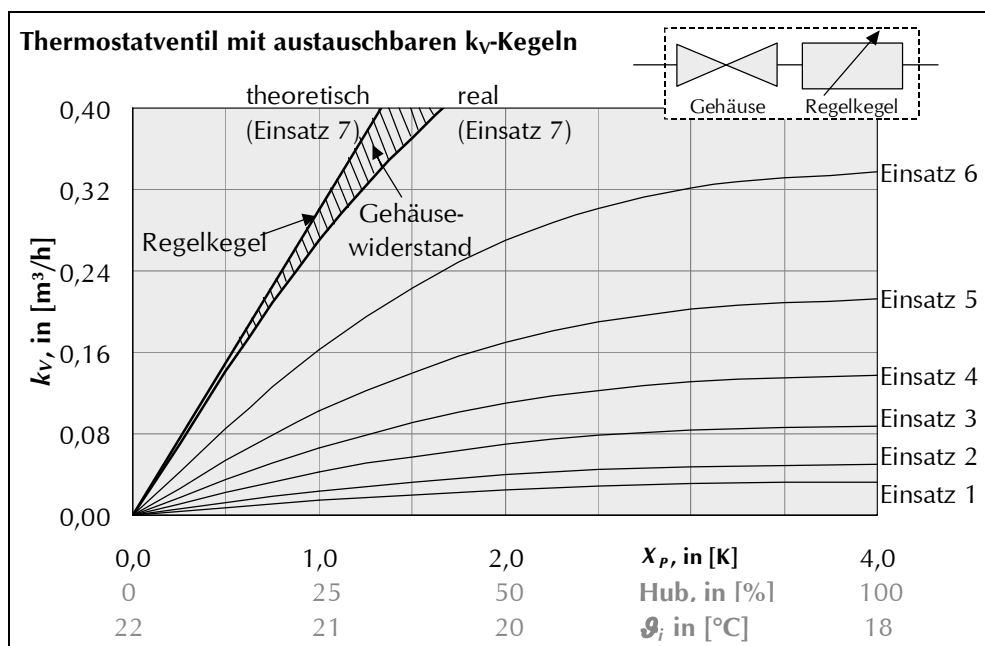


Bild 5-9 THKV mit austauschbarem k_v -Kegel

Wegen der Reihenschaltung des zusätzlichen Drosselwiderstandes ergibt sich beim voreinstellbaren Ventil mit zunehmender Voreinstellung eine stark entartete Kennlinie. Der Zusammenhang zwischen Durchflusskennwert k_v und P-Bereich bzw. Hub ist nur in einem sehr geringen Bereich linear. Die Voreinstellung hat Vor- und Nachteile. Vorteilhaft ist das Betriebsverhalten nach Absenckphasen, weil es wegen des begrenzten Durchflusses zu geringeren Ungleichmäßigkeiten beim Aufheizen kommt. Nachteilig ist die Neigung zum un stetigen Betriebsverhalten bei hohen Voreinstellungen. THKV sollten daher möglichst nicht im unteren Drittel (im Bild VE 1, 2 und 3) des möglichen Voreinstellbereiches betrieben werden [111].

Zur Anpassung des Durchflusses an die vorhandenen Betriebsbedingungen, d.h. zum hydraulischen Abgleich, kommen alternativ auch Ventile mit austauschbaren Ventilkegeln (k_V -Kegel) in Frage. Sie arbeiten über einen großen Bereich des Hubes linear. Ein günstiges Anfahrverhalten nach Absenkphasen ergibt sich bei ihnen, wenn der Durchflusskennwert im Auslegungspunkt $k_{V,A}$ mindestens halb so groß ist wie der maximale Durchflusskennwert $k_{V,S}$ [87] [177]. Damit ist sichergestellt, dass die mögliche Durchflusssteigerung nicht zu groß wird.

Ventilautorität, Grund- und Betriebskennlinie eines THKV

Das Thermostatventil ist durch eine Betriebs- und eine Grundkennlinie gekennzeichnet. Die Gleichungen für beide Kennlinien finden sich im Anhang auf Seite 209. Nach der idealen Grundkennlinie verhalten sich Hub und Durchfluss proportional zueinander.

Aus den Auftragungen in Bild 5-8 und Bild 5-9 wird jedoch deutlich, dass der ideale Zusammenhang nur für den Druckverlust über dem Regelkegel gilt. Da im realen Ventil Widerstände (Gehäuse, Voreinstellungen) in Reihe zum Regelkegel geschaltet sind, entartet die Kennlinie. Es ergibt sich die Betriebskennlinie. Der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Hub H hängt dann von der Ventilautorität ab. Wird die Betriebskennlinie graphisch aufgetragen, ergeben sich Zusammenhänge wie in Bild 5-10 (I. Quadrant) auf Seite 86.

Die das Betriebsverhalten eines THKV bestimmende Ventilautorität a_V ist nach Gleichung (5-3) definiert. Sie gibt an, welcher Anteil der zentral vorhandenen Druckerhöhung über das Thermostatventil ($\Delta p_{V,100}$) und welcher Anteil über das restliche Netz ($\Delta p_{\text{Netz},100}$) abgebaut wird. Der Kehrwert gibt entsprechend darüber Auskunft, um welchen Faktor der Differenzdruck am THKV im Auslegungsfall ($\Delta p_{V,100}$) beim Schließen maximal ansteigen kann. Die Ventilautorität wird per Definition für den Vollastfall angegeben. Gleichung (5-3) gilt auch für die Autorität von Ventilen anderer hydraulischer Kreise, z.B. von zentralen Dreiwegeventilen.

$$a_V = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{\text{Netz},100}} = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{\text{gesamt},100}} \quad (5-3)$$

In der Literatur sind weder der Druckabfall über dem Ventil $\Delta p_{V,100}$ noch der Druckverlust im Netz $\Delta p_{\text{Netz},100}$ bzw. $\Delta p_{\text{gesamt},100}$ eines Einzelraumregelkreises eindeutig definiert. Als maßgeblicher Netzdruckverlust kann der Druckabfall aller Teilstrecken eines hydraulischen Netzes verstanden werden, in denen der Eingriff des Regelorgans eine Änderung des Volumenstroms bewirkt (volumenstromvariabler Kreis). In einfachen Anlagen sind dies alle Teilstrecken bis zur Pumpe incl. des Wärmeerzeugers bzw. der Wärmeübergabestation. Kann der Differenzdruck, der im geschlossenen Zustand am Ventil ansteht, in diesen Anlagen nicht angegeben werden, wird als Ersatz auch die Nullförderhöhe der Pumpe verwendet. In Anlagen mit hydraulischer Entkopplung der Verbraucherkreise (i.d.R. Großanlagen) ist der maßgebliche Netzdruckverlust der Druckabfall des Netzes bis zur Entkopplung, z.B. bis zum Differenzdruckregler.

VDI 2073 und andere Veröffentlichungen definieren den Netzdruckverlust als den Druckabfall der Teilstrecken im Stromweg eines Verbrauchers, in denen maximal das Vierfache des Ventil-

volumenstroms fließt [163]. Bis hier wird eine zu berücksichtigende Rückkopplung durch das restliche Rohrnetz beim Schließen des Ventils erwartet.

Als Druckabfall über dem THKV ist üblicherweise der gesamte Ventildruckverlust (incl. Druckverlust der Voreinstellung) definiert (z.B. [105]). Hierzu muss jedoch ergänzt werden: eine ehrliche Betrachtung der Zusammenhänge verlangt, dass die Ventilautorität nur mit dem Druckabfall über dem eigentlichen Regelkegel gebildet wird [191]. In der Praxis wird die sich ergebende *echte Ventilautorität* jedoch kaum verwendet. Sie nimmt bereits bei üblichen Voreinstellungen Werte unter 0,1 an und ist bei kleinster Voreinstellung eines THKV praktisch null. Eine hohe echte Ventilautorität kann durch Einsatz eines Ventils mit austauschbaren Ventilkegeln erreicht werden, denn in diesen wird der größte Teil des Differenzdrucks über dem Regelkegel und nicht über einem Festwiderstand abgebaut.

Wird jedoch der gesamte Ventildruckverlust als $\Delta p_{V,100}$ verwendet, ergeben sich rechnerisch hohe Ventilautoritäten, auch wenn durch die starke Voreinstellung die echte Ventilautorität kleiner und nicht wie oft deklariert größer wird [195]. Das Erreichen einer rechnerisch hohen Ventilautorität durch Voreinstellung bedeutet einen Verlust an Regelhub, vergleiche Bild 5-8 (Seite 81). Der Abstand zwischen idealer linearer Kennlinie und entarteter Kennlinie ist ein Maß für die Verringerung der echten Ventilautorität. Die Voreinstellung erhöht also nicht die Regelqualität, sie stellt lediglich die Volumenstromverteilung sicher [98].

Unabhängig von der Definition der Einzelgrößen ist die Ventilautorität ein Maß für die Regelgüte des Ventils. Je höher die Ventilautorität – im besten Fall 1,0 – desto besser, also linearer die Betriebskennlinie des Ventils, vgl. Bild 5-10, I. Quadrant. In der Literatur werden daher Auslegungsempfehlungen für die Projektierung von THKV gegeben. Nach der ersten Thermostatisierung von Bestandsanlagen Anfang der 1980er Jahre waren Ventilautoritäten von unter 0,3 typisch [114]. Heute wird in der Regel ein Bereich von 0,3 ... 0,7 empfohlen [87]. Nah- und Fernwärmerversorger fordern häufig größere Ventilautoritäten von 0,5 ... 0,67 [1] [191]. LOOSE und KRAINER sehen zur hohen Fremdwärmenutzung $a_v \geq 0,7$ als guten Wert für die Auslegung an [105].

P-Bereich

Der Auslegungsregelbereich (P-Bereich) eines THKV charakterisiert die notwendige Raumtemperaturabweichung, damit der projektierte Auslegungsmassenstrom fließt. Wegen der reglerinternen Abhängigkeit kann der Temperaturabweichung ein konkreter Hub zugeordnet werden, der Auslegungshub (vgl. Bild 5-8 und Bild 5-9). Die Auslegung eines THKV erfolgt so, dass der Auslegungsmassenstrom nicht erst beim Erreichen des konstruktiv bedingten maximalen P-Bereichs (Gesamthub) von $X_{p,max} = 3 \dots 4 \text{ K}$ bzw. bei älteren THKV von 6 K [191] fließt, sondern bereits bei einem geringeren P-Bereich (Hub).

Der empfohlene maximale P-Bereich ergibt sich aus einer noch tolerierten Regelabweichung, der minimal empfohlene Wert kann durch die Stabilität von Regelkreisen begründet werden. Dabei gilt: je kleiner der ausgenutzte Regelbereich, desto größer ist die Gefahr der Instabilität, d.h. der

nicht mehr stetigen Regelung (ROOS in [171]). Dies birgt die Gefahr unkomfortabel veränderlicher Raumtemperaturen. Nach der im Anhang beschriebenen Ableitung (Bild A-6 und Erläuterungen auf Seite 212) liegt der optimale P-Bereich im Auslegungsfall bei etwa $X_{p,Opt} \approx 2,5$ K. Instabile Zustände sind erst bei etwa halb so großem P-Bereich zu erwarten.

Auslegungsempfehlungen aus der Literatur schwanken. STRIEBEL definiert nach eigenen Untersuchungen 0,7 ... 2 K als anzustrebenden Bereich [178]. JABLONOWSKI [87] und OTTO [115] empfehlen 1 ... 2 K, LOOSE und KRÄINER [105] sehen 0,5 ... 1,0 K als gute Werte für die Auslegung an. BURKHARD und KRAUS raten, die Auslegung unter 1 K wegen des instabilen Regelverhaltens zu vermeiden [28]. KREMONKE bestätigt das Schwingverhalten bei $X_p < 1$ K; er stellt jedoch auch fest, dass diese Auslegung nicht verneint werden kann, weil Schwingungen die Lebensdauer des THKV heute nicht mehr beeinflussen [127].

In der Praxis, d.h. in überdimensionierten Netzen und ohne Auslegung der THKV stellt sich ohnehin ein sehr geringer P-Bereich von $X_p < 0,5$ K ein [74]. Obwohl die Veröffentlichung eines Thermostatventilherstellers darin eine sehr große Regelgenauigkeit sieht, ist das Problem der Schwingung nicht von der Hand zu weisen.

Hysterese-, Heizmittel-, Differenzdruckeinfluss

Für Thermostatventile gelten Einsatzgrenzen, z.B. hinsichtlich des minimalen und maximalen Differenzdrucks. Hier definiert TIATOR $\Delta p_{V,max} = 200$ mbar und $\Delta p_{V,min} = 40$ mbar am Ventil [156]. Oberhalb von etwa 250 mbar ist mit Geräuschentwicklung zu rechnen. Wenn es am Ventil zu Differenzdrücken über 0,2 ... 0,25 mbar kommen kann, sollten Differenzdruckregler eingesetzt werden (POSERT in [177]).

Weitere Qualitätsmerkmale von THKV sind in EN 215 definiert. Thermostatventile weisen eine Hysterese, d.h. Verschiebung zwischen Öffnungs- und Schließkurve auf. Der erlaubte Maximalwert nach EN 215 beträgt 1 K. Hochwertige Ventile weisen in der Praxis maximal 0,2 ... 0,3 K Hysterese auf [191]. Erreichbar sind Werte von etwa 0,1 K [95]. Der Differenzdruck am Ventil beschleunigt das Öffnen und verzögert das Schließen. EN 215 lässt hier maximal 1 K (bei einer Druckdifferenzerhöhung von 0,1 auf 0,6 bar) zu [95].

Von starker Bedeutung für das Regelverhalten ist der Heizmitteltemperatureinfluss. Nach EN 215 sind maximal 1,5 K Abweichung der Regelgenauigkeit je 30 K Vorlauftemperaturenanhebung erlaubt. Gute Ventile weisen in der Praxis einen Einfluss von 0,5 ... 0,8 K auf [191]. Durch den Vorlauftemperatureinfluss werden höhere Raumtemperaturen als wirklich vorhanden vorgetäuscht. Der Nutzer verstellt ggf. den Sollwert, eine Rückstellung erfolgt selten [191]. Der Vorlauftemperatureinfluss führt darüber hinaus zu verstärktem Schwingen des THKV. Die erhöhte Vorlauftemperatur täuscht eine erhöhte Raumtemperatur vor, das Ventil schließt. Die rasche Abkühlung des Ventilkörpers führt zu einem erneuten Öffnen.

In der Praxis eingesetzte THKV

Die Auswertung realer Gebäude mit Heizkörpern und THKV führt zu den in Tabelle 5-4 zusammengestellten Merkmalen [200]. Auffällig ist, dass in über der Hälfte aller Gebäude keine vorein-

stellbaren THKV zu finden sind. Es sind praktisch keine THKV eingestellt bzw. das Aufnahmepersonal konnte dazu keine Angaben machen.

Beschreibung		(Anzahl)	Ausstattung der THKV mit Voreinstellung		Einstellung der einstellbaren THKV		
			nicht vorhanden	vorhanden oder teilweise vorhanden	THKV eingestellt	THKV nicht eingestellt	keine Angabe
EFH	bis 1977	(23)	40 %	60 %	0 %	40 %	60 %
	ab 1978	(22)	60 %	40 %	10 %	60 %	30 %
MFH	bis 1977	(20)	80 %	20 %	0 %	50 %	50 %
	ab 1978	(14)	40 %	60 %	10 %	30 %	60 %
mit Fernwärme		(24)	50 %	50 %	10 %	50 %	50 %
mit Kessel		(55)	60 %	40 %	0 %	40 %	50 %
alle Gebäude		(79)	60 %	40 %	10 %	40 %	50 %

Tabelle 5-4 Ausstattung von Gebäuden mit Thermostatventilen

Die Untersuchung von Anlagen im Bestand zeigt weiterhin, dass Thermostatventile mit sehr großen Durchlasswerten installiert sind. Stichprobenuntersuchungen an mehreren Gebäuden haben gezeigt, dass erforderliche Durchlasswerte der Ventile bei etwa $k_{V,S} = 0,05 \dots 0,10 \text{ m}^3/\text{h}$ liegen [67]. Typische am Markt angebotene und in den Gebäuden eingesetzte Ventile haben Durchlasswerte von $k_{V,S} = 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ (größte Häufigkeit) bzw. $k_{V,S} = 1,4 \text{ m}^3/\text{h}$. Feinstreguliertventile, die in der Praxis jedoch nur im Ausnahmefall verwendet werden, erreichen $k_{V,S}$ -Werte von $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ [67]. Es kann also von einer durchschnittlichen Überdimensionierung der THKV von 7 ... 10 ausgegangen werden.

Auch Heizkörper mit integriertem Ventil weisen deutlich zu große $k_{V,S}$ -Werte auf [98]. Da etwa die Hälfte (Tendenz steigend) aller in Deutschland produzierten und eingesetzten Plattenheizkörper ab Werk mit Ventil ausgestattet werden [99], berührt das Problem auch den Neubau.

Elektronische Regler

Elektronische Regler arbeiten ohne Hilfsenergie mit einem PI- oder PID-Verhalten, d.h. ohne Regelabweichung. Meist weisen die elektronischen Regler eine hohe Nachstellzeit auf, um die Empfindlichkeit und damit die Schwingungsneigung zu reduzieren. Eine zusätzliche Aufschaltung von Fensterkontakten und dezentrale Zeitprogramme sind möglich. Obwohl Felduntersuchungen mit adaptiven Reglern bzw. elektronischen Reglern mit Fensteröffnungserkennung geringere Lüftungsdauern und geringeren Verbrauch zeigen [17], haben sie sich in der Praxis aus Wirtschaftlichkeitsgründen noch nicht gegen THKV durchgesetzt.

5.2.3. Einzelraumregelkreis

In Gebäuden früherer Baujahre, d.h. Gebäuden mit hohen Heizlasten, war allein die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung ausreichend, um die Heizleistung dem Bedarf anzupassen. Eine zusätzliche Einzelraumregelung ist dagegen in Gebäuden mit geringen Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten notwendig, um den Fremdwärmeanfall innerhalb es Gebäudes auszugleichen Dieser macht im Gegensatz zu früher einen Großteil der Wärmeströme innerhalb des

Gebäudes aus. Im Niedrigenergiegebäude kann mit einem Fremdwärmeanteil bezogen auf die Transmissions- und Lüftungsverluste von 30 ... 50 % gerechnet werden, in älteren Gebäuden liegt der Wert meist unter 20 %. Der seit der Thermostatisierung in Gebäuden vorhandene Einzelraumregelkreis ist zusammen mit anderen Regelkreisen der Anlagentechnik in Bild 5-4 auf Seite 71 dargestellt. Im Folgenden wird die in der Praxis zu erwartende Regelgüte der Einzelraumregelung bei typischer Anlagenqualität untersucht.

Ableitung der Regelstreckenkenlinie

Die Raumtemperaturregelung ist ein Regelkreis mit einem linear arbeitenden Regler (Thermostatkopf) und einer stark entarteten Regelstreckenkenlinie (Ventilkörper, Heizfläche und Raum). Die Ableitung der Streckenkenlinie ist in Bild 5-10 zusammengestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Ventilhub und der Raumtemperatur (Streckenkenlinie) im IV. Quadranten ergibt sich abhängig von der Ventilautorität a_v (I. Quadrant), dem Wärmeübertragerkennwert a (II. Quadrant) und der Störgrößen im Raum (III. Quadrant).

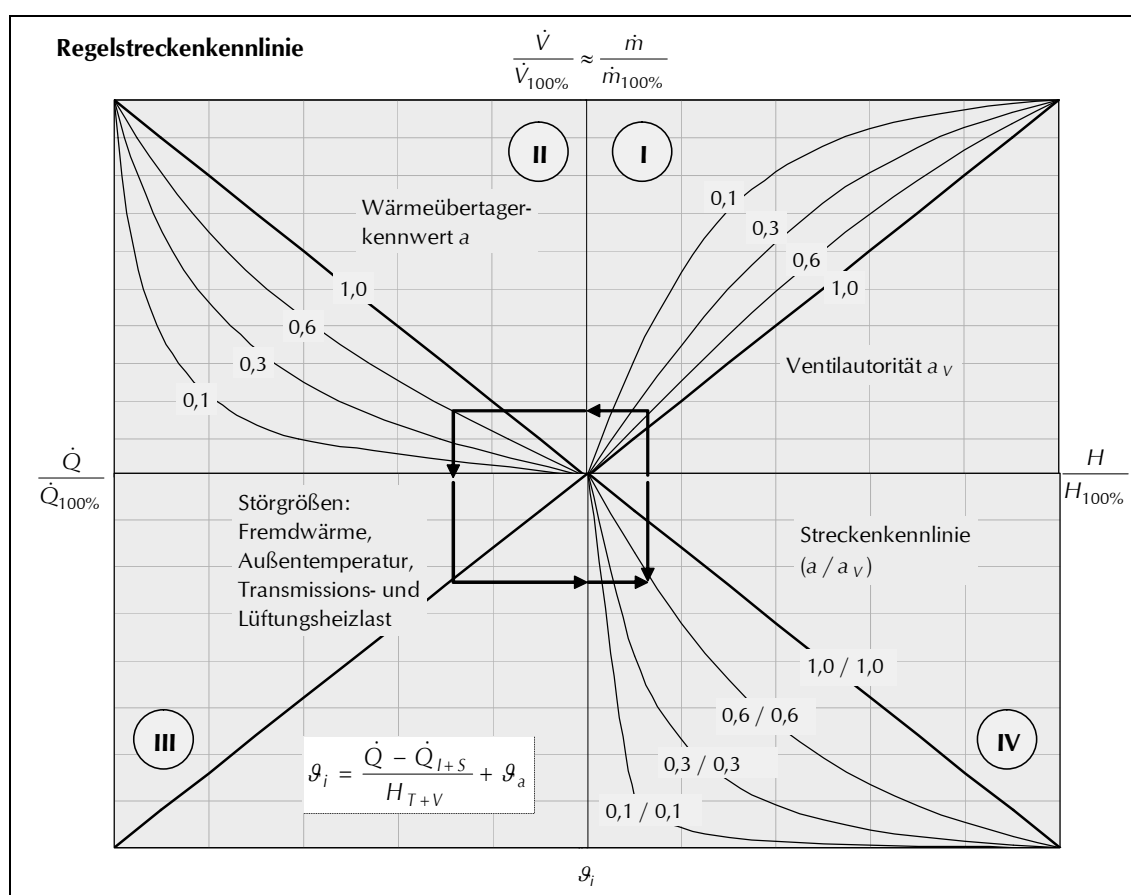


Bild 5-10 Regelstreckenkenlinie

Im ersten Quadranten muss die echte Ventilautorität aufgetragen werden. Die bei der Auftragung als Bezugswerte $H_{100\%}$ und $V_{100\%}$ verwendeten Größen sind der Auslegungshub und entsprechend der im Auslegungsfall durch das THKV fließende Volumenstrom. Da bereits im Auslegungsfall nicht der gesamte Regelbereich des Ventils (vgl. Kapitel 5.2.2) genutzt wird, entsprechen $H_{100\%}$ und $V_{100\%}$ nicht den maximal für dieses Ventil möglichen Werten.

Der Wärmeübertragerkennwert im zweiten Quadranten ergibt sich aufgrund der vorliegenden Systemspreizung und Raumtemperatur. Der Zusammenhang im dritten Quadranten wird durch den Momentanzustand des Raumes bestimmt (siehe eingetragene Gleichung). Je nach Außentemperatur ϑ_{ar} , Fremdwärme \dot{Q}_{I+Sr} , Transmissions- und Lüftungsheizlast H_{T+V} ergibt sich im Raum eine andere Temperatur ϑ_i aus der zugeführten Wärme \dot{Q} . Im vierten Quadranten kann wie angedeutet, eine Streckenkennlinie konstruiert werden. Die eingetragenen Beispiele gelten jeweils für gleiche Werte von Ventilautorität und Wärmeübertragerkennwert.

Erkennbar ist der stark entartete Zusammenhang zwischen Hub und Raumtemperaturänderung. In Netzen mit stark voreingestellten Ventilen und kleinen Wärmeübertragerkennwerten führt praktisch nur eine Hubänderung im Bereich von 0 ... 10 % zu einer Raumtemperaturänderung.

Regelabweichung für den Regelkreis

Zur Regelstrecke im IV. Quadranten von Bild 5-10 kann die Reglerkennlinie eingetragen werden, um den Betriebspunkt des Regelkreises zu konstruieren. Dies erfolgt in Bild 5-11 für zwei Betriebszustände: bei minimaler und bei mittlerer Außentemperatur. Es sind jeweils die ideale und die reale Regelstreckenkenlinie mit und ohne Fremdwärme eingetragen.

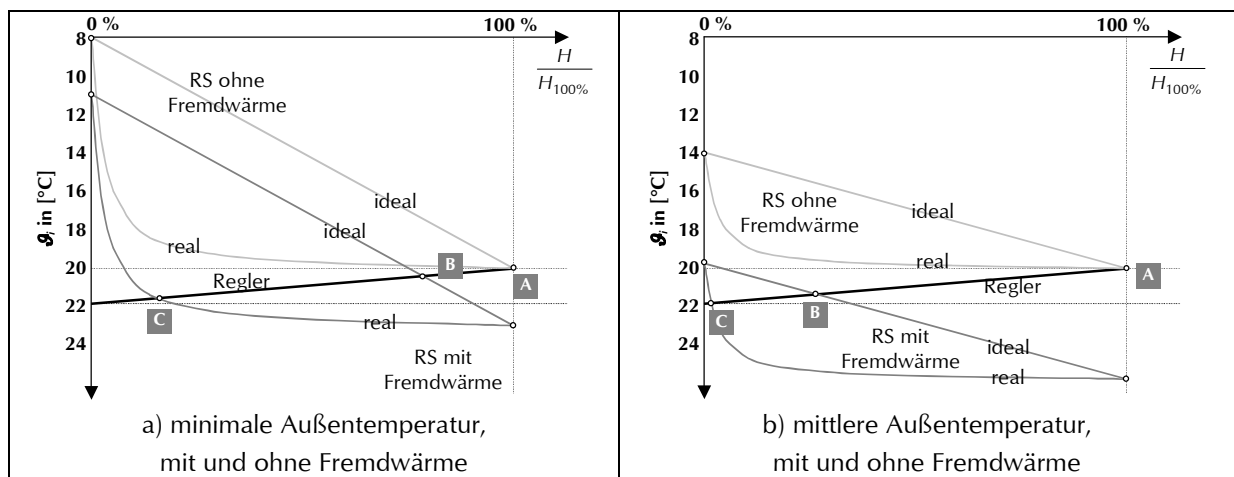


Bild 5-11 Betriebskennlinie für zwei Betriebszustände bei idealer und realer Streckenkennlinie

Der im Bild eingetragene Regler hat jeweils einen P-Bereich von $X_p = 2$ K. Bei 20 °C Raumtemperatur erreicht das Ventil den Auslegungshub, bei 22 °C ist es vollständig geschlossen. Für den Fall, dass keine Fremdwärme auftritt, stellt sich im Raum jeweils der Betriebspunkt A ein. Bei minimaler Außentemperatur (a) und Fremdwärmeanfall ergeben sich für die ideale und die reale Regelstreckenkenlinie die Betriebspunkte B und C. Es ist eine bleibende Regelabweichung der Raumtemperatur von ca. + 0,5 K (ideal) bzw. + 1,5 K (real) zu verzeichnen. Für eine mittlere Außentemperatur (b) ergibt sich auch ohne Wärmezufuhr eine geringe Raumauskühlung. Die Regelstreckenkenlinie verläuft flacher. Tritt Fremdwärme auf, führt dies wieder zu Regelabweichungen. Bei der realen Streckenkennlinie von fast 2 K.

Je stärker die Entartung der Betriebskennlinie, desto größer sind die bleibenden Regelabweichungen. Starke Schwankungen der Regelabweichung, d.h. der Raumtemperatur, bei Auftreten

und Wegfall von Fremdwärme können zum Verstellen des Sollwertes durch den Nutzer führen. Weiterhin ist bei starkem Fremdwärmeanfall mit einem Taktverhalten der THKV zu rechnen, da diese nur im unteren Hubbereich arbeiten (BACH in [181]). Der in der Praxis zusätzlich vorhandene Einfluss der Hysterese und des Vordrucks auf die Reglerkennlinie verschieben den realen Betriebspunkt in Richtung höherer Regelabweichungen bzw. Raumtemperaturen [87].

Zweipunktverhalten von THKV in der Praxis

POSERT [177] stellt fest, dass der unreflektierte Einbau von THKV in Bestandsbauten ohne Kenntnis der installierten oder der notwendigen Heizleistung zu Störungen führt. Im günstigsten Fall sind dies nur Geräusche [177]. Dies entspricht aber etwa dem heute typischen Vorgehen bei der Ausstattung von Anlagen mit THKV – sowohl im Neubau als auch im Bestand. In Tabelle 5-5 wird das Verhalten des realen Raumtemperaturregelkreises nachgezeichnet und POSERTS Aussage untermauert.

Merkmals	Effekt
Heizflächenbemessung	Wegen der großen Heizflächen (z.B. nach einer Modernisierung des Baukörpers) bezogen auf die Raumheizlast ergeben sich geringe notwendige Übertemperaturen.
Vorlauftemperaturregelung	Vorlauftemperaturregelungen sind zu hoch eingestellt, was zusammen mit den geringen Übertemperaturen zu einer sehr großen Auskühlung des Heizwassers führt, wenn keine Wärme verschwendet wird.
Netzvolumenstrom	Wegen der großen Heizwasserauskühlung ergeben sich extrem kleine Volumenströme im Netz.
Netzdruckverluste	Wegen der kleinen Volumenströme treten – in den großzügig dimensionierten Bestandsanlagen – nur sehr kleine Druckverluste auf.
Pumpendruckerhöhung	Pumpen sind vielfach überdimensioniert und werden – unabhängig von der Anlagengröße – an der Geräuschgrenze betrieben.
Druckverluste THKV	THKV sind selten voreingestellt oder passend gewählt. Wegen der hohen Vordrücke und Temperaturen ergibt sich eine extreme Drosselung über dem Regelkegel, d.h. bereits im Auslegungsfall sind die THKV praktisch geschlossen.
Ventilautorität (Bild 5-10 I. Quadrant)	Theoretisch ergeben sich Ventilautoritäten a_v nahe 1,0. Nahezu der gesamte Druck wird über dem Regelkegel abgebaut.
Wärmeübertragerkennwert (Bild 5-10 II. Quadrant)	Durch die hohen Vorlauftemperaturen und Spreizungen im System ergeben sich sehr hohe Wärmeübertragerkennlinien a .
Regelstreckenennlinie (Bild 5-10 IV. Quadrant)	Durch die sehr hohen Ventilautoritäten und Wärmeübertragerkennlinien ergeben sich theoretisch fast lineare Regelstreckenennlinien.
P-Bereich (Bild 5-8)	Wegen des Betriebs im unteren Arbeitsbereich ergeben sich sehr kleine Regelbereiche für den Regler.
Regelabweichung (Bild 5-11)	Wegen der sehr linearen Regelstreckenennlinie und der praktisch waagerechten Reglerkennlinie sind theoretisch keine Regelabweichungen feststellbar.
Hysterese, Druck- und Vorlauftemperatureinfluss	Wegen der hohen Vordrücke und Vorlauftemperaturen sind die genannten Einflüsse auf das Regelverhalten groß. Zusammen mit der Hysterese wird für moderne THKV ein Einfluss von $\pm 0,5 \dots 1,5$ K auf das stetige Regelverhalten abgeschätzt. Der größere Wert gilt für den Kernwinter.

Tabelle 5-5 Verhalten des Raumtemperaturregelkreises

Aus der Betrachtung nach Tabelle 5-5 muss im Bestand auf ein Zweipunktregelverhalten der thermostatischen Regelung geschlossen werden. Der effektiv genutzte Regelbereich des Ventils ist wegen der Überdimensionierung des Ventils und des hohen Differenzdrucks am Ventil so gering, dass Hysterese, Vorlauftemperatur- und Differenzdruckeinfluss die Haupteinflussgrößen auf das Regelverhalten sind. Den geschilderten Zusammenhang zeigt Bild 5-12. Aufgetragen ist eine praktisch ideale Reglerkennlinie (ohne Regelabweichung), die wegen des kleinen P-Bereichs (genutzten Hubs) des Reglers ergibt.

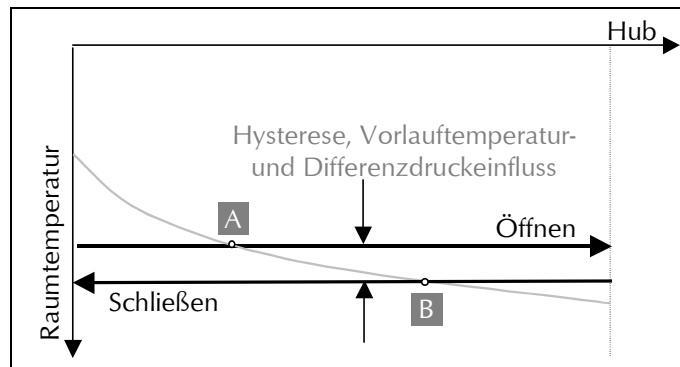


Bild 5-12 Arbeitsprinzip des realen Regelkreises (schematisch)

Die maximale Amplitude der Raumtemperatur $\Delta\vartheta_{max}$ (Temperaturdifferenz zwischen den Betriebspunkten A und B in Bild 5-12) kann näherungsweise nach Gleichung (5-4) für einen Zweipunktregler abgeschätzt werden. Als Schaltdifferenz wird aufgrund der Hysterese, des Druck- und Vorlauftemperatureinflusses ein Bereich von $x_{sd} = \pm 0,5 \dots 1,0$ K angesetzt. Mit der maximalen Stellwirkung von $X_{hs} = 6$ K und dem Schwierigkeitsgrad $S = 0,2$ (typische Mittelwerte, siehe Anhang Seite 212) ergeben sich Temperaturamplituden von etwa 2 K.

$$\Delta\vartheta_{max} = x_{sd} \cdot (1 - S) + X_{hs} \cdot S \quad (5-4)$$

Durch die Überversorgung der Heizkörper ist deren Regelfähigkeit stark eingeschränkt. Da die THKV schon im Auslegungszustand fast geschlossen sind, können sie auf den Anfall von Fremdwärme kaum reagieren und es kommt zum Zweipunktregelverhalten [88]. OTTO [186] berichtet in diesem Zusammenhang, dass Nutzer mit taktenden THKV nicht umgehen können, denn der Sollwert ist nicht "findbar". Die Betriebsphasen sind so kurz, dass sich keine Beharrung einstellen kann. Der Zusammenhang zwischen Reglereinstellung und Sollwert ist für den Nutzer nicht erkennbar [186]. LEUSCHNER stellt fest, dass die Nutzer ein taktendes THKV als ein "Auf-Zu-Ventil" bedienen. Folge ist eine im Mittel bis zu 10 K höhere Rücklauftemperatur [175].

Rückkopplung der Raumtemperaturregelstrecke auf das System

Das Takten der Ventile an den Heizflächen provoziert einen Mehrverbrauch, wenn die Nutzer als Gegenmaßnahme den Sollwert erhöhen um auf jeden Fall eine Behaglichkeit zu erreichen.

Die Voreinstellung von THKV wirkt sich zwar negativ auf die Regelbarkeit aus, begrenzt jedoch den Durchfluss durch das Ventil, auch wenn eine größere Abweichung der Raumtemperatur

vom Sollwert vorliegt (vgl. Bild 5-8 auf Seite 81). In Netzen mit voreingestellten THKV kann eine Massenstromsteigerung praktisch nur durch Drucksteigerung erfolgen.

THKV in Einrohrheizungen

Bei Einrohrheizungen ist die Wahl von THKV in der Regel unproblematisch. Eine hohe Ventilautorität und gute Einzelraumregelung wird erreicht, weil zu den Druckverlusten des volumenstromvariablen Bereiches nur die Anbindeleitungen des Heizkörpers über dem Nebenschluss zählen. Gleichzeitig sind größere P-Bereiche als bei Zweirohrheizungen möglich, weil die Volumenströme wegen der geringen Auskühlung je Heizkörper verhältnismäßig groß sind.

Bewertung der Raumtemperaturregelstrecke in der Energiebilanz

Regelabweichungen und das Taktverhalten der Thermostatventile sowie und Rückkopplungen der Systemträgheit auf die Fremdwärmenutzung machen sich real als Temperaturveränderung im Raum und ggf. als erhöhter Lüftungsverlust bemerkbar. Die Höhe dieser Abweichung von den Sollwerten hängt unter anderem von der Häufigkeit des Nutzereingriffs in die Regelung ab. ESDORN empfiehlt daher, die Wärmeübergabeverluste nicht als separate Wärmemenge in der Energiebilanz zu berücksichtigen [57]. Bei der Abschätzung der Auswirkungen von QS im Rahmen der Arbeit wird der Eingriff der dezentralen Regelung durch angepasste mittlere Raum- und Systemtemperaturen sowie Luftwechsel sichtbar gemacht.

5.3. Zentrale Regelung und Hydraulik

Im Folgenden werden Einzelprobleme der Netzhydraulik von Heizungsanlagen incl. hydraulischer Abgleich sowie Pumpenregelung und -dimensionierung besprochen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Beurteilung der zentralen Regelung.

5.3.1. Zentrale Hydraulik und hydraulischer Abgleich

Eine besondere Aufgabenstellung der Heizungstechnik ist der hydraulische Abgleich. Wird er nicht durchgeführt, müssen Pumpen und/oder Heizkurven höher eingestellt werden, um alle Räume ausreichend mit Wärme zu versorgen. ROOS stellt trotzdem fest: der hydraulische Abgleich wird oft unterlassen [22]. Einer der marktführenden Pumpenhersteller schätzt die Zahl der Anlagen ohne hydraulischen Abgleich auf 80 %, gleichzeitig sind etwa 90 % der voreinstellbaren THKV nicht eingestellt [197]. Dies verwundert angesichts der Tatsache, dass mögliche Einsparpotentiale in der Fachliteratur bekannt sind.

STRIEBEL erreicht in Netzsanierungen durch hydraulische Optimierung etwa 30 % der alten elektrischen Pumpenleistung [171]. BRANDT schätzt, dass durch den hydraulischen Abgleich etwa 60 % der ca. 15 Mrd. kWh Pumpenstrom in Heizungs- und Klimaanlage gespart werden könnten [53]. Eigene Untersuchungen an etwa 80 Gebäuden zeigen, dass der hydraulische Abgleich etwa in 3 % der Fälle durchgeführt ist [200].

Arten von hydraulischen Systemen

Die hydraulischen Systeme von Groß- und Kleinanlagen unterscheiden sich (vgl. Bild 5-3 auf Seite 71). Während in Kleinanlagen Pumpe, Wärmeerzeuger und ggf. Einrichtungen zur Differenz-

druckregelung eine Einheit bilden, sind Erzeuger- und Verteilkreis in Großanlagen oft entkoppelt und weisen separate Pumpen auf. Entsprechend kommen je nach Anlagentyp andere Arten der Differenzdruckregelung in Betracht. Im Folgenden wird der hydraulische Abgleich für beide Anlagentypen angesprochen.

Grundgleichung der Hydraulik

Vor der Vertiefung in das Thema Hydraulik sei an dieser Stelle die Grundgleichung der Hydraulik wiederholt. Sie besagt, dass der Druckverlust eines Netzes Δp bei turbulenter Strömung näherungsweise quadratisch mit dem Netzvolumenstrom \dot{V} ansteigt. Das Netz ist durch einen Widerstand C charakterisiert. Dieser wird aus einer Verschaltung (Reihen- und Parallelschaltung) aller Netzwidestände (Rohrstrecken, Einbauteile, Regelorgane usw.) bestimmt. Der Widerstand ist nicht konstant, sondern kann im Voll- und Teillastfall unterschiedliche Werte annehmen, je nachdem welche Teilstrecken im entsprechenden Betriebszustand durchflossen sind.

$$\Delta p = C \cdot \dot{V}^2 \quad (5-5)$$

Hydraulischer Abgleich und Möglichkeiten der Differenzdruckregelung

Der hydraulische Abgleich einer Heizungsanlage bewirkt, dass im Auslegungsfall jeder Verbraucher mit dem vorher berechneten Volumenstrom versorgt wird und sich die geplante Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur einstellt.

Der hydraulische Abgleich wird i.d.R. durch Maßnahmen zur Differenzdruckregelung begleitet. Diese haben die Aufgabe, verschiedene Teile des Netzes (Verbraucher untereinander oder Verbraucher- und Erzeugerkreise) hydraulisch voneinander zu entkoppeln. Damit wird auch im Teillastbetrieb, d.h. bei veränderlichen Netzwideständen, eine vernünftige Volumenstromverteilung sichergestellt. Die separat differenzdruckgeregelten Kreise beeinflussen sich untereinander bei veränderlichen Differenzdrücken nicht.

Innerhalb eines hydraulischen Kreises beeinflussen sich die Verbrauchseinrichtungen jedoch gegenseitig. Steigt der Widerstand in einzelnen Teilstrecken z.B. durch schließende THKV an, wird der zur Verfügung stehende Volumenstrom verstärkt durch andere Verbraucher befördert. Diese sind dann überversorgt, die THKV müssen dies ausregeln. In hydraulischen Kreisen mit unregelten Pumpen wird der Effekt dadurch verstärkt, dass bei fallenden Gesamtvolumenströmen im Teillastfall die Pumpenförderhöhe sogar ansteigt.

Zur Minderung von Differenzdruckschwankungen bzw. zur hydraulischen Entkopplung in Heizungsnetzen werden folgende Maßnahmen ergriffen:

- Hydraulische Entkopplung von Wärmeerzeugern und Wärmeverbrauchern in Teilbereiche mit mehreren Pumpen.
- Einsatz geregelter Pumpen mit interner Differenzdruckerfassung mit Konstantdruck- (Δp_{konst}) oder Proportionaldruck- (Δp_{var}) Regelung (vgl. Kapitel 5.3.2).

- Einsatz zentral oder bei größeren Anlagen an Strängen dezentral angeordneter Differenzdruckregler. Der kleinste Sollwert eines Differenzdruckreglers liegt heute üblich bei 50 mbar, der P-Bereich und damit die maximale Regelabweichung bei Teillast beträgt etwa 10 ... 20 mbar [191].
- Einsatz zentral angeordneter Überströmventile, z.B. auch für Brennwertthermen zur Aufrechterhaltung eines Mindestvolumenstroms. Dies ist vor allem im Teillastbetrieb ungünstig, weil der Volumenstrom durch Pumpe und Erzeuger künstlich hoch gehalten wird.
- Einsatz geregelter Pumpen mit externer Druckerfassung (Schlechtpunktregelung). Dies kann so erfolgen, dass das gesamte Netz ohne die Heizzentrale mit einem konstanten Differenzdruck betrieben wird. Damit arbeitet die Pumpe wie ein Differenzdruckregler, aber nahezu ohne Regelabweichung.
- Einsatz von THKV mit integriertem Differenzdruckregler. Diese Maßnahme bietet eine völlige Entkopplung der Verbraucher untereinander [145].

Der hydraulische Abgleich von Verbrauchern, die hydraulisch untereinander gekoppelt sind, erfolgt durch das Einbringen von zusätzlichen dezentralen Widerständen im Netz. Im Folgenden wird der hydraulische Abgleich für eine Kleinanlage beschrieben, in der alle Komponenten zu einem hydraulischen Kreis verschaltet sind. Das Vorgehen ist auf Großanlagen übertragbar.

Ist die zentrale Druckerhöhung in der Anlage frei wählbar (z.B. bei einer einstellbaren Pumpe), gibt es mindestens einen (den hydraulisch ungünstigsten) Heizkörper im Netz, der keine zusätzliche Eindrosselung benötigt. Er bestimmt die einzustellende Förderhöhe an der Pumpe. Die dadurch verfügbare Druckdifferenz legt wiederum die notwendigen Zusatzwiderstände für alle anderen Heizkörperventile bzw. -kreise fest.

Kann die zentrale Druckerhöhung für alle Verbraucher nur stufig gewählt werden oder liegt sie fest, z.B. durch die unveränderliche Pumpenförderhöhe einer im Wärmeerzeuger integrierten Pumpe, bei Differenzdruckreglern oder Überströmventilen mit Mindestdifferenzdruck, müssen alle Heizkörper auf den vorhandenen Wert eingedrosselt werden [83] [88]. Dies muss auch bei einer Neuplanung berücksichtigt werden. In diesem Fall kann zusätzlich dafür gesorgt werden, dass der überflüssige Druckanteil bereits zentral abgebaut wird. Es werden dazu zusätzliche Differenzdruckregler eingesetzt. Der Einsatz von Strangreguliertventilen ist dagegen nur in volumenstromkonstanten Netzen wirksam. Im Teillastbetrieb einer Zweirohrheizung sind sie nicht wirksam, weil sie wegen der quadratischen Abhängigkeit des Druckverlustes vom Volumenstrom bei Teillast praktisch keinen Druckverlust aufweisen – siehe Gleichung (5-5) auf Seite 91.

Abgleichwiderstände sind dezentral anzuordnen oder es können kleine Gruppen gebildet werden (STRIEBEL in [171]). Der notwendige Druckverlust über dem THKV bzw. der Voreinstellung ist der bis zur gegebenen Förderhöhe fehlende Netzdruckverlust. Die Vorgabe von festen Druckverlusten für THKV (50, 100, 150 mbar) kann immer nur eine Näherung sein, auch wenn sie gestaffelt erfolgt [2].

Netzauslegung in Neubau

Das Vorgehen bei der Rohrnetzberechnung im Neubau soll hier nicht näher beschrieben werden, es sei auf die Literatur verweisen, z.B. [130]. Als Hinweis für die QS sollen hier nur die anzustrebenden Druckverluste eines neuen Netzes genannt werden. Die Dimensionierung neuer Netze soll anhand sehr niedriger mittlerer R-Werte erfolgen. Der empfohlene Bereich schwankt um einen Mittelwert von etwa 25 ... 40 Pa/m bei Werten in der Literatur von 10 ... 30 Pa/m [105], 25 ... 40 Pa/m [142], 30 ... 70 Pa/m [135], 20 ... 50 Pa/m und für zentrale Kellerleitungen bis 100 Pa/m [111]. Insgesamt sollen sich möglichst sehr geringe Druckverluste ergeben. Somit ist eine geringe hydraulische Kopplung der Verbraucher untereinander gewährleistet und es werden geringe Pumpenleistungen notwendig. Die Bemessung von Rohrleitungen kann anhand der Vollastvolumenströme oder unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeiten erfolgen [115].

Die Druckverlustberechnung ist mit einer Unsicherheit von ca. 20 % gegenüber den tatsächlichen Werten behaftet, wobei die Druckverluste in der Praxis eher geringer sind als berechnet. Durch den quadratischen Zusammenhang ergibt sich eine Volumenstromabweichung von etwa 10 % [191].

Netzberechnung im Bestand

Der hydraulische Abgleich funktioniert im Bestand wie bei einem Neubau. Die Ungewissheit des Abgleichs liegt in der Frage, welche Volumenströme im Netz fließen und welche Druckverluste sich daher im vorhandenen, aber in den seltensten Fällen dokumentierten Rohrnetz einstellen. Teilweise kommentierte Vorschläge zur überschlägigen Bestimmung der Volumenströme und Druckverluste aus der Literatur sind im Folgenden zusammengestellt. Auch aus Veröffentlichungen verschiedener Hersteller resultieren – trotz der teilweise produktabhängigen Darstellung der Problematik – praktikable Ansätze für den hydraulischen Abgleich im Bestand.

- Die AGFW fordert bei Umstellung von Anlagen auf Fernwärme keine Rohrnetzberechnung in kleinen Netzen, wenn die Temperaturspreizung gesteigert wird [1]. Dies kann nur eintreten, wenn eine höhere Vorlauftemperatur eingestellt wird; erfolgt dann jedoch keine Rohrnetzberechnung und werden die THKV nicht voreingestellt, kann es zu enormen Leistungssteigerungen kommen – siehe Bild 5-6 auf Seite 78.
- Veröffentlichungen des Landes Baden-Württemberg stellen fest, dass Heizkörper ggf. nach einer Modernisierung neu einreguliert werden müssen, wenn eine ungleichmäßige Beheizung auftritt. Dies wird allerdings als relativ zeitaufwendig angesehen [198]. Diese Aussagen dürften dem Planer und Ausführenden nicht weiterhelfen.
- Das HANDBUCH FÜR HEIZUNGSTECHNIK hält den hydraulischen Abgleich im Bestand für aufwendig, besser sei eine Rohrnetzberechnung gleich im Zusammenhang mit der Anlagenplanung [22]. Diese Feststellung ist für eine Optimierung des Bestands wenig hilfreich.
- JABLONOWSKI [87] macht trotz einer detaillierten Theoriebeschreibung der hydraulischen Zusammenhänge für den Neubau nur wenige Aussagen über den Bestand. Er stellt jedoch klar, dass die planerischen Leistungen beim Umbau einer Bestandanlage nicht mit dem Einheitspreis für das THKV abgegolten werden können [87].

- BITTER [178] sagt über die Ausstattung von bestehenden Anlagen mit THKV: "wichtig ist, dass ohne Kenntnis der vorhandenen Anlagendaten keine Umrüstung erfolgen kann. Eine Dimensionierung der Thermostatventile nur nach den vorhandenen Anschlußdimensionen ist falsch" [178]. Vorschläge für die Aufnahme der Anlagendaten fehlen.
- Das in der Entwicklung befindliche VDMA-EINHEITSBLATT zur Hydraulik [182] stellt für Bestandsanlagen fest, dass ein rechnerischer Abgleich ohne vorhandene Rohrnetz- und Lastberechnung nicht möglich ist. Bestehende Anlagen sollen daher durch Messung abgeglichen werden. Hierbei sind für alle Anlagenteile die gemessenen und die Soll durchflüsse in Einklang zu bringen [182]. Die Bestimmung der Volumenstromsollwerte ist
- ~~Wichtig~~ ~~beschreibt~~ ~~beschäftigt~~ für den Abgleich im Bestand den Einsatz von Messrücklaufverschraubungen vor [195]. Auch dies erfordert die Kenntnis des notwendigen Volumenstroms.
- Ein Thermostatventilhersteller [116] gibt verschiedene einfache und ausführliche Verfahren zur Bestimmung der Raumheizlast an. Mit den Heizlasten werden die vorhandenen Heizflächen kontrolliert. Die sich einstellenden Temperaturspreizungen an jedem Heizkörper können angenommen oder mit Hilfe von EDV bzw. dem Heizkörperdiagramm nachgerechnet werden. Die resultierenden Volumenströme werden bestimmt. Der hydraulische Abgleich erfolgt anschließend per Messcomputer [116].
- Nach IHLE und PRECHTL soll ein Kesselaustausch mit einer Kontrolle der Raumheizflächen, der Pumpenleistung, des hydraulischen Abgleichs, der Regelung und der THKV verbunden sein [83]. Weiterführende Erläuterungen fehlen.
- Ein Heizkörperhersteller [92] setzt die notwendige Heizkörperleistung sowie die sich einstellende Spreizung als bekannt voraus. Der für den hydraulischen Abgleich notwendige Druckabfall über dem THKV wird bei kleinen Anlagen mit konstant 100 mbar vorgegeben. Bei großen Anlagen soll eine Staffelung zwischen pumpenfern, mittel und pumpennah (50, 100, 150 mbar) vorgenommen werden [92].
- BRENNER [21] beschreibt ein Verfahren für die Nachrüstung von Thermostatventilen in bestehende Anlagentechnik. Hier werden die Heizkörper durch Gebäudebegehung aufgenommen. Die Raumheizlast wird anhand der vorhandenen Heizkörper abgeschätzt [21]. Eine vereinfachte hydraulische Berechnung wird nicht beschrieben.
- VISSMANN [189] stellt die Umstellung einer Altanlage auf neue Betriebsdaten dar. Diese erfolgt nach dem thermisch ungünstigsten Heizkörper. Dieser weist die geringste Spreizung auf, mit der für das ganze System der neue Volumenstrom bestimmt wird [189]. Der Volumenstrom wird verhältnismäßig hoch abgeschätzt, da bei der typischen ungleichmäßigen Heizkörperdimensionierung auch Heizkörper mit bedeutend größeren Spreizungen (kleineren Volumenströmen) zu erwarten sind [67]. Aussagen zur hydraulischen Optimierung fehlen.
- Ein Pumpenhersteller [197] gibt vor allem ein Verfahren für die überschlägige Pumpenauslegung an. Der hydraulische Abgleich wird ohne Aufnahme der Räume, Heizkörper oder des Netzes vorgenommen. Die Heizlast des Gebäudes wird anhand von flächenbezogenen Leistungen und der Grundfläche abgeschätzt. Aus einer selbst festzulegenden Spreizung resultieren die Volumenströme. Der Druckabfall im Netz wird aus der Länge des längsten Stranges, fest vorgegebenen R -Werten sowie Zuschlägen für Einbauten incl. THKV bestimmt [197]. Die Daten entstammen Vorarbeiten von BUSCHER und WALTER [30].

- Nach OTTO [115] erfolgt der hydraulische Abgleich anhand der installierten Heizkörperleistungen (es wird dabei vorausgesetzt, dass die Heizkörper passend zur Heizlast gewählt sind) und resultierender Volumenströme. Eine vereinfachte Vorgehensweise zur Bestimmung der Pumpförderhöhe und des Druckabfalls über den THKV ist beschrieben [115].
- BACH [13] beschreibt die Anpassung bestehender Anlagen nach einer Sanierung wie folgt: die Raumheizlasten sind zu bestimmen und Heizkörper aufzunehmen. Mit Hilfe der festgelegten Vorlauftemperatur sind Rücklauftemperaturen und Massenströme zu bestimmen, ggf. sind Heizflächen auszutauschen. Das Netz muss aufgenommen werden, mit den neuen Volumenströmen sind die Druckverluste zu berechnen, die THKV (bzw. Voreinstellungen) zu bemessen und die Pumpe zu bestimmen [13].

Die unterschiedlichen Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit zu einem durchgehenden Ansatz weiterentwickelt und veröffentlicht [88]. Dieser orientiert sich an der Arbeit von BACH [13], wobei eine vereinfachte Rohrnetzrechnung ohne Aufnahme des Netzes erfolgt. Weiterhin findet eine Optimierung der einzustellenden Vorlauftemperatur statt.

Teillastverhalten des Rohrnetzes

Der hydraulische Teillastfall ist durch einen verminderten Netzvolumenstrom charakterisiert. Einzelne THKV schließen. Da die Druckverluste der Rohrleitungen und der zentralen Festwiderstände (Wärmeübertrager, Strangreguliertventil, Schmutzfänger, Absperrventile usw.) sich quadratisch mit dem Volumenstrom ändern, haben diese Anlagenkomponenten bei Teillast einen sehr geringen Druckverlust. Abhängig von der Art der zentralen Druckregelung im Netz (geregelter Pumpe, Differenzdruckregler, etc.) wird so der über den restlichen THKV abzdrosselnde Restdruck sehr stark ansteigen. Dies führt zu Arbeitsbereichen der THKV nahe ihrem Schließpunkt. Zentrale Festwiderstände führen zu einer Verschlechterung des Teillastverhaltens [191].

Der hydraulische Abgleich des Netzes erfolgt für den Vollastfall. Für den Teillastfall, d.h. bei sich ändernden Volumenströmen im Netz, gibt es keine "richtige" Voreinstellung [114]. Sobald an einer Stelle des Netzes eine Volumenstromänderung durch den Eingriff der dezentralen Regelung zu verzeichnen ist, verändern sich die hydraulischen Verhältnisse im gesamten Netz bzw. innerhalb des hydraulisch gekoppelten Teils einer Großanlage. Der zur Verfügung stehende Volumenstrom an den Verbrauchern ändert sich, damit das Verschwendungspotential. Ideale Regler können Volumenstromänderungen teilweise ausgleichen, reale THKV neigen im Teillastbereich zu starkem Zweipunktverhalten. Dies gilt für abgegliche und nicht abgegliche Netze.

Der hydraulische Abgleich ist jedoch auch im Teillastfall teilweise wirksam, v.a. wenn der Volumenstrom durch die einzelnen Verbraucher wegen einer vorhandenen Voreinstellung begrenzt ist. Auch bei Wahl von Thermostatventilen mit entsprechend begrenztem Durchfluss (passend gewählte k_v -Kegel) ergibt sich im Teillastfall eine Leistungsbegrenzung.

Auswirkungen eines fehlenden hydraulischen Abgleichs

Fehlt der hydraulische Abgleich, besteht das größte Problem in der Ungleichverteilung der Volumenströme innerhalb des Netzes. Damit ergibt sich eine räumliche Einteilung des Gebäudes in gerade ausreichend versorgte Bereiche bis zu Zonen, die ein Vielfaches an Überversorgung

aufweisen. Folgende Bandbreiten der Massenstromversorgung werden in Netzen mit fehlendem oder falschem hydraulischen Abgleich in der Literatur angegeben:

- 30 % ... 500 % (BACH in [181]),
- 50 ... 200 % (HESSLINGER in [183]),
- 50 % ... 400 % (LEUSCHNER in [175]).

KNABE stellt in Beispieluntersuchungen zum hydraulischen Abgleich fest, dass die Pumpendruck-erhöhung etwa das 5fache im nicht abgeglichenen Gebäude betragen muss, damit der hydraulisch ungünstigste Heizkörper jeweils gleich versorgt ist [127]. Mit dem fehlenden hydraulischen Abgleich, d.h. der Ungleichverteilung der Volumenströme, verknüpfen sich aus Sicht der Energieeinsparung und QS mehrere Probleme.

1. *Aufheizung*: Nahe der Pumpe liegende Heizkörper funktionieren wie ein Kurzschluss, vor allem bei der Aufheizung, wenn die Thermostate voll geöffnet sind. Durch die pumpennahen Heizkörper fließt ein Vielfaches des Volumenstroms, es erfolgt aber praktisch keine Leistungssteigerung – siehe auch Bild 5-7 auf Seite 79. Die Rücklauftemperatur ist während der Aufheizung sehr hoch. Die hydraulisch ungünstig gelegenen Räume werden erst versorgt, wenn die pumpennahen Räume voll temperiert sind und deren THKV schließen. Verstärkt wird das Problem, wenn insgesamt eine starke Auskühlung stattgefunden hat.
2. *Pumpen- und Reglereinstellung*: Gegenmaßnahmen bei fehlendem hydraulischen Abgleich sind die zentrale Steigerung des Pumpenvolumenstroms durch Einstellung einer höheren Drehzahlstufe und/oder die Einstellung einer größeren Heizkurvensteilheit. POSERT stellt zusätzlich die Verkürzung der Nachtabsenkung fest [177].
3. *Mehrverbrauch im Normalbetrieb*: Die Leistungssteigerung durch die veränderte Reglereinstellung und durch die erhöhte Pumpenleistung könnte im etwa stationären Normalbetrieb durch den Eingriff einer idealen dezentralen Regelung (ohne Regelabweichung) ausgeglichen werden. Zusammen mit einer idealen Nutzung würde sich kein Mehrverbrauch an thermischer Energie einstellen. Der Mehrverbrauch resultiert in der Praxis aus der realen Regelung und der Nutzung des gebotenen Verschwendungspotentials.
4. *Mehrverbrauch im Absenkbetrieb*: Bei zeitlich eingeschränktem Heizbetrieb durch eine Vorlauf-temperaturabsenkung unterlaufen THKV die gewünschte Einsparung [135]. Durch die ungleichmäßige Massenstromverteilung werden die übertensorgten Räume nicht so stark, ggf. gar nicht auskühlen. Liegt zusätzlich insgesamt eine zu hohe Vorlauf-temperatur vor, macht sich die Absenkung gar nicht bemerkbar (vgl. Kapitel 5.3.3).
5. *Auswirkung der Gebäudegröße*: Der fehlende hydraulische Abgleich macht sich in räumlich weit ausgedehnten Netzen stärker bemerkbar. Die ungleichmäßige Aufheizung nimmt tendenziell zu. Der nicht erfolgte hydraulische Abgleich verstärkt zudem das Problem, dass Räume mit großen Heizlasten in thermisch ungünstiger Lage (meist Eck- und Dachwohnungen) das Ende der Heizzeit bestimmen (vgl. Kapitel 5.3.3).
6. *Komfortminderung für den Nutzer*: in einem nicht abgeglichenen Netz ist mit Komfortverminderung zu rechnen. Es kann zu Geräuschbildung in der Anlage, zu stark unterschiedlichen Anheizzeiten und zum Taktbetrieb der Einzelraumregelung kommen.

Volumenstromverteilung im Netz, Bewertung der Hydraulik in der Energiebilanz

Zur energetischen Bewertung von Anlagen und hydraulischen Netzen ist die Kenntnis erreichbarer Volumenströme an den Verbrauchern sinnvoll. Damit können übertragbare thermische Leistungen und auch das Verschwendungspotential abgeschätzt bzw. berechnet werden. Die Volumenstromverteilung bei Volllast oder im praktisch immer vorliegenden Teillastfall erfordert für das konkrete Objekt eine Einzelfallbetrachtung. Typische Kennwerte für zentrale und dezentrale Volumenströme können wegen der diversen Netztypen und -größen praktisch nicht angegeben werden. Hilfen zur Abschätzung sollen dennoch gegeben werden.

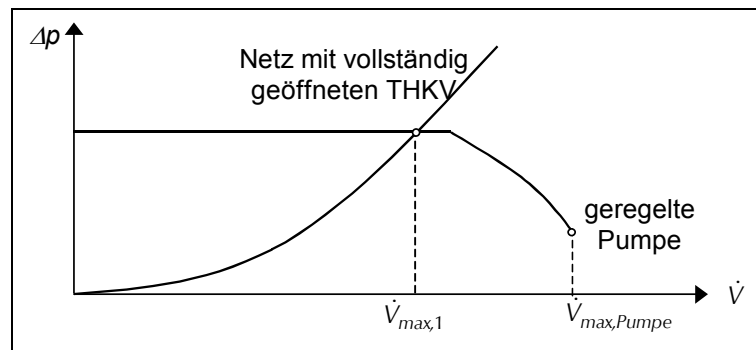


Bild 5-13 Zusammenspiel Pumpe und Netz

Der maximale Volumenstrom im Netz ergibt sich als Betriebspunkt der Pumpenkennlinie einerseits und der Netzkennlinie mit voll offenen Thermostatventilen (z.B. nach Absenkung) andererseits. Da das Netz selbst bei voll offenen Thermostatventilen einen hydraulischen Widerstand hat, ist der im Netz erreichbare Volumenstrom geringer als der maximal mögliche Pumpenvolumenstrom. Dieser Zusammenhang in Bild 5-13 für eine Anlage mit geregelter Pumpe dargestellt. Der Volumenstrom verringert sich, wenn die THKV schließen. Der maximale Netzvolumenstrom kann unabhängig von der Außentemperatur auch im Teillastfall erreicht werden.

Zur näherungsweisen Bestimmung des maximalen Netzvolumenstroms muss für ein bestehendes Netz die Rohrnetzkenlinie nach Gleichung (5-5) (Seite 91) aufgestellt werden. Dazu wird der Wert des Gesamtwiderstandes C_{gesamt} benötigt. Eine Näherung ist in Gleichung (5-6) angegeben (Daten nach [88]). Die variabel einzusetzenden Größen sind die Länge des längsten Heizungsstranges (Summe Vor- und Rücklauf) L_{Strang} sowie die beheizte Gebäudefläche A_{EB} .

$$\text{EFH: } C_{gesamt} \approx \frac{L_{Strang}}{A_{EB}^2} \cdot 45 \frac{\text{bar} \cdot \text{h}^2}{\text{m}^3} \quad \text{MFH: } C_{gesamt} \approx \frac{L_{Strang}}{A_{EB}^2} \cdot 75 \frac{\text{bar} \cdot \text{h}^2}{\text{m}^3} \quad (5-6)$$

Auswertungen von 41 Einfamilienhäusern ergaben die typische Leitungslänge $L_{Strang} = 30 \dots 40 \text{ m}$, für 31 Mehrfamilienhäuser ergibt sich der Zusammenhang $L_{Strang} \approx 45 \text{ m} + 0,04 \text{ m}^{-1} \cdot A_{EB}$ (nach [200]). Mit der Pumpenkennlinie und der Netzkennlinie kann der sich einstellende Betriebspunkt bestimmt werden.

Der resultierende Netzvolumenstrom muss auf die Verbraucher aufgeteilt werden. Die dezentralen Volumenströme hängen von den hydraulischen Widerständen der einzelnen Rohrstrecken, aber auch vom Lastzustand der Verbraucher ab. Sind einzelne Verbraucher komplett abgeschaltet, nimmt der erreichbare Volumenstrom für die anderen Verbraucher zu. Die Bestimmung der dezentralen Volumenströme erfordert eine Einzelfallbetrachtung. Das Gebäude kann beispielsweise in drei Zonen aufgeteilt werden, die unterschiedlich weit von der Pumpe entfernt liegen. Die in der Nähe der Pumpe befindlichen Heizkörper erhalten einen erhöhten Volumenstrom, aber auch die entferntesten Heizkörper werden mindestens ausreichend versorgt.

Wegen der üblichen Einzonenmodelle in den etablierten Energiebilanzverfahren, kann der Effekt der räumlich unterschiedlichen Volumenstromverteilung bislang nicht abgebildet werden. Im einfachsten Fall der Kennwertbilanz ist daher die mittlere Volumenstromüberdimensionierung des gesamten Gebäudes auch für jeden Heizkörper maßgeblich. Diese Betrachtung trägt zwar den realen Auswirkungen eines nicht erfolgten hydraulischen Abgleichs keine Rechnung, ist jedoch ohne detaillierte Netzanalyse eine mögliche Näherungslösung für das Problem. Liegen sehr große Volumenstromüberdimensionierungen vor, ist der Fehler vertretbar, weil ab einer bestimmten Überversorgung der Heizkörper keine Leistungssteigerung mehr erfolgen kann (vgl. Bild 5-7 auf Seite 79).

Hydraulik in Einrohrheizungen

Einrohrheizungen werden volumenkonstant betrieben. Schließende Verbraucher wirken sich hydraulisch praktisch nicht auf andere Verbraucher aus. Lediglich die steigende Vorlauftemperatur für nachfolgende Heizkörper im Teillastfall führt zu einem notwendigen Drosseln der nachgeschalteten THKV. Der hydraulische Abgleich von Einrohrheizungen kann durch Strangregulierventile und Volumenstromregler erfolgen (KNABE in [175]). Das Verhalten von Einrohrheizungen soll nicht weiter vertieft werden, da sie einen geringeren Marktanteil haben.

5.3.2. Umwälzpumpe

Die heute üblichen Umwälzpumpen sind Kreiselpumpen im Nassläufersystem. Dieser Pumpentyp wird seit etwa 1913 verwendet. Eine Kreiselpumpe von 1938 hatte folgende typische Kennwerte, die auch für heutige Kleinanlagen durchaus praktikabel wären: Leistungsaufnahme um 45 W bei einem Förderstrom von 0,3 m³/h und einer Druckförderhöhe von 35 mbar. Schraubenpumpen hatten bei einem viermal höheren Volumenstrom nur 30 W Leistungsaufnahme [148].

Pumpenregelungsarten

Für die Leistungsanpassung von Pumpen an den hydraulischen Bedarf kommen Drossel- oder Bypassschaltungen sowie – am energetisch sinnvollsten – die Differenzdruckregelung mit Drehzahlveränderung in Frage. Die Regelung kann nach verschiedenen Grundsätzen erfolgen:

- Konstante Druckerhöhung der Pumpe (Δp -konstant). Diese Regelungsart entspricht bei den meisten Regelpumpen der Werkseinstellung.
- Variable Druckerhöhung der Pumpe (Δp -variabel) in Abhängigkeit vom Volumenstrom proportional zwischen dem Maximaldruck (als Sollwert einstellbare Förderhöhe) und einem geringeren Druck bei Nullvolumenstrom (meist die Hälfte des Maximaldruckes). Diese Regelungsart ist bei stark unterschiedlichen (inhomogenen) Strängen zu vermeiden, da es zur Unterversorgung der hochbelasteten Stränge kommen kann, wenn die minderbelasteten Stränge keine Volumenstromanforderungen haben. Diese Regelungsart wird daher nur für Netze mit großen Druckverlustanteilen bis zum ersten Verbraucher empfohlen [83].
- Schlechtpunktregelung: Differenzdruckkonstanthaltung zwischen zwei beliebigen Punkten im Netz.
- Regelung der Leistungsaufnahme abhängig von der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf. Diese Regelung sollte nur bei volumenstromkonstanten Netzen eingesetzt werden.
- Bei in den Wärmeerzeuger integrierten Pumpen kann die Regelung auch nach herstellereigenen, internen Regelalgorithmen erfolgen.

Die Untersuchung von etwa 50 Anlagen in der Praxis ergab, dass in EFH überwiegend unregelte Pumpen vorhanden sind, ein geringer Anteil der Pumpen wird auch durch die Wärmeerzeugerregelung angesprochen. Die unregulierten Pumpen sind überwiegend mehrstufig. Die MFH weisen zu etwa gleichen Anteilen unregelte mehrstufige Pumpen oder Regelpumpen mit Δp -konstant-Regelung auf (Daten nach [200]).

Dimensionierung und Überdimensionierung von Pumpen

Die Pumpenwahl erfolgt anhand der berechneten notwendigen Werte für Volumenstrom und erforderliche Druckförderhöhe. Der Auslegungspunkt muss nicht zwangsläufig mit dem Wert des höchsten Wirkungsgrades übereinstimmen, da die Umwälzpumpe praktisch nie unter Auslegungsbedingungen, sondern im Teillastbetrieb arbeitet. Deshalb wird eine Auslegung rechts vom Wirkungsgradmaximum empfohlen.

Durch die integrierte Elektronik weisen geregelte Pumpen eine elektrische Grundleistungsaufnahme unabhängig von der zu erbringenden hydraulischen Leistung auf. Elektronische Umwälzpumpen arbeiten daher nicht energiesparend, wenn sie wegen einer Überdimensionierung am unteren Ende des Regelbereiches betrieben werden. Dann ist die Leistungsaufnahme höher als die einer korrekt ausgelegten unregulierten Pumpe [22] [26]. SENCZEK empfiehlt nur Regelpumpen mit elektrischen Leistungen über 40 W für den Praxiseinsatz, auch wenn die minimalen Leistungen unregelter stufiger Pumpen 25 W betragen [141]. Neuere Untersuchungen mit Gleichstrommotoren liegen nicht vor.

Das SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR ENERGIE [25] fordert eine Pumpenauslegung mit maximal $1 W_{\text{elektrisch}}$ je $1 kW_{\text{thermisch}}$ elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe bezogen auf die Heizlast des Gebäudes (1 ‰-Regel) bzw. $1 W_{\text{elektrisch}}$ je Heizkörper. Die Werte sind aus Felduntersuchungen abgeleitet und dürfen für EFH auch leicht darüber liegen [25]. Dieser Forderung schließt sich die Fachwelt mit geringen Modifikationen an. JABLONOWSKI schlägt beispielsweise vor, eine Pumpen-

leistung von unter 2,5 W/Heizkörper im EFH anzustreben, im MFH bis etwa 70 kW Heizlast eine Leistung von unter 1 W/Heizkörper [87].

Tabelle 5-6 zeigt in Bestandsanlagen erforderliche und tatsächlich installierte Pumpenleistungen [200]. Die 1 ‰-Regel der erforderlichen Pumpenleistungen (linke Spalte) bestätigt sich für MFH, für EFH gilt etwa eine 2 ‰-Regel. Die Realität sieht anders aus: es sind deutlich größere Pumpenleistungen installiert. Wegen der in der Praxis typischen Wärmeerzeugerüberdimensionierung ist die benötigte Wärmeerzeugerleistung (mittlere Spalte) als Bezugsgröße geeigneter als die vorhandene Erzeugerleistung (rechte Spalte).

Gebäude	ausreichende Pumpenleistung [W] bezogen auf eine ausreichende Wärmeerzeugerleistung [kW]	vorhandene Pumpenleistung [W] bezogen auf eine ausreichende Wärmeerzeugerleistung [kW]	vorhandene Pumpenleistung [W] bezogen auf die vorhandene Wärmeerzeugerleistung [kW]
	(Anzahl der untersuchten Anlagen)		
EFH	2,3 ‰ (31)	7,5 ‰ (19)	3,8 ‰ (25)
MFH	0,8 ‰ (15)	1,6 ‰ (6)	1,3 ‰ (15)

Tabelle 5-6 Pumpenleistung bezogen auf die Wärmeerzeugerleistung

Es gibt nur sehr wenige Untersuchungen, die sich mit der Überdimensionierung von Pumpen befassen. Eine Schweizer Studie ermittelt Überdimensionierungen bei Pumpen um dem Faktor 3 [26]. Untersuchungen von BACH zeigen eine Überdimensionierung von 2,4 im MFH und 2,7 im EFH (jeweils die kleinste verfügbare Pumpe angenommen) [11]. Andere Quellen beziehen sich letztlich immer wieder auf diese beiden Untersuchungen.

Für die Angabe der Überdimensionierung muss eine notwendige, ausreichende Pumpenleistung definiert werden (vgl. Kapitel 5.1.4). Der Untersuchung von BACH [11] liegt beispielsweise die elektrische Leistung zugrunde, die sich bei einem mit fester Auslegungsspreizung bestimmten Volumenstrom und bei einem festen Druckverlust pro Meter Rohr ergibt. Ob die Gebäude mit dem definierten Temperaturniveau betrieben werden können und ob sich im untersuchten Bestand der angenommene *R*-Wert im Netz einstellt, wurde nicht angegeben.

Der Pumpenvolumenstrom und damit die erforderliche Pumpendruckhöhung sind stark an die sich einstellende Systemspreizung gekoppelt. Im Bestand, vor allem nach einer baulichen Sanierung, sowie in allen Gebäuden ohne Planung ist die Temperaturspreizung an den einzelnen Heizkörpern unterschiedlich und nicht (mehr) eindeutig definiert. Die Heizflächen-dimensionierung (bezogen auf die Heizlast) sowie die Vorlauftemperatur legen im Bestand Spreizung und Volumenstrom fest. Ohne Angabe dieser beiden Größen kann keine eindeutige Aussage über die Pumpenüberdimensionierung gemacht werden.

Folgende Vorgehensweise erlaubt die Angabe einer Pumpenüberdimensionierung: Die minimale hydraulische Leistung wird anhand der realen Anlagendaten bestimmt. Dies sind die reale Vorlauftemperatureinstellung und das vorhandene Verhältnis von installierten Heizflächen bezogen auf die gegebenen Raumheizlasten (Festlegung des Temperaturniveaus und der Spreizung) sowie das konkrete Rohrnetz (Festlegung der Förderhöhe). Gewählt wird anschließend jeweils

für das EFH die kleinstmögliche unregelte Pumpe und für das MFH die kleinste geregelte Pumpe (jedoch keine Hocheffizienzpumpen). Die in Tabelle 5-7 zusammengestellten Kennwerte ergeben sich nach diesem Vorgehen für etwa 40 untersuchte Objekte (Daten nach [200]).

Gebäude	Installierte Pumpenleistung bezogen auf A_{EB} in $[W/m^2]$	Pumpenüberdimensionierung, in [-]
	(Anzahl der ausgewerteten Gebäude)	
EFH	0,42 (27)	3,3 (19)
MFH	0,14 (14)	2,3 (6)

Tabelle 5-7 Installierte Pumpenleistung und Pumpenüberdimensionierung

Im EFH ergibt sich eine Überdimensionierung größer 3. Sie wäre noch größer, wenn für das EFH die kleinsten verfügbaren Pumpen als Referenzpumpen gewählt worden wären. Diese Pumpen mit etwa halb so großen elektrischen Leistungen sind erst seit kurzer Zeit am Markt verfügbar und wurden daher aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht gewählt. Für das MFH bestätigen sich die Werte von BACH [11].

Rückkopplung von Pumpen auf das Netz

Kann die Druckerhöhung der Pumpe nicht oder nur stufig geändert werden, wie bei vielen in Wärmeerzeugern integrierten Pumpen, muss dies bei der Rohrnetzplanung berücksichtigt werden. Das Netz, evtl. zusätzliche Drossel- und/oder Druckdifferenzregeleinrichtungen und die Thermostatventile müssen entsprechend bemessen werden. Ein zu hoher Pumpendruck verschlechtert die Regelbarkeit der Raumtemperatur [28], vergleiche auch Bild 5-10 auf Seite 86.

Die Pumpe wirkt sich mit ihren beiden Eigenschaften, dem geförderten Volumenstrom und der Druckförderhöhe (zusammen der hydraulischen Leistung), auf das nachgeschaltete Netz aus. Der geförderte Volumenstrom bestimmt das Leistungsabgabepotential der Heizflächen mit. Dabei hängt der Leistungsanstieg bei erhöhtem Volumenstrom bzw. der Leistungsabfall bei vermindertem Volumenstrom vom Wärmeübertragerkennwert der Heizfläche ab (vgl. Bild 5-7 auf Seite 79). Weil die Leistungsabgabe der Heizflächen unterproportional sinkt, ist die Auslegung auf verminderte Volumenströme möglich. Daher wird in der Fachliteratur empfohlen, die Pumpen im Zweifelsfall eine Leistungsstufe kleiner zu wählen [2] [22] [115] [177].

Der Pumpenbetrieb muss den Absenckphasen der Heizung angepasst werden. Laufen Pumpen während der Ansenckzeiten auf der höchsten Stufe, wie von BRANDT in der Praxis häufig festgestellt wird [53], können geplante Energieeinsparungen nicht erreicht werden. Die verminderte Vorlauftemperatur wird wegen der öffnenden THKV teilweise durch erhöhte Volumenströme kompensiert. Verstärkt wird der Effekt bei zu großen Pumpenvolumenströmen und im nicht abgeglichenen Netz. Regelpumpen erhöhen in dieser Situation sogar den Fördervolumenstrom, weil der Gegendruck im Netz wegen der öffnenden THKV sinkt. Einige Pumpenregelungen kompensieren dieses Verhalten durch gesteuerte Reduzierung der Drehzahl bei Absenkung der Vorlauftemperatur.

Leistungsaufnahme und Elektroenergieverbrauch von Pumpen

In der Literatur findet sich als anzustrebender Richtwert ein Verbrauch für Hilfsenergie unter 1 % der Jahresheizenergie [23]. In aktuellen Schweizer Veröffentlichungen wird der Anteil des Pumpenstroms im Haushalt auf ca. 10 % des Gesamtstromverbrauchs geschätzt [96].

Messungen des Hilfsenergieverbrauchs an 26 EFH und 13 MFH über den Zeitraum von Mitte November 2002 bis Ende April 2003 ergaben einen mittleren Elektroenergieverbrauch von 4 kWh/(m²·a) [200]. Zu beachten ist dabei, dass der Kennwert in vielen Objekten neben der Stromaufnahme der Pumpe auch die Stromaufnahme der Regelung und anderer, jedoch geringverbrauchender Komponenten der Anlagentechnik enthält. Der Pumpenenergieverbrauch macht den größten Anteil des Verbrauchs aus. Wird der Wert auf ein Jahr hochgerechnet, kann von etwa 7 kWh/(m²·a) ausgegangen werden. Dies entspricht bei durchschnittlichem Nutzerverhalten einem Anteil der Hilfsenergien von rund 25 % des Gesamtstromverbrauchs.

Bewertung von Pumpen in der Energiebilanz

Die Pumpenkennwerte (\dot{V} und Δp und damit die hydraulische Leistung), die für das nachgeschaltete Netz relevant sind, werden bei der Abschätzung eines Verschwendungspotentials berücksichtigt. Eine Bewertung des Hilfsstromverbrauchs für den Pumpenbetrieb steht nicht im Mittelpunkt der Untersuchungen. Es empfiehlt sich aber – vor allem bei Einsatz geregelter Pumpen – den Verbrauch im Rahmen einer QS zu messen, weil die mittlere Leistungsaufnahme der Pumpe über den Zeitraum eines Jahres nur näherungsweise abgeschätzt werden kann.

5.3.3. Zentrale Regelung

Die Aufgabe der zentralen Temperaturregelung ist, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass die dezentrale Regelung eine hohe Regelgenauigkeit erreichen kann [114]. Die Vorlauftemperaturregelung erfolgt beispielsweise als Mischerregelung mit einem zentralen Drei- oder Vierwegemischer (meist in Großanlagen), als Primärregelung über den Wärmeübertrager bei Fernwärmesystemen oder allein über die Kesselwasserregelung (Kleinanlagen) – vgl. Bild 5-4 auf Seite 71.

Die Vorlauftemperatur kann bei einer (stetigen) Mischerregelung sehr genau eingehalten werden. Mit der Kesselwasserregelung ist die Regelgenauigkeit vor allem bei Kesseln mit einstufigen Brennern ungenauer (wegen der Schaltdifferenz einer unstetigen Regelung) und Temperaturschwankungen können sich vor allem im Teillastbetrieb bis zum Heizkörper bemerkbar machen.

Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung und Heizkurvengleichung

Die wichtigste zentrale Reglereinstellung ist die Vorlauftemperatur, die nach der Außentemperatur und ohne Berücksichtigung von Fremdwärme bestimmt wird. Bei korrekter Heizlastberechnung, Heizflächenauslegung und Heizkurveneinstellung wird dem Raum mit dem Auslegungsmassenstrom immer gerade die Wärmemenge zugeführt, die zur stationären Deckung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste (Luftwechsel ganzjährig so wie in der Lastberechnung) notwendig ist. Ein Drosseln des Massenstroms muss bei Fremdwärmeanfall durch die Einzelraumregelung erfolgen.

Die zugehörige Heizkurvengleichung kann aus den drei Grundgleichungen für Heizkörper (Anhang, Seite 208) abgeleitet werden, wobei die exponentielle Darstellung zur Berücksichtigung des Heizkörperexponenten entsteht. Alternativ kann die Ableitung linear unter Verwendung der arithmetischen Übertemperatur erfolgen. Beide Heizkurvengleichungen finden sich im Anhang auf Seite 208. Die Anwendung der einen oder anderen Formel hängt vom verwendeten Regler ab. Die Abweichung der Vorlauftemperatur zwischen beiden Berechnungen ist in Bild A-4 (Anhang, Seite 211) dargestellt. Sie steigt mit steigendem Heizkörperexponenten. Für die QS ist dies insofern bedeutsam, als es in Netzen mit linear berechneter Vorlauftemperatur im Bereich um $\vartheta_a = 10\text{ °C}$ zu einer Unterversorgung der Heizkörper (korrekt ausgelegt und einreguliert) kommen kann. Falls die Heizkurve eines Reglers exponentiell berechnet wird, ist im Regler meist 1,3 als typischer Wert für den Heizkörperexponenten n hinterlegt [189]. Einzelne digitale Regler gestatten die Eingabe des Heizkörperexponenten.

Die alternativ bzw. ergänzend zur witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung von WOLFF [171] und anderen vorgeschlagene lastabhängig gefahrene Vorlauftemperaturregelung hat sich in der Praxis bisher nur im EFH bei Einsatz eines speziellen Kesseltemperaturreglers durchgesetzt.

Steilheit und Parallelverschiebung der Heizkurve

Die Steilheit der Heizkurve ist der Faktor, der zwischen der Vorlaufübertemperatur bezogen auf die Raumtemperatur und der Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und minimaler Außentemperatur steht. Regler sind meist auf eine Steilheit von 1,6 voreingestellt. Dies entspricht etwa 76 °C Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur $\vartheta_a = -15\text{ °C}$, siehe Bild 5-14.

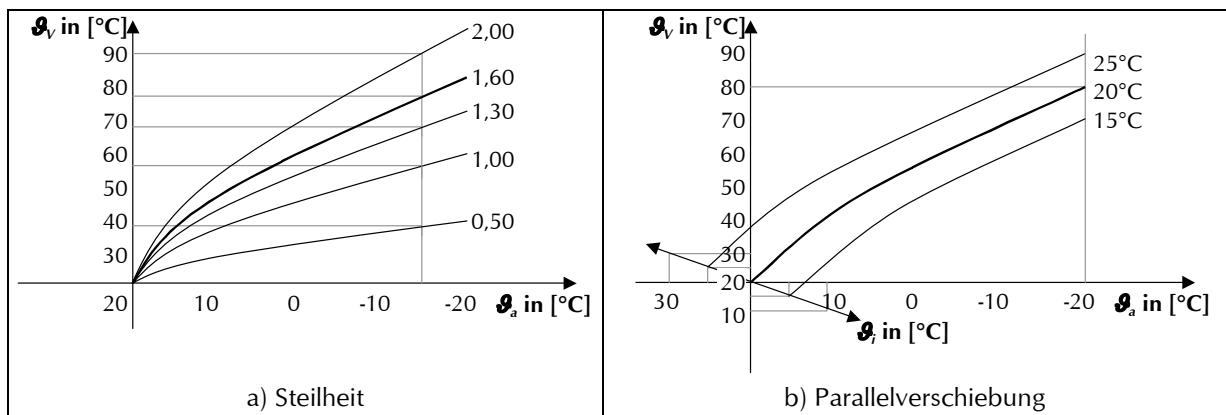


Bild 5-14 Steilheit und Parallelverschiebung der Heizkurve

Die Veränderung der Heizkurve ist in der Praxis oft mit dem nicht durchgeführten hydraulischen Abgleich verbunden. Um an den von der Pumpe entfernten Heizkörpern noch eine Wärmelieferung sicher zu stellen, ist die Vorlauftemperaturanhebung eine oft gewählte Gegenmaßnahme. Eine steilere Heizkurve führt jedoch über den gesamten Außentemperaturbereich zu einer prozentualen Leistungserhöhung (Verschwendungspotential). Ein weiterer Grund für eine sehr hoch eingestellte Heizkurve kann das Problem der fühlbaren Wärme in der Übergangsjahreszeit sein. Vor allem Nutzer im MFH neigen zu Beschwerden, wenn die Vorlauftemperatur am Heizkörpereintritt nahe der Heizgrenze (ca. 12 ... 15 °C Außentemperatur) unterhalb der Körperoberflächentemperatur liegt [89].

Die Parallelverschiebung bedeutet – im Gegensatz zur Steilheit – eine über das ganze Jahr mögliche Raumtemperaturanhebung. Daraus resultiert eine absolute Leistungsänderung. Sie wird beispielsweise durchgeführt, um das Temperaturniveau in allen Räumen gleichmäßig zu ändern oder um einen immer konstanten (im gesamten Gebäude vorhandenen) Anteil von Fremdwärme (durch Parallelverschiebung nach unten) zu berücksichtigen. Die Verschiebung erfolgt entlang der Innentemperaturlinie – vgl. Bild 5-14 b). Eine Parallelverschiebung nach oben merkt der Nutzer häufig wegen des Eingriffs von THKV i.A. nicht bzw. es kommt nicht zu Beschwerden. In Gebäuden mit zu hoch eingestellten Heizkurve ist das Verschwendungspotential sehr hoch, so dass die Einsparbemühungen Einzelner oft durch den Missbrauch anderer mehr als kompensiert werden [63].

Die Einstellung von Steilheit und Parallelverschiebung ermöglicht eine recht genaue Anpassung der Vorlauftemperatur an die Witterung und Nutzerprofile. Wird z.B. festgestellt, dass die Wärmezufuhr im Winter ausreicht, aber in der Übergangszeit zu niedrig ist, wird die Heizkurve parallel nach oben verschoben und gleichzeitig die Steigung vermindert.

Auswertungen von 45 bestehenden Anlagen ergaben die in Tabelle 5-8 zusammengestellten Reglerparameter [200]. Es zeigt sich, dass die Steilheit der Heizkurve im Mittel 1,6 beträgt und für die neueren Baujahre etwas geringer ist. EFH und MFH unterschieden sich hinsichtlich der Steigung kaum. Die Parallelverschiebung beträgt dagegen für MFH etwa 7 K, für EFH etwa 2 K. Die Abhängigkeit vom Baujahr ist hier geringer.

Gebäude (Anzahl)	Steilheit	Parallelverschiebung
alle EFH (25)	1,6	+ 2 K
alle MFH (18)	1,6	+ 7 K
Gebäude bis 1977 (26)	1,7	+ 4 K
Gebäude ab 1978 (19)	1,5	+ 5 K
alle Gebäude (45)	1,6	+ 4 K

Tabelle 5-8 Typische Reglereinstellung

Zentrale Absenkphasen

Zentrale Absenkphasen dienen der Energieeinsparung und werden durch Abschaltung der Anlage (Totalabschaltung oder Stützbetrieb, d.h. Aufrechterhaltung einer Mindesttemperatur) oder durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur ermöglicht. Der Abschaltbetrieb kann ggf. im EFH realisiert werden, im MFH wird die zeitweise eingeschränkte Beheizung (ZEB) durch Absenken der Vorlauftemperatur erreicht. Es sind jedoch wegen der unterschiedlichen Nutzeranforderungen nur kurze Heizpausen möglich (WOLFF in [171]).

Die notwendige Vorlauftemperaturabsenkung während des Absenkbetriebes hängt von der Steilheit der Heizkurve $m_{\text{Heizkurve}}$ und der theoretischen Raumtemperatur im Absenkbetrieb (typisch ist $\vartheta_{i,\text{Absenk}} = 12 \dots 15 \text{ °C}$) ab, siehe Gleichung (5-7). Somit stimmt die Aussage von LOOSE und KRAINER, die Vorlauftemperatursenkung sollte bei der Nachtabsenkung etwa doppelt so hoch sein wie die gewünschte Raumtemperaturabsenkung [105], für Niedertemperaturheizungen.

$$\Delta \vartheta_V \approx (1 + m_{\text{Heizkurve}}) \cdot (\vartheta_{i,\text{Normal}} - \vartheta_{i,\text{Absenk}}) \quad (5-7)$$

Da dem Gebäude auch während der Nachtabsenkung Energie zugeführt wird, wird die gewünschte niedrigere Raumtemperatur nie bzw. erst nach unendlich langer Zeit erreicht [3]. Die Auskühlung ist von der Gebäudekonstante abhängig. Je größer die thermische Trägheit, desto geringer wird der Einfluss von ZEB. Das Regelverhalten einer Anlage im Absenkbetrieb beschreibt SCHROWANG [139] als "Kollektivregelung". Weil die Absenkung allein über die Vorlauf-temperaturminderung funktioniert, müssen Heizflächendimensionierung und Druckverlustberechnung (incl. THKV-Auslegung) sorgfältig sein, damit es nicht zu einer starken Ungleichverteilung der Leistung kommt [139]. Bei nicht erfolgtem hydraulischen Abgleich sind die Räume sehr unterschiedlich von der Nachtabsenkung betroffen.

Es kann ggf. in Anlagen ohne QS der Anlagentechnik keine Energie durch Nachtabsenkung eingespart werden, wenn die Heizkurve bereits im Normalbetrieb so hoch liegt, dass sie nach der Parallelverschiebung gerade stimmt. SCHRODE sieht den überwiegenden Teil der im Wohnungsbau eingestellten Nachtabsenkungen aus diesem Grunde als wirkungslos an [137].

In thermostatisch geregelten Räumen kann eine Temperaturabsenkung nur erreicht werden, wenn der Durchfluss begrenzt ist (THKV ohne Sollwertverstellung vorausgesetzt). Ist dies nicht der Fall, öffnen die Thermostatventile weiter als bei Normalbetrieb und erreichen so höhere als die erwünschten Raumtemperaturen. Diesem Verhalten der THKV begegnet das SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR ENERGIE mit der folgenden Empfehlung: bei Anlagen mit THKV muss für eine sinnvolle Nachtabsenkung die Vorlauf-temperatur etwa um 15 ... 20 K reduziert werden, in anderen Anlagen reichen 8 ... 10 K [24]. Es kommt trotzdem zu einem Anstieg des Massenstroms und der elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe.

Hinsichtlich des Vorgehens bei der Wiederaufheizung nach Nachtabsenkungen führen Diskussionen in der Fachliteratur zu zwei Tendenzen: einerseits wird vorgeschlagen, einen eingeschränkten Heizbetrieb bei extremen Außentemperaturen nicht zuzulassen [57] [191]. Für Fernwärmanlagen schließt sich dies ggf. sowieso aus, wenn keine Aufheizreserven vorhanden sind [131]. Andererseits gibt es den Trend, diesem Problem mit Überdimensionierung von Heizflächen und Wärmeerzeuger zu begegnen. Zur Vermeidung zu langer Aufheizzeiten sollte in jedem Fall die Heizunterbrechung im leichten Gebäude kürzer als im schweren Gebäude sein. KREMONKE schlägt maximal 5 h für leichte und 10 h für schwere Gebäude vor [127]. VORLÄNDER ET AL empfehlen ein Aufheizen bei geschlossenen Fenstern und abgeschalteter (abgesenkter) Lüftungsanlage vor, um natürliche Reserven zu nutzen [191].

Heizgrenztemperatur

Die am zentralen Regler eingestellte Heizgrenze bestimmt die Dauer der Wärmeverhaltung in Übergangszeiten. Eine sehr hoch oder gar nicht eingestellte Heizgrenze bedeutet nicht zwangsläufig auch eine Wärmeabforderung durch die Nutzer. Sie kann jedoch zu einer künstlichen Verlängerung der Heizzeit durch den Nutzer führen, wenn er das Leistungspotential nutzt. Selbst ohne Nutzung des Wärmeangebotes werden Wärmeerzeuger und ggf. Heizungsspeicher auf Temperatur gehalten. Dies gilt vor allem beim Einsatz von Überströmeinrichtungen oder

Dreiwege-Thermostatventilen (bzw. einfach Kurzschlussstrecken), die beim Einsatz zwangsdurchströmter Wandgeräte von vielen Kesselherstellern gefordert oder empfohlen werden.

Einen besonderen Fall stellen Anlagen im MFH dar. Hier ist nur ein Nutzer mit einer Heizwärmeanforderung notwendig, um die zentralen Verteilleitungen (üblicherweise im Keller) und Steigestränge durch das gesamte Gebäude auf Temperatur zu halten. Leitungen, die durch Wohnungen ohne Heizlast laufen, bewirken einen Zwangswärmekonsum. Der Effekt verstärkt sich bei großen räumlichen Ausdehnungen. Hier ist zu erwarten, dass die Bewohner in den oberen Eckwohnungen eines Gebäudes bzw. in Wohnungen mit vielen Außenflächen potentiell das Ende der Heizzeit bestimmen. Für alle anderen Wohnungen bedeutet das eine zwangsweise Verlängerung der Heizzeit (am Regler eingestellt) und ggf. eine Zwangswärmeversorgung.

Stichproben von Reglereinstellungen ergaben für Niedrigenergiemehrfamilienhäuser eine Heizgrenztemperatur 20 ... 25 °C [202] [200]. Die Werte für EFH liegen etwa bei 17 °C, wobei hier nur in wenigen Fällen eine Einstellmöglichkeit am Regler vorhanden war [200].

Rückkopplung zwischen räumlicher Teilbeheizung und Dämmstandard des Gebäudes

Mit steigendem Dämmstandard der Gebäude steigt auch die thermische Kopplung der Räume untereinander. Der Wärmefluss durch die Innenwände nimmt anteilmäßig zu. Die räumliche Teilbeheizung macht sich kaum als Energieeinsparung bemerkbar, weil die Wärmeversorgung des betroffenen Raumes durch die Innenflächen und durch geöffnete Wohnraumtüren erfolgt.

Rückkopplung der zentralen Vorregelung auf die Raumtemperaturregelung

Eine erhöhte Vorlauftemperatur bietet Leistungssteigerungen der Raumheizflächen. Bei den heute üblichen Auslegungsvorlauftemperaturen bis ca. 70 °C kann durch Vorlauftemperaturanhebung eine Leistungssteigerung bis maximal 50 % auch bei korrekt eingestellten Massenströmen erreicht werden. Damit ist die Vorlauftemperaturanhebung ein sinnvolles Mittel zur Schnellaufheizung [63] [191], vorausgesetzt der Wärmeerzeuger hat genügend Kapazität.

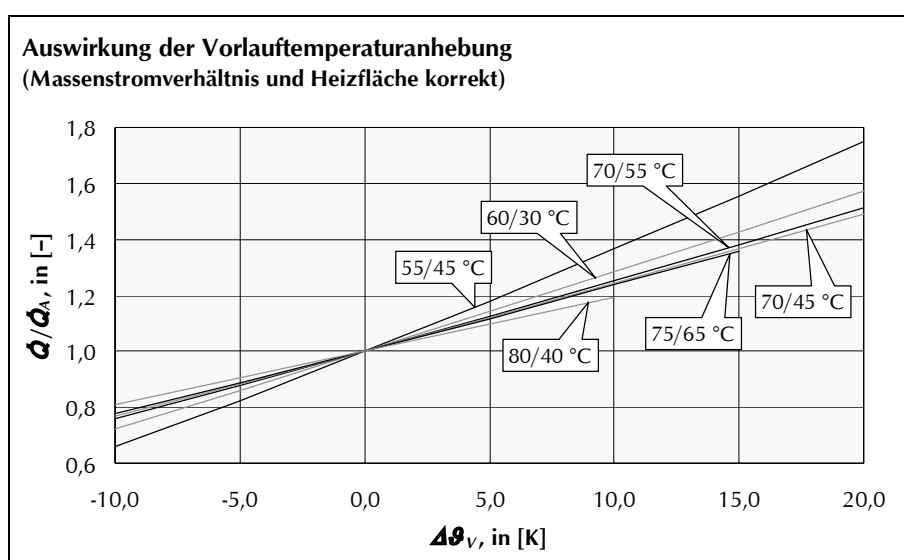


Bild 5-15 Leistungssteigerung durch Vorlauftemperaturanhebung

Bild 5-15 zeigt die Leistungssteigerung durch Vorlauftemperaturenanhebung für einige typische Auslegungstemperaturspreizungen, in gleichem Maße jedoch auch das mögliche Verschwendungspotential. Die mögliche Leistungssteigerung ist am größten bei Netzen mit geringen Auslegungsvorlauftemperaturen und -spreizungen. Die Einstellung der Vorlauftemperatur wirkt sich auf die Regelgüte des THKV aus. Soll keine Leistungssteigerung nach Bild 5-15 erreicht werden, müssen die THKV drosseln. Der Arbeitsbereich des THKV und damit seine Regelgüte werden dadurch bereits unter Auslegungsbedingungen stark eingeschränkt. Positiv ist in diesem Fall eine Abkühlung des Heizwassers unter die geplante Rücklauftemperatur. Dies tritt aber nur ein, wenn keine Leistungssteigerung (Verschwendung) erfolgt.

Resultierende Rücklauftemperatur im Netz

Die Rücklauftemperatur im Netz richtet sich nach der Vorlauftemperatur, der Heizflächenüberdimensionierung und der realen Wärmeabnahme der Verbraucher. Sie kann nach den im Anhang auf Seite 209 angegebenen Verfahren und den Gleichungen (A-0-9) bis (A-0-11) bestimmt werden. Für das reale Objekt sind Verbrauchsdaten, die Auslegungsraumheizlast sowie die Heizflächenüberdimensionierung $\alpha_{0,75,65}$ (Leistungsverhältnis der installierten Heizkörperleistung bei Normbetrieb mit 75/65/20 °C nach EN 442 bezogen auf die Auslegungsraumheizlast bei minimaler Außentemperatur) als Eingangsgrößen notwendig.

Ein Anwendungsbeispiel ist im Anhang auf Seite 210 zu finden. Für ein EFH mit großzügig dimensionierten Heizflächen ergibt sich nach dem dort gezeigten Beispiel eine Rücklauftemperatur von etwa 28 °C bei einer Vorlauftemperatur von 63 °C. Die geringe Rücklauftemperatur kann durch den hohen Anteil auszuregelnder Fremdwärme erklärt werden.

Adaptive Regelung, Referenzraumregelung und weitere Regelfunktionen

Sonderausführungen zentraler Regelung sind Sonnen- und Windaufschaltungen und u.U. auch heute noch die Einstellung der Heizgrenztemperatur. Weiterhin kann zusätzlich zur Vorlauf-temperaturregelung eine Raumtemperaturregelung nach einem Referenzraum erfolgen (Raumtemperaturaufschaltung). Die genannten Funktionen erfordern zusätzliche Messstellen bzw. eine Kommunikation zwischen zentraler und dezentraler Regelung. Selbstlernende, d.h. adaptive Regler, bzw. FUZZY-Regler erkennen aufgrund des Lastverlaufes die real benötigte Heizkurve und fahren die Heizleistung entsprechend nach. Dies führt zu einem insgesamt verringerten Wärmeangebot in den Räumen [3]. Da die beschriebenen Regelfunktionen in der Praxis (noch) keine große Verbreitung gegenüber der konventionellen witterungsgeführten Vorlauf-temperaturregelung mit THKV gefunden haben, sollen sie hier nicht vertieft werden.

Die zentrale Regelung kann auch mit einer Minimal- und/oder Maximalbegrenzung der Vorlauf-temperatur ausgestattet sein. Eine Minimalbegrenzung ist sinnvoll, um das beschriebene Problem der fühlbaren Wärme bei Heizgrenztemperatur zu beseitigen. Sie führt jedoch zu einem höheren Verschwendungspotential in den Übergangsjahreszeiten.

Bewertung in der Energiebilanz

Die Bewertung zentraler Regelfunktionen erfolgt in der Energiebilanz über die System-temperaturen (Vor- und resultierende Rücklauftemperatur) und die Betriebszeit der Anlage. Für

die zentral angeordneten Komponenten (Kessel, Kellerverteilung) wird die am Regler eingestellte Heizgrenze und die daraus resultierende Betriebszeit zur Bestimmung der Verluste angesetzt. Die Einstellungen der Vorlauftemperaturregelung (Steilheit, Parallelverschiebung) werden bei der Bestimmung der maximal im Raum zu Verfügung stehenden Leistung berücksichtigt.

5.4. Verteilnetz und Wärmeerzeugung

Als letzter Themenblock der Heizungstechnik werden die Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung – aus thermischer Sicht – besprochen. Der Schwerpunkt liegt bei Zweirohranlagen mit Kesseln; jedoch werden auch Wärmeübergabestationen fernwärmeversorgter Gebäude behandelt.

5.4.1. Verteilnetz

Die Wärmeverluste des Wärmeverteilnetzes sind ein Hauptanwendungsfeld für die QS. Sie werden bestimmt durch die Länge, Lage, Dämmung sowie die Betriebstemperaturen und -zeiten der verlegten Rohrleitungen. Man unterscheidet diverse Verteilnetztypen: Einrohrheizungen mit senkrechter oder waagerechter Verteilung im Zwangsdurchlauf oder im Nebenschluss, Zweirohrheizungen konventionell oder im Tichelmannprinzip ausgeführt, mit oberer oder unterer Verteilung, mit strangweisem, ringförmigem oder sternförmigem Anschluss. Die Untersuchung den Bestandsanlagen zeigt, dass im Wohnbau etwa 90 % der heute vorhandenen Anlagen als Zweirohrheizungen ausgeführt sind, davon wiederum 90 % mit unterer Verteilung [140]. Dieser Verteilnetztyp wird daher vertieft behandelt.

Die Einrohrheizung, die von RAIB als Sonderausführung der Pumpenwarmwasserheizung bezeichnet wird [128], soll nur qualitativ behandelt werden. Generell geben Einrohrnetze oft ein Vielfaches der Wärme von Zweirohrnetzen ab, weil eine größere Anzahl von Leitungen ständig durchströmt ist, Regeleinriffe der THKV den Gesamtdurchfluss nur in geringem Maß vermindern und das System insgesamt auf einem höheren Temperaturniveau betrieben wird.

Leitungslängen und Lage der Leitungen

Die Auswertung von konkreten Objekten und die Untersuchung von Literaturquellen zeigt die in Tabelle 5-9 zusammengestellten typisch verlegten Leitungslängen für Heizleitungen in Zweirohrheizungen. Bezugsfläche ist i.d.R. die beheizte Wohnfläche.

Verlegte Leitungslängen im beheizten Bereich:	... im unbeheizten Bereich:
0,625 m/m ² unabhängig vom Netztyp [80]	0,1 m/m ² [85] [205]
0,2 ... 0,7 m/m ² [85]	0,2 ... 0,3 m/m ² [140]
0,5 ... 0,6 m/m ² [205]	
0,5 ... 0,7 m/m ² [140]	

Tabelle 5-9 Innerhalb und außerhalb des beheizten Bereichs verlegte Rohrleitungen

Die Menge der verlegten Rohrleitungslängen ist mit hinreichender Genauigkeit unabhängig von der Altersklasse des Gebäudes [140]. Ein typischer Mittelwert für die verlegte Leitungslänge ist 0,7 m/m² beheizter Fläche; bei strangweiser Anbindung können sehr viel geringere Werte

erreicht werden. Der Anteil der verlegten Leitungslängen im beheizten Bereich des Gebäudes schwankt mit dem Verteilnetztyp. Sofern eine zentrale Kellerverteilung (oder Verteilung im unbeheizten Dach) vorhanden ist, können etwa 1/4 bis 1/3 aller Heizverteilungen als im unbeheizten Bereich verlegt angenommen werden. Weitere Ergebnisse aktueller Untersuchungen zeigt Tabelle 5-10.

Durchmesser und Dämmstandard

Da auch die Rohrdurchmesser von Netzen seit dem Aufkommen der Pumpenwarmwasserheizung in erster Näherung gleich geblieben sind [140] [191], ergeben sich bei heute geringeren Massenströmen größere Totzeiten und somit längere Aufheizzeiten als früher. Die hydraulische Beurteilung verschiedener Netze wird dadurch jedoch vereinfacht (vgl. Kapitel 5.3.1).

Längenbezogene Wärmeverluste für Rohrleitungen können der Literatur entnommen werden (z.B. [79], siehe auch Bild A-1 auf Seite 210 im Anhang). Typische Dämmstandards für Leitungen, die außerhalb des beheizten Bereiches verlegt sind, sind in Tabelle 5-10 dokumentiert. Sie basieren auf der Auswertung von 64 realen Objekten [200]. Es zeigt sich, dass in Gebäuden, die nach 1977 erbaut sind, grundsätzlich eine Dämmung (zumindest der geraden Rohrstrecken) vorhanden ist. In vielen älteren EFH fehlte eine Leitungsdämmung der Kellerverteilung vollständig.

Gebäude	Anteil der Gebäude mit ...			verlegte Leitungslängen im unbeheizten Bereich, in [m/m ²]
	... 100 % und mehr	... ca. 50 %	... 0 %	
	Dämmstärke nach geltender Verordnung (EnEV)			
alle EFH	0,6	0,2	0,2	ca. 0,11
alle MFH	0,5	0,5	0,0	
Gebäude bis 1977	0,5	0,4	0,1	
Gebäude ab 1978	0,8	0,2	0,0	
alle Gebäude	0,6	0,3	0,1	

Tabelle 5-10 Leitungslänge und Dämmstandard im unbeheizten Bereich

Der Dämmstandard der Rohrleitungen im beheizten Bereich kann häufig nicht mehr nachvollzogen werden, wenn die Leitungen nicht frei verlegt sind. Bei Anlagen, die vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung gebaut worden sind, ist mit sehr geringen Dämmdicken von 0 ... 50 % der heute geforderten gesetzlichen Mindestdämmung zu rechnen. Im Neubau sind Werte von 50 ... 75 % Dämmung realistisch. Bekräftigt wird dies durch die verminderten Dämmforderungen für Rohrleitungen im beheizten Bereich, z.B. nach EnEV im Fußbodenaufbau 6 mm [55]. In beiden Fällen ist davon auszugehen, dass bei innerhalb von Bauteilen verlegten Rohrleitungen auch das umgebende Material dämmend wirkt, wenn auch in geringerem Maß.

Rückkopplung des Verteilnetzes auf die Regelung und Heizkostenerfassung

Die Wärmeabgabe von Verteilleitungen wird innerhalb des beheizten Bereichs als Fremdwärme oder direkt als nutzbare Heizwärme zur Deckung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten wirksam. Letzteres ist nur der Fall, wenn der Wärmeverlust innerhalb eines Raumes von dessen Regeleinrichtung beeinflusst werden kann. Dies trifft auf einen Teil der Wärmeabgabe der Heizkörperanbindeleitungen zu (der Teil, der innerhalb des betreffenden Raumes wirksam wird).

Wärmeverluste, die nicht regelbar sind, können zu einem Zwangswärmekonsum führen, wenn sie mengenmäßig die Wärmeverluste des Raumes übersteigen, d.h. wenn keine oder eine geringere Heizlast besteht. Besonders ausgeprägt ist dieses Problem in der Übergangszeit bei Einrohrheizungen mit un- oder wenig gedämmten Verteilleitungen. KNABE stellt bei Zweirohrheizungen etwa 50 % der Wärmeabgabe, bei Einrohrheizungen in Plattenbauten etwa 70 % des Jahresheizwärmeeintrages über die Rohre fest. Dies führt insgesamt zu 10 % Mehrverbrauch [173]. Eine weitere Auswirkung der unregelmäßigen Wärmegabe innerhalb des Heizsystems, z. B. durch ungedämmt durchlaufende Rohre, besteht in der Verminderung der Regelfähigkeit der Thermostatventile. Die Eingrenzung des Regelbereichs und damit Neigung zur Schwingung der Raumtemperatur ist besonders kritisch bei stark schwankenden Raumtemperaturen [114].

ZÖLLNER und GEISENHEIMER [209] sehen die Rohrwärmeabgabe aus Sicht der Heizkostenerfassung als kritisch an. Sie fordern, dass die Rohrwärmeabgabe nur als Grundheizung wirkt. Sie sollte daher maximal 35 % der Auslegungsleistung betragen, d.h. maximal 50 % der Jahresenergiemenge decken [209].

Temperaturverlust pro Meter

Bei langen wenig oder gar nicht wärmegeprägten Zuleitungen reduziert sich die Vorlauftemperatur bis zum Heizkörper, was eine verminderte Leistung zur Folge haben kann. Kritisch ist die verminderte Vorlauftemperatur, wenn dadurch einzelne Heizkörper die Raumheizlast nicht mehr decken können und eine Anhebung der Heizkurve für das gesamte Netz erforderlich machen.

Hinweise für die QS

Dämmung – auch von Armaturen etc. – führt oft zu größeren Energieeinsparungen als eine Optimierung des Kessels [137]. Bei Einrohrheizungen kann die Empfehlung ausgesprochen werden, im Zuge einer Sanierung Rohrnetz und Heizkörper komplett zu erneuern [137]. Dies gilt im sehr gut gedämmten Gebäude auch für ungedämmte Zweirohrheizungen. Bei Neu- und Umplanungen sollte der Wasserinhalt des Rohrnetzes maximal 20 ... 30 % der stündlich umgewälzten Wassermenge betragen, damit das Aufheizen nicht zu lange dauert [138]. Selbst dann ergeben sich Totzeiten bis zu etwa 15 Minuten.

Bewertung in der Energiebilanz

Die Kennwerte zur Bestimmung von Wärmeverlusten können dem realen Objekt entnommen werden. Die in diesem Kapitel angegebenen Werte sind als Standardwerte zu verstehen. Die Bestimmung der Wärmeverluste erfolgt analog Gleichung (5-9) auf Seite 119. Die maßgebliche Systemtemperatur (Vor- und Rücklauftemperatur) wird in Kapitel 5.3.3 näher definiert.

5.4.2. Kessel und Thermen

Wichtigster Wärmeerzeuger im Neubau und der Modernisierung ist der Kessel. Dabei gibt es eine große Streubreite hinsichtlich der Kesselkonstruktion, der Speichermasse, des Wasserinhaltes und der Brennerausführung (vgl. auch ANDREAS in [171]). Die Einflussparameter hinsichtlich der Bewertung der QS von Kesseln sind vielfältig. Die vorliegende Arbeit befasst sich vertieft mit Brennwert- und Niedertemperaturtechnik. Konstanttemperaturkessel in ihren diversen Ausführungsvarianten sollen hier nicht detailliert besprochen werden, weil sie nicht mehr dem Stand

der Technik entsprechen und auch im Bestand mittlerweile weitgehend durch moderne Kessel ersetzt sind. Sollte die Bewertung von Konstanttemperaturkesseln im Bestand dennoch notwendig sein, können dem Energiepass Heizung und Warmwasser [103] oder anderen Veröffentlichungen entsprechende Energiekennwerte entnommen werden.

Grundsätzlich sollen die Kessel in bodenstehende und wandhängende Geräte unterschieden werden. Letztere werden häufig Thermen, neuerdings auch Wandkessel genannt. Eine nähere Definition folgt.

Bei Brennwertkesseln, deren Brennstoff/Luftverhältnis richtig eingestellt ist, kann bei Erdgasbetrieb mit einer Kondensation des Wasserdampfes im Abgas ab etwa 55 °C gerechnet werden. Bei Betrieb mit Heizöl liegt der Abgastaupunkt bei etwa 45 ... 50 °C. Die Rücklauftemperatur des Netzes muss entsprechend unter diesen Werten liegen.

Leistungsbemessung und Auslastung

Der Autor eines Schweizer Fachbuches stellt fest, "ein Wärmeerzeuger, der nicht einmal im Jahr zu knapp ist, ist zu groß bemessen" [135]. Für die Kesseldimensionierung gelten die Regeln der Technik. Trotzdem ist in der Praxis sowohl im Neubau als auch im Bestand eine deutliche Überdimensionierung von Wärmeerzeugern im Heizbetrieb festzustellen. Dies kann folgende Ursachen haben:

- Austausch des Kessels und Beibehaltung der vorher vorhandenen Leistung, ohne die Heizlast erneut zu bestimmen. In der alten Anlage war neben der Heizlast des Gebäudes oft eine Leistungsreserve für das Trockenheizen von etwa 20 % enthalten [38].
- Gänzlich fehlende Berechnungen bzw. Schätzung der Kesselleistung, vor allem nach Modernisierungen. Als Standardwerte werden dabei z.B. 70 ... 100 W/m² (bzw. vorher 100 ... 130 W/m²) nach alter Heizanlagenverordnung empfohlen [83].
- Wahl des Kessels nach der Leistungsanforderung der Trinkwarmwasserbereitung, vor allem in kleinen und neuen Gebäuden [135].
- Abweichungen der maximalen Gebäudeheizlast zwischen Theorie und Praxis. Die Abweichung beträgt nach Untersuchungen von IHLE etwa $\pm 10 \dots 15 \%$ bei der Bewertung der Gebäude nach DIN 4701-1 (1983) [84]. LEUSCHNER und andere stellen für verschiedene MFH auch bei Normaußenbedingungen nur 70 % der berechneten Normheizlast in der Praxis fest [179].

Die resultierende Überdimensionierung wird in der Literatur mit einer großen Spannbreite angegeben – Bezug ist i.d.R. der theoretische Wert der Heizlastberechnung nach DIN 4701. BURKHARD und KRAUS [28] halten Überdimensionierungen von 2 ... 5 für realistisch, SCHNEIDER [136] gibt den Faktor 1,5 ... 2 an. BRENNER [21] leitet Anfang der 1980er Jahre für das EFH eine Überdimensionierung von etwa 2 ... 3 ab und LÖTZERICH [183] stellt bei der Untersuchung von 51 Bestandsgebäuden eine Überdimensionierung von 1,3 ... 3,6 bei einem Mittel von 1,8 fest.

Hinsichtlich geplanter Überdimensionierung gibt es kontroverse Empfehlungen. Teilweise werden zur groß dimensionierte Kessel als nicht nachteilig angesehen, weil die Kessel geringe Bereitschaftsverluste aufweisen und der Nutzungsgrad im Teillastbetrieb sogar steigt [3] [28] [83] [173]. Untersuchungen im Feld führten jedoch andererseits zur Empfehlung, auf eine Überdimensionierung zu verzichten [94]. Wichtig für die Aussage ist die Art des Kessels: eine Überdimensionierung ist bei Kesseln mit Zwangsdurchlauf (meist wandhängende Geräte) kritisch, bei Kesseln mit Naturumlauf aus Sicht der Verminderung der Kesselverluste vertretbar.

Eigene Untersuchungen an über 60 Gebäuden zeigen installierte Wärmeerzeugerleistungen bezogen auf die beheizte Fläche sowie Überdimensionierungen nach Tabelle 5-11 [200]. Es ist festzustellen, dass die mittlere Wärmeerzeugerüberdimensionierung in Gebäuden neueren Baujahrs zunimmt (siehe auch Bild A-3 auf Seite 211 im Anhang) und insgesamt nur ein geringer Unterschied zwischen EFH und MFH besteht.

Gebäude	Merkmal	Installierte Leistung, in [W/m ²]	Überdimensionierung, in [-]
EFH (40)	Baujahr bis 1977	134	1,8
	Baujahr ab 1978	107	2,0
	Gas/Ölkessel	128	k. A.
	Fernwärme	89	k. A.
	alle	118	1,9
MFH (24)	Baujahr bis 1977	114	1,6
	Baujahr ab 1978	109	2,2
	Gas/Ölkessel	119	k. A.
	Fernwärme	103	k. A.
	alle	112	1,8

Tabelle 5-11 Überdimensionierung von Wärmeerzeugern

Die Kesselauslastung hängt von der Dimensionierung und der Nutzenentnahme ab. Tendenziell sinkt im gut gedämmten Gebäude die Auslastung, weil der Anteil der Fremdwärme steigt. Es gilt der Zusammenhang nach Gleichung (5-8) für die Auslastung φ im Messzeitraum t_{mess} .

$$\varphi = \frac{Q_{ab,mess}}{\dot{Q}_{N,ist} \cdot t_{mess}} \approx \frac{Q_{T+V,ist} - Q_{I+S,ist}}{\frac{\dot{Q}_{N,ist}}{\dot{Q}_{Gebäude,A}} \cdot \dot{Q}_{Gebäude,A} \cdot t_{mess}} + \frac{Q_d}{\dot{Q}_{N,ist} \cdot t_{mess}} \quad (5-8)$$

Die Auslastung sinkt mit steigendem Anteil der Fremdwärme $Q_{I+S,ist}$ bezogen auf die realen Verluste im Messzeitraum $Q_{T+V,ist}$. Weiterhin spielt die Überdimensionierung des Kessels bezogen auf eine normierte Heizlast $\dot{Q}_{N,ist} / \dot{Q}_{Gebäude,A}$ eine Rolle. Die Wärmeabgabe des Kessels umfasst zusätzlich die zu deckenden Verteilverluste Q_d . In der Literatur wird die durchschnittliche Auslastung für korrekt dimensionierte Kessel mit etwa 25 ... 30 % angegeben [65] [136] [192]. Eigene Untersuchungen kommen zu Auslastungen (bezogen auf die eingestellte Kesselnennleistung) im EFH von unter 10 % [204].

Verlustkennwerte

Die wichtigsten Verlustkennwerte von Heizkesseln sind Abgas- und Abstrahlungsverluste sowie Verluste der inneren Auskühlung. Die Kennwerte können zu Verlusten während des Betriebs (Abgas- und Abstrahlungsverluste) und Betriebsbereitschaftsverlusten (Auskühlung und Abstrahlungsverluste) zusammengefasst werden. Es gibt verschiedene Darstellungsformen für die Verlustkennwerte, gebräuchlich sind der Nutzungsgrad η und die Aufwandszahl e beide aufgetragen über der Kesselauslastung φ – siehe Bild 5-16 a und b. Beide Kennwerte sind bezogene Größen, d.h. sie geben keine Auskunft über die absolute Höhe der Verluste, aus diesem Grund werden sie in der Fachpresse teilweise in Frage gestellt, z.B. von BÖHM [19].

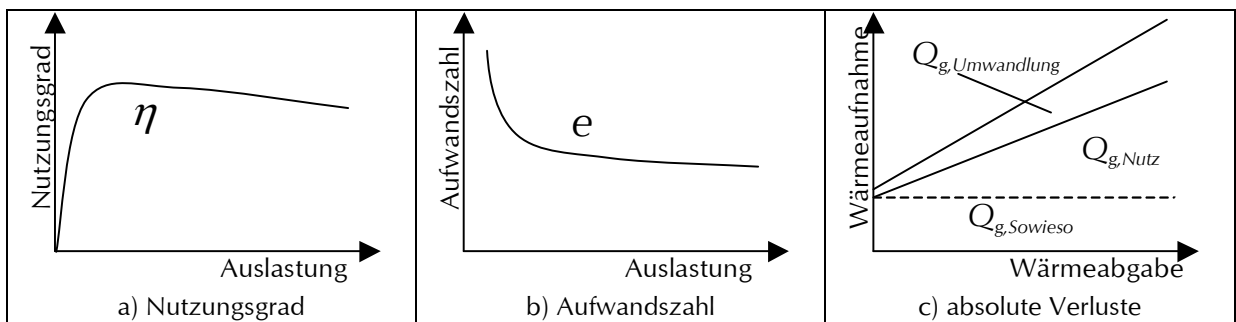


Bild 5-16 Kennwerte für Wärmeerzeuger

Alternativ können zwei absolute Kennwerte verwendet werden, siehe Bild 5-16 c. Zum einen ist dies der von der Wärmeabgabe relativ unabhängige Kennwert für die sowieso vorhandenen Bereitschaftswärme- und Abstrahlungsverluste $Q_{g,Sowieso}$. Vereinfacht wird hier angenommen, dass die zugehörige Verlustleistung unabhängig vom Betriebszustand (Brenner ein oder aus) etwa konstant ist. Der zweite Wert, $Q_{g,Umwandlung}$ beschreibt die Verluste bei der Energieumwandlung, d.h. er entspricht mittleren Abgasverlusten. Weitere Ausführungen und ähnliche Ableitungen finden sich in [35] und [205].

Die verschiedenen Kenngrößen (η , e , Q_g) können ineinander umgerechnet werden und sind aus Praxismessungen (oder ggf. Prüfstandsmessungen) reproduzierbar. Benötigt werden der Strahlungsverlust q_s , der Bereitschaftsverlust q_B und der Abgasverlust q_A , die jeweils auf die eingestellte Feuerungsleistung bezogen werden.

REIß gibt als realistische Nutzungsgrade für Brennwertkessel im Winter etwa 90 % und im Sommer 87 % an [53]. Veröffentlichungen des Landes Baden-Württemberg halten Jahresnutzungsgrade von 88 ... 90 % bei Brennwertkesseln für realistisch [198]. Der Quervergleich ähnlicher Gebäude, von denen ein Teil mit Fernwärme, der andere Teil mit Kesseln ausgestattet ist, ergibt gemessene Verbrauchsunterschiede, die auf einen mittleren Nutzungsgrad von 70 ... 82 % (H_U) für die Gebäude mit Kessel (200 ... über 3000 m² Fläche) schließen lassen [16].

Untersuchungen im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit kommt zu den in Tabelle 5-12 zusammengestellten Ergebnissen. Dabei wurden 67 EFH über zwei Jahre monatlich untersucht [204]. Es zeigt sich weiterhin, dass Brennwertkesselanlagen mit Aufstellung im beheizten Bereich

einen höheren Nutzungsgrad haben (89 %_{Ho}) als Anlagen im unbeheizten Bereich (85 %_{Ho}). Brennwertkesselanlagen ohne Überströmventil weisen einen Jahresnutzungsgrad von 88 %_{Ho}, Anlagen mit Überströmventil von 85 %_{Ho} bezogen auf den Brennwert H_O auf [204].

	BW-Kessel (60 Anlagen)	NT-Kessel (7 Anlagen)
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf H_U), in [%]	96	83
durchschnittlicher jährlicher Umwandlungswirkungsgrad $\eta_k(H_O)$, in [-]	0,90	--
durchschnittliche jährliche Bereitschaftsverluste q_{Br} , in [-]	0,47	--
mittlerer jährlicher Stromverbrauch der Heizungsanlagen, in [kWh/(m ² ·a)]	2,9	1,6

Tabelle 5-12 Kesselmerkmale

Taktraten, Mindestvolumenstrom und Überströmventil

Die Taktrate eines Kessels hängt hauptsächlich von seinen Massespeichern und vom umgewälzten Massenstrom ab [171]. Über die Empfehlungen einer Kesselüberdimensionierung besteht in Hinblick auf die Taktrate in Fachkreisen keine Einigkeit. BRANDT vertritt die Meinung, eine Überdimensionierung sollte vermieden werden, damit der bei neuen Kesseln vorhandene große Modulationsbereich nicht noch durch Takten unterboten werden muss [53]. Demgegenüber steht die Aussage, dass überdimensionierte Kessel mit großem Wasserinhalt hinsichtlich des Taktverhaltens unkritisch sind, sie haben insgesamt sogar kürzere Laufzeiten [137] [138].

Bei der QS muss Kesseln mit Zwangsdurchlaufprinzip besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Es handelt sich hierbei um Thermen, also Kessel mit geringem Wasserinhalt (Zwangsumlauf- bzw. -durchlaufkessel), die als Niedertemperatur- oder Brennwertgerät ausgeführt sein können. Thermen benötigen für einen sicheren Betrieb, d.h. um ein Verdampfen des Wassers im Kessel zu verhindern, einen Mindestvolumenstrom. Dieser kann durch verschiedene technische Lösungen sichergestellt werden: Einbau eines Überströmventils im Kessel oder extern an zentraler Stelle, Einbau eines Dreiwegethermostatventils oder sonstiger Überströmeinrichtungen an einem bestimmten Punkt im Netz (z.B. Bypass mit Lochblende am Badheizkörper). WAGNER empfiehlt zur Erhöhung des Anlagenvolumenstroms den Anschluss des Gerätes an einen Differenzdruckarmen/-losen Verteiler, eine hydraulische Weiche oder einen Pufferspeicher [152].

Alle Einrichtungen führen in bestimmten Betriebszuständen zu einem Überströmen von (heißem) Vorlaufwasser in den Rücklauf. Auch regelungstechnische Einrichtungen, die bei zu geringem Durchfluss die Brennstoffzufuhr drosseln oder abschalten, werden in neueren Geräten eingesetzt, um mit dem Argument zu werben, dass keine Anforderungen an einen Mindestvolumenstrom bestehen und auf den Einbau eines Überströmventils verzichtet werden kann.

Der Einfluss einer Überströmeinrichtung beliebiger Art auf den Brennwerteffekt ist in der Fachwelt umstritten. Die Befürworter argumentieren mit der geringen Anzahl von Betriebsstunden – nur bei extremer Teillast – in denen überhaupt ein geringfügiges Überströmen notwendig ist [22]. BÖHM geht davon aus, dass der Fall des Überströmens bei einem Brennwertkessel nur bei Belastungsgraden unter 10 % auftritt; das sind etwa 4 % der Zeit [20].

Demgegenüber steht die Meinung, Überströmventile verschlechtern den Gesamtwirkungsgrad (z.B. KUNZ in [177]). SCHRODE zeigt für ein EFH, dass bei einem Brennwertkessel mit Mindestvolumenstrom die umzuwälzende Wassermenge bereits im Auslegungsfall das Doppelte der benötigten Wassermenge beträgt [138]. Kessel mit Mindestumlauf sollten daher vermieden werden [137]. Es sollten wegen der Rücklauf Temperaturanhebung keine Pufferspeicher, hydraulischen Weichen, Überströmventile oder Dreiwege-THKV in Anlagen mit Brennwertkesseln installiert werden [48]. BRANDT schlägt vor, dass bei Einsatz von Brennwertthermen der Mindestvolumenstrom maximal 20 % des Auslegungsvolumenstroms betragen soll [53].

Das Überströmen von Vorlaufwasser in den Rücklauf bewirkt eine Verschlechterung der Abgaskondensation und erhöht damit die Energieaufwendungen für die Produktion der Nutzwärme. Dies ist eine materielle Kesseleigenschaft, die i.d.R. nicht geändert werden kann. Kessel mit integrierten Pumpen weisen in der Praxis zusätzlich häufig integrierte, meist überdimensionierte und nicht einstellbare Pumpen auf. Zum einen wegen der zu überwindenden größeren Innenwiderstände des Kompaktgerätes (Therme), zum anderen wegen der möglichst universellen Einsetzbarkeit in jede Anlage. Wärmeerzeuger, die nach dem Zwangsdurchlaufprinzip arbeiten und integrierte Pumpen aufweisen, provozieren damit ggf. einen Mehrverbrauch. Es herrscht in den nachgeschalteten Anlagen immer ein Überangebot an Heizwasser, das von den Nutzern angenommen und verschwendet werden kann.

WOLFF schätzt den Anteil der Brennwertkessel mit Zwangsdurchlauf auf etwa 80 ... 90 % [207]. Untersuchungen von 34 Anlagen mit Kesseln im Einfamilienhausbereich kommen zu einem Anteil von 85 % für Anlagen mit integrierten Pumpen und 15 % mit externen Pumpen. Über das Vorhandensein eines Überströmventils konnte etwa in zwei Dritteln aller Fälle keine Aussage gemacht werden, da dies bei der Anlagenaufnahme i.d.R. nicht sichtbar ist [200].

Bewertung in der Energiebilanz

Analog der Darstellung nach Bild 5-16 c auf Seite 113 können Kessel anhand der Kennwerte für sowieso vorhanden Verluste und Umwandlungsverluste als Energiemengen oder mittlere Leistungen beschrieben werden. Soweit ein Kessel im beheizten Bereich eines Gebäudes aufgestellt wird, sind die Abstrahlungsverluste in den beheizten Bereich als Fremdwärme zu werten. Typische Kennwerte können einschlägigen Veröffentlichungen entnommen oder am Objekt gemessen werden. Für die Bewertung des möglichen Verschwendungspotentials ist die maximal verfügbare Kesselleistung für das nachgeschaltete Netz maßgeblich.

5.4.3. Wärmeübergabestationen und weitere Wärmeerzeuger

Von den weiteren typischen Wärmeerzeugern im Wohnungsbau sollen an dieser Stelle die Fern- und Nahwärmeübergabestationen näher betrachtet werden, weil sie nach den Kesseln den zweitgrößten Versorgungsanteil aufweisen. Übergabestationen arbeiten nach dem Prinzip der direkten oder der indirekten Wärmeübertragung. Bei der direkten Wärmeübertragung sind Primär- und Sekundärkreis hydraulisch gekoppelt, in indirekten Wärmeübergabestationen sind beide Heizkreise hydraulisch getrennt.

Die Ergebnisse eigener Untersuchungen zur Leistungsüberdimensionierung von Übergabestationen befinden sich in Tabelle 5-11 auf Seite 112. Fazit der Untersuchungen an etwa 60 Gebäuden ist: die installierte Erzeugerleistung ist in Fernwärmeanlagen geringer als in Kesselanlagen. Besonders deutlich ist dies in EFH, dort ist die installierte Heizwärmeleistung etwa 30 % geringer als bei Kesselanlagen [200].

Die Leistungsbegrenzung für das versorgte Gebäude erfolgt i.d.R. durch eine versorgerseitige Volumenstrombegrenzung. Weiterhin ist eine Maximalbegrenzung der Rücklaufemperatur üblich. Kann die primäre Rücklaufemperatur nicht erreicht werden, wird der Primärvolumenstrom gedrosselt. Eine notwendige Leistungssteigerung nach Absenkphasen muss bei der Dimensionierung der Station berücksichtigt werden, denn eine sekundäre Heizkurvenanhebung hat keinen Erfolg, wenn die primäre Leistung zu gering ist [191].

Die primäre Vorlaufemperatur wird in Fernwärmenetzen häufig konstant/gleitend geregelt. Die Vorlaufemperatur (oft mit 110 °C als Maximum) wird nur in der kalten Jahreszeit der Außentemperatur angepasst. Oberhalb etwa 0 °C Außentemperatur, wenn eine Vorlaufemperatur von 70 °C erreicht ist, erfolgt keine weitere Absenkung. Somit ist die Warmwasserbereitung auch in der warmen Jahreszeit möglich. In Nahwärmenetzen beispielweise mit BHKW oder Brennkesseln liegen die primären Auslegungsvorlaufemperaturen oft insgesamt niedriger, beispielsweise bei 95 °C Vorlaufemperatur. Geringere Vorlaufemperaturen finden heute i.A. breitere Anwendung, um kostengünstigere Kunststoffverteilungen einsetzen zu können.

In direkt mit Fern- oder Nahwärme versorgten Gebäuden entspricht oftmals die primäre Vorlaufemperatur auch der sekundären. Alternativ kann eine zusätzliche witterungsgeführte Regelung durch eine Beimischschaltung erfolgen. Bei Netzen ohne zusätzliche sekundäre Regelung besteht bei konstant/gleitend betriebenen Versorgungsnetzen besonders in der Übergangszeit die Gefahr eines Verschwendungspotentials (durch überhöhte Vorlaufemperaturen an den Heizflächen). Im Neubau sowie bei Anlagenmodernisierungen und Umstellungen werden heute standardmäßig indirekte Versorgungen mit zwischengeschaltetem Wärmeübertrager installiert. Hier erfordert das Sekundärnetz zwangsläufig eine Pumpe. Die sekundäre Vorlaufemperatur wird durch Drosselung des primärseitigen Volumenstroms und zusätzlich ggf. durch sekundärseitige Beimischschaltungen witterungsgeführt geregelt.

Bewertung von Übergabestationen in der Energiebilanz

Die Bewertung der Wärmeverluste von Übergabestationen erfolgt anhand von Erzeugeraufwandszahlen, Nutzungsgraden oder – weil dies aus Messwerten gut reproduzierbar ist – anhand der Abstrahlungs- und Konvektionsverluste der Station $Q_{g,Sowieso}$. Umwandlungsverluste werden für die Gebäudebilanz nicht betrachtet. Im Allgemeinen kann der Wärmeverlust der Übergabestation auch den Verteilverlusten (im unbeheizten Bereich) zugeschlagen werden. Untersuchungen an zwei Kompaktwärmeübergabestationen (je etwa 40 kW) ergaben eine über das Jahr gemittelte Verlustleistung von etwa 300 W [158].

Weitere Wärmeerzeuger

Weitere Wärmeerzeuger – Wärmepumpen, Einzelöfen, BHKWs usw. – können analog anhand der im Kapitel 5.2 benannten Kennwerte e_g , η_g und ggf. anhand der Kennwerte $Q_{g,Sowieso}$ und $Q_{g,Umwandlung}$ beschrieben werden. Für die weitere Energiebilanzierung muss auch hier geklärt werden, welche maximale Leistung dem Gebäude zur Verfügung steht. Diese Wärmeerzeuger sollen im Rahmen der Arbeit nicht näher untersucht werden.

5.5. Lüftungsanlagen

Die im Wohnbau eingesetzten Lüftungsanlagen sind vorwiegend Abluftanlagen, aber auch Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung. Andere Techniken, wie Zuluft-Abluft-Wärmepumpen oder Luftheizungen sind nur in sehr geringer Anzahl in der Praxis zu finden. Die energetische Bewertung sollte in jedem Fall die Bilanz von Wärmeenergie und Hilfsstrom umfassen.

Praxiserfahrungen

Bei der QS von Wohnungslüftungsanlagen sollten u.a. folgende Punkte beachtet werden:

- Abluftanlagen erfordern eine hohe Gebäudedichtheit, weil es sonst zu unerwünschten Nebenluftansaugungen kommen kann, so dass die geplante Entlüftung unzureichend ist. Dies gilt besonders für den modernisierten Bestand [137].
- Feuchteregulungen sind kritisch zu betrachten, weil in der Übergangszeit – mit hohen Außenluftfeuchten – sehr hohe Luftwechselraten erreicht werden können. Hier muss unbedingt auf die korrekte Einbindung der Heizungsanlage in die Regelung geachtet werden, damit die Heizflächen nicht gegen den Wärmeentzug heizen.
- Die regelungstechnische Einbindung von Abluftwärmepumpen zur Trinkwarmwasserbereitung ist sorgfältig vorzunehmen, damit es nicht zum ungewollten Gegeneinanderarbeiten der Lüftungs- und Heizungsanlage kommt (vgl. auch [107]).

HAUSLADEN ET AL [73] stellen in diesem Zusammenhang fest, dass Wohnungslüftungsanlagen – vor allem der Einsatz von Abluftanlagen – mit konventionellen Regelungen in der Praxis nur schwer handhabbar ist. Projektierte und eingeregelt Volumenströme reichen bei einer kurzzeitigen Überbelegung einzelner Räume nicht aus, so dass ein zusätzliches Fensteröffnen unvermeidbar ist. Dies führt zu einer Verschiebung der hydraulischen Verhältnisse und der Luftverteilung im gesamten Gebäude. Andere Zulufräume werden unterversorgt und müssen später manuell belüftet werden. Die Konsequenz sind insgesamt höhere Luftwechsel und damit ein Mehrenergieverbrauch [73].

Eigene Untersuchungen zeigen im Zusammenhang mit Abluftanlagen das Problem des Zwangswärmekonsums. In Innenfluren mit im Estrich verlegten zentralen Wohnungsverteiltern anfallende Wärmeverluste von Verteilleitungen werden nicht als Fremdwärme nutzbar, wenn diese Räume Überströmzonen sind und die abgegebene Wärme in den Ablufträumen (innenliegenden Bädern und Toiletten) sofort abgelüftet wird. Da die innenliegenden Ablufträume selbst kaum eine Heizlast haben, muss von einem Zwangswärmekonsum gesprochen werden.

Hydraulischer Abgleich

Für zentrale Lüftungsanlagen besteht wie für Heizungsanlagen die Notwendigkeit eines hydraulischen Abgleichs. Anderenfalls kommt es in den ventilatornahen Räumen zu einer Überversorgung und entsprechend in den ventilatorfernen Räumen zu einer Unterversorgung mit Luft. Das Gebäude kann im Falle des fehlenden hydraulischen Abgleichs ungewollt in Zonen unterschiedlicher Versorgung, d.h. unterschiedliche Luftwechselraten eingeteilt werden.

Bewertung in der Energiebilanz

Die mögliche Bewertung in der Energiebilanz soll hier nicht vertieft werden. Fehlende QS der Lüftungstechnik kann durch veränderte Gesamtluftwechsel, ggf. zonenweise innerhalb des Gebäudes, bewertet werden. Des Weiteren können zur Bestimmung der Hilfsenergien reale Laufzeiten von Anlagen herangezogen werden.

5.6. Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung

Die Energiebilanz von Wohngebäuden – vor allem von Neubauten – wird neben der Heizung ebenso von der Trinkwarmwasserbereitung beeinflusst, daher soll das Thema hier kurz behandelt werden. Die Qualität der Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung kann durch verschiedene Größen ausgedrückt werden: den Wärmeverlusten der Trinkwasserverteilung, der Speicherung und der Erzeugung sowie den Anteilen von Fremdwärme durch Komponenten der Trinkwasserbereitung. Für den Verbrauch an Trinkwarmwassernutzwärme ist der Nutzer verantwortlich (vgl. Kapitel 4.2).

Verteilsystem

Die Wärmeverluste des Verteilsystems können anhand verlegter Leitungslängen, deren Dämmstandard und Temperaturniveau abgeschätzt werden. Die Wärmeverluste sind – sofern sie innerhalb beheizter Räume anfallen – als innere Fremdwärme anzusehen. Die Auswertung verschiedener Verteilnetze aus Praxis und Literatur führt zu folgenden typisch verlegten Leitungslängen in zentralen Trinkwarmwasserverteilnetzen [89] [101] [140]:

- 0,20 ... 0,40 m/m² je Quadratmeter zu beheizender Fläche (typischer Wert 0,25 m/m²),
- etwa 65 ... 75 % der Leitungen innerhalb beheizter Räume.

Der jeweils untere Wert wird in flächenmäßig großen Gebäuden bzw. Gebäuden ohne Zirkulation erreicht. Die Dämmung von Verteilleitungen ist am konkreten Objekt zu prüfen. Tendenziell ist im Bestand vor allem innerhalb des beheizten Bereiches mit verminderten Dämmdicken zu rechnen. SCHRODE schätzt, dass mindestens 90 % der zentralen Trinkwarmwassersysteme schwächer als nach geltender Verordnung gedämmt sind (Stand 1997) [137]. Er sieht des Weiteren etwa um den Faktor 2 überdimensionierte Zirkulationspumpen als realistisch an.

Typische tägliche Zirkulationszeiten und mittlere Netztemperaturen können der Literatur ([45] [103]) oder realen Einstellungen entnommen werden. Für die reale Ausführung und Optimierung von Trinkwarmwassernetzen ist zu beachten, dass auch diese hydraulisch abgeglichen werden

müssen. Es gilt die – von verschiedenen Seiten stark kritisierte – DIN 1988 oder besser die Berechnung nach dem DVGW Arbeitsblatt W553 [46]. Die Dimensionierung der Durchmesser der Warmwasserleitungen sollte sich streng nach DIN 1988 richten, damit der Wasserinhalt der Rohre gering ist und trotzdem ausreichend Versorgungsdruck vorhanden ist [138].

Speicher und Wärmeerzeuger

Werden für die Trinkwarmwasserbereitung zentrale oder dezentrale Speicher eingesetzt, so sind die Wärmeverluste anhand der installierten Volumina, Dämmstärken (bzw. Bereitschaftsverluste) und Betriebstemperaturen abzuschätzen. Innerhalb des beheizten Bereiches zählen die Wärmeverluste zum Fremdwärmeanfall. Sofern keine praktischen Daten vorhanden sind, können typische Werte verwendet werden ([45] [101]).

Die Bewertung von Wärmeerzeugern zur Trinkwarmwasserbereitung erfordert wie für die Heizung die Bestimmung nutzenabhängiger und nutzenunabhängiger Verluste. Im Feld können die Verluste aus Wärmemengenzählermessungen ermittelt werden. In der Regel besteht bei kombinierter Heizwärmeerzeugung und Trinkwarmwasserbereitung nur die Möglichkeit, gemeinsame Kennwerte zu bestimmen [204].

Für die Qualität der Planung und Ausführung von Wärmeerzeugern sollen zwei weitere Hinweise gegeben werden. Für die Leistungsbemessung des Kessels bei Kombibetrieb gibt es diverse Möglichkeiten. Ist die Trinkwarmwasserbereitung – wie heute üblich – im Vorrang geschaltet, wird die Heizung während der Trinkwassererwärmung unterbrochen, bei Parallelbetrieb wird sie vermindert. In der Praxis empfiehlt sich eine maximale Unterbrechung des Heizbetriebes für die Trinkwarmwasserbereitung von 30 Minuten (VOIGT in [171]). Die Leistungsbemessung ist entsprechend vorzunehmen bzw. die Regelung ist darauf einzustellen, dass die Ladung eines Zentralspeichers nicht zeitgleich zu einer Aufheizphase des Gebäudes erfolgt.

Das Nachladen von Mischspeichern zum Ausgleich von Zirkulationsverlusten erfolgt bei sehr hohen Temperaturen, so dass ggf. kaum Brennwertnutzung erfolgen kann. Hier sind Schichtenpeicher oder extern aufladbare Speicher zu empfehlen. Bei ausreichend großer Heizleistung des Erzeugers und bei Einsatz eines Brenners mit möglichst großem Modulationsbereich kann auf einen Speicher verzichtet werden und Trinkwarmwasser im Durchlaufprinzip bereitete werden.

Praxiskennwerte und Bewertung in der Energiebilanz

Untersuchungen von Trinkwarmwassersystemen ergeben die Kennwerte in Tabelle 5-13 [200]. Mit Hilfe der gezeigten Kennwerte und Ergänzungen von typischen Werten aus etablierten Energiebilanzverfahren lassen sich Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung beschreiben. Zur Bewertung können die allgemeinen Gleichungen (5-9) bis (5-11) verwendet werden.

$$Q_{TW,d} = \sum (L \cdot U^* \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)) \cdot t \quad (5-9)$$

$$Q_{TW,s} = \sum (V \cdot U^{**} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)) \cdot t \quad (5-10)$$

$$Q_{TW,g} = Q_{g,Sowieso} + Q_{g,Umwandlung} \quad (5-11)$$

Die Werte U^* und U^{**} stehen für längen- bzw. volumenbezogene Wärmeverlustkoeffizienten in $W/(m \cdot K)$ und $W/(m^3 \cdot K)$. Für den Wärmeerzeuger werden separate Verluste $Q_{TW,g}$ bestimmt, wenn er nur für die Trinkwarmwasserbereitung eingesetzt wird. Handelt es sich um einen kombinierten Erzeuger für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung sollte die Bewertung gemeinsam erfolgen.

Merkmal	EFH	(Anzahl)	MFH	(Anzahl)
Art des Erzeugers, Anteile in [%]	▪ zusammen mit der Heizung		91	
	▪ separat zentral		4	(46)
	▪ elektrisch dezentral		4	11
Trinkwarmwassertemperatur, in [°C]	Mittel: 56 35 ... 65	(41)	Mittel: 58 48 ... 62	(22)
Anteil der Gebäude mit Speicher, in [%]	100	(43)	100	(20)
Speichervolumen V/A_{EB} , in [l/m ²]	0,83	(39)	0,44	(20)
Aufstellung des Speichers, Anteile in [%]	▪ im unbeheizten Bereich		80	
	▪ im beheizten Bereich		20	(19)
Dämmung des Speichers	▪ gut		84	
	▪ mittel		7	(43)
	▪ schlecht		9	0
Leistung der Speicherladepumpe P/A_{EB} , in [W/m ²]	0,31	(8)	0,14	(19)
Anteil der Gebäude mit Zirkulation, in [%]	78	(36)	100	(20)
Leistung der Zirkulationspumpe P/A_{EB} , in [W/m ²]	0,18	(27)	0,09	(19)
Betriebszeit der Zirkulationspumpe, in [h/d]	15,7	(27)	20,0	(19)
Regelung der Zirkulationspumpe, Anteile in [%]	▪ keine Angabe		4	25
	▪ zeitgesteuert		88	70
	▪ temperaturgesteuert		8	0
	▪ zeit- und temperaturgesteuert		0	(20)

Tabelle 5-13 Eigenschaften von Trinkwarmwassersystemen

5.7. Weitere Merkmale der Anlagentechnik

Bei der Abschätzung des Energieverbrauchs durch Maßnahmen der QS können weitere Merkmale der Anlagentechnik herangezogen und bewertet werden. Einzelne sollen hier qualitativ genannt, jedoch nicht vertieft behandelt werden.

Anlagenspülung

Ein Merkmal ist die Spülung der Anlage nach Inbetriebnahme oder Umrüstung. Rost- und Kalkschlämme vermindern die Wärmeübertragung im Wärmeerzeuger (und allen anderen Wärmeübertragern), erhöhen ggf. die Druckverluste im Netz und führen zum Zusetzen stark voreingestellter Thermostatventile, wie sie im Bestand üblich sein sollten. Daher sollte eine QS, v.a. bei nachträglicher Optimierung, immer mit einer Anlagenspülung verbunden werden.

Die Bewertung der Auswirkungen fehlender Anlagenspülung kann z.B. über eine Erhöhung der Druckverluste im Netz bzw. als verminderte Wärmeerzeugerleistung erfolgen. Die quantitativen

Größen sollen im Rahmen der Arbeit nicht abgeschätzt werden. Dies erfordert ggf. Praxismessungen.

Gerechtigkeit der Heizkostenerfassung

Mit der Optimierung eines Gebäudes sind veränderte Randbedingungen für die Heizkostenerfassung verbunden. Diese resultieren v.a. aus der baulichen Modernisierung, sollen jedoch an dieser Stelle erläutert werden.

Mit sinkenden Heizlasten nach einer baulichen Modernisierung vermindert sich die notwendige Übertemperatur der Heizflächen. Diese ist nicht abhängig von der Vor- und Rücklaufemperatur, sondern nur vom Verhältnis der Raumheizlast zur installierten Heizkörperleistung. Eine konventionelle Heizkostenerfassung mit Verdunstungsgeräten erfordert minimale Auslegungsüberschreitungen von 55 ... 60 °C [191]. Diese Geräte arbeiten im Bereich von etwa 20 ... 50 K Übertemperatur etwa linear, darüber und darunter ist die Verdunstung höher als der Verbrauch [83]. Nach der baulichen Modernisierung muss daher die Eignung der Heizkostenerfassung überprüft werden – unabhängig von der anlagentechnischen Optimierung [88]. Im Einzelfall müssen stark überdimensionierten Heizflächen ausgetauscht werden, damit das Abrechnungssystem insgesamt erhalten bleiben kann.

Die Diskussion der gerechten Heizkostenverteilung hält unvermindert seit dem Aufkommen der Zentralheizungstechnik an [149] [150] und hat sich mit dem Aufkommen von Niedrigenergiehäusern wieder verstärkt [191]. Es gibt zwei Hauptdiskussionenpunkte:

- Zum einen wird davon ausgegangen, dass die fehlende Heizkostenerfassung bzw. Umlage zu einem Energiemehrverbrauch führt, weil Mieter das gesamte Angebot an Wärme nutzen.
- Zum zweiten wird die Abrechnungsgerechtigkeit diskutiert. Diese wird im NEH als zunehmend ungerechter angesehen, weil die Wärmeströme zwischen den Wohneinheiten zunehmen und Wohnungen mit vielen Außenflächen generell benachteiligt sind.

Im Zusammenhang mit der anlagentechnischen Optimierung ergeben sich folgende Konsequenzen. Eine Optimierung der Anlagentechnik soweit es die realen Randbedingungen im Bestand erlauben bzw. eine korrekte Planung und Ausführung im Neubau beschränken das Wärmeabgabepotential und damit die Wärmeverwässerung der Anlage. Mit dem besseren baulichen Standard nimmt die Wärmeverwässerung innerhalb des Gebäudes jedoch weiter zu. Die Einsparbemühungen einzelner Mieter werden somit immer auf Kosten der unmittelbaren Nachbarn erfolgen. Zudem besteht das Problem der Erfassungskosten, die im gut gedämmten Gebäude verglichen mit den Energiekosten stark ansteigen. FRANKE sieht bei heutigen Verhältnissen für die Heizkostenerfassung eine wirtschaftliche Grenze bei 50 kWh/(m²·a) Heizwärmeverbrauch [61]. Bei unverhältnismäßig hohen Kosten, d.h. keinem vernünftigen Verhältnis der Energieeinsparung zu den Erfassungskosten, muss bzw. darf laut Heizkostenverordnung auf die Erfassung verzichtet werden [133].

Unter diesen Randbedingungen kann im hochwärmedämmten Gebäude – nach erfolgter Qualitätssicherung der Technik – über den Verzicht auf eine dezentrale Heizkostenerfassung im Wohnungsbau nachgedacht werden.

Schornsteine

Bei der Anlagenoptimierung ist auf die Ausführung vorhandener Schornsteine zu achten. Wird das Betriebstemperaturniveau des Wärmeerzeugers verändert, muss eine ggf. auftretende Kondensation im Schornstein beachtet werden.

Die Bewertung der Wärmeabgabe von Schornsteinen an den umgebenden Raum wird in der Fachwelt in zeitlich wiederkehrenden Abständen diskutiert. Hier sind noch keine Standardansätze definiert. Sofern diese Bewertung im Rahmen einer Energiebilanz erfolgen soll, sind die Wärmeverluste als Fremdwärme anzusetzen.

6. Bewertungsmöglichkeiten von Qualität und Qualitätssicherung in der Energiebilanz

Die baulichen, anlagentechnischen und nutzerbedingten Einzelkennwerte des Energieverbrauchs werden zu einer Bilanz mit diversen Wechselwirkungen zusammengefasst. Aus der Verknüpfung der Energiekennwerte resultieren Hinweise für die Ableitung eines neuen Energiebilanzansatzes, mit dem sich die QS bewerten lässt. Der Energiebilanzansatz wird vorgestellt und für zwei typische Gruppen von Bestandsgebäuden das Verschwendungspotential – und damit ein mögliches Einsparpotential – aufgrund von fehlender Qualität abgeleitet.

6.1. Verknüpfung von Energiekennwerten in einer Matrix

Die in den Kapitel 4 und 5 besprochenen Einzelmerkmale des Baukörpers, der Nutzung und Anlagentechnik bestimmen zusammen den Energieverbrauch eines Gebäudes. Es existieren diverse Abhängigkeiten untereinander, die an geeigneter Stelle bereits benannt wurden. Im Folgenden werden Matrixdarstellungen vorgestellt und erläutert, die das Zusammenspiel der Kennwerte zusammenfassen.

Einflüsse von Einzelmerkmalen auf typische Energiekennwerte

Tabelle 6-1 beschreibt die Einflüsse der Merkmale untereinander. Es sind nur die wichtigsten Einflussgrößen dargestellt. Wichtige Verknüpfungen und Einflüsse der Einzelmerkmale auf die Energiebilanz sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

- Die Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung beeinflussen die Nutzung von Fremdwärme und die minimale Heizgrenztemperatur. Sie bestimmen die reale mittlere Wärmeerzeugerleistung, den Netzvolumenstrom und damit Netzdruckverluste und notwendige Pumpendruckhöhung sowie die Systemrücklauftemperatur. Merkmale der Regelgüte hängen indirekt – über Volumenstrom und Raumtemperatur – von der Höhe der Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung ab.
- Der Fremdwärmeanfall ermöglicht erhöhte Transmissions- und Lüftungsverluste (Verschwendungspotential, Zwangswärmekonsum), bestimmt Innen- und Heizgrenztemperatur, Netzvolumenstrom und Druckverluste, die Systemrücklauftemperatur und die Regelgüte.
- Die Innentemperatur beeinflusst die Höhe der Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung, die notwendige Heizflächenbemessung, den Wärmeübertragerkennwert und die Heizgrenztemperatur sowie indirekt über diese Größen weitere Merkmale.
- Eine Teilbeheizung bewirkt veränderte Innentemperaturen und Wärmeverluste der Transmission und Lüftung. Sie beeinflusst dadurch die mittlere Wärmeerzeugerleistung und bestimmt auch die notwendige Wärmeerzeugerleistung und Heizflächenbemessung zur Wiederaufheizung. Teilbeheizung hat Auswirkungen auf die Netzhydraulik. Sie bestimmt ggf. die notwendige Heizkurveneinstellung zur Wiederaufheizung. Auch der Wärmefluss innerhalb des Gebäudes bei Teilbeheizung kann eine veränderte Heizkurveneinstellung erfordern.

- Der Erzeugertyp bestimmt ggf. einen Mindestvolumenstrom im Netz, notwendige Heizkurveneinstellungen und Rücklauftemperaturen. Die Leistung des Erzeugers legt das Potential für die Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung fest.
- Der Mindestvolumenstrom eines Kessels erfordert bestimmte Pumpendruckerhöhungen und -regelungsarten und beeinflusst damit die gesamte Netzhydraulik, wenn keine hydraulische Entkopplung zwischen Wärmeerzeuger- und Verteilkreis vorgesehen wird. Die Erzeugerzulauftemperatur (Netzzücklauftemperatur) steigt im Falle eines Überströmens.
- Die Heizkurveneinstellung ermöglicht veränderte Innentemperaturen und damit Transmissions- und Lüftungsverluste. Erhöhte Vorlauftemperaturen führen zu verminderten Temperaturabsenkungen der Räume bei Teilbeheizung. Die Heizkurveneinstellung ist unmittelbar mit der Heizflächenbemessung, dem notwendigen Netzvolumenstrom und der Rücklauftemperatur verknüpft. Über den Wärmeübertragerkennwert hat sie Einfluss auf das Regelverhalten.
- Die am Regler eingestellte Heizgrenztemperatur bestimmt die Länge der Wärmebereitstellung und damit maßgeblich die Höhe der technischen Verluste. Eine zu hoch oder nicht eingestellte Heizgrenze ermöglicht erhöhte Transmissions- und Lüftungsverluste in der Übergangszeit und hat damit Einfluss auf die mittlere Erzeugerleistung und Netzbelastung.
- Die Pumpenregelung legt den Netzvolumenstrom und die Pumpendruckerhöhung fest. Sie verändert damit die notwendige Art und Einstellung von THKV, die Ventilautorität und Regelgüte. Mit entsprechend schlechter Pumpenregelung kann dem Nutzer ein Verschwendungspotential durch überhöhte Massenströme angeboten werden.
- Der Netzvolumenstrom wirkt sich direkt auf die Druckverluste, die hydraulischen Verhältnisse im Netz und die Systemrücklauftemperatur aus. Erhöhte Netzvolumenströme beeinflussen die gewünschte Energieeinsparung bei Teilbeheizung.
- Die Pumpendruckerhöhung bestimmt die Wahl und Einstellung von THKV, deren Ventilautorität und Regelbarkeit sowie die hydraulischen Verhältnisse im Netz.
- Der Verteilnetztyp und die resultierenden Druckverluste wirken sich auf die Volumenströme im Netz aus. Um eine bestimmte Ventilautorität zu erreichen, müssen THKV entsprechend bemessen und eingestellt werden. Die Regelbarkeit und die Regelgüte hängen davon ab. Wärmeverluste des Verteilnetzes bestimmen den Fremdwärmeeintrag in den beheizten Bereich maßgeblich mit. Sie führen auch zu Minderleistungen an Heizflächen, wenn die Vorlauftemperatur nicht mehr ausreichend hoch ist.
- Die Heizflächenbemessung hat einen Einfluss auf die notwendige Heizkurveneinstellung, und den erforderlichen Netzvolumenstrom. Sie legt ein mögliches Verschwendungspotential und ggf. eine schlechte Nutzbarkeit von Fremdwärme bei großen Trägheiten fest. Je nach abgegebener Nutzwärme über die Heizflächen stellen sich Rücklauftemperatur und damit der Wärmeübertragerkennwert ein.
- Die Bemessung und Einstellung von Thermostatventilen bestimmt sehr stark die Regelbarkeit (Regler und Regelstrecke) und damit das Potential zur Fremdwärmenutzung. THKV mit zu großen Durchlasswerten mindern ggf. die Effekte einer zeitlichen Teilbeheizung. Die Einstellung von THKV als dezentrale Widerstände bestimmt die Funktion des hydraulischen Abgleichs.

- Ventilautorität, Wärmeübertragerkennwert bzw. die gesamte Regelstreckenkenlinie sowie der P-Bereich des THKV bestimmen das Regelverhalten im Raum und damit vor allem die Fremdwärmenutzung und Raumtemperatur.
- Der hydraulische Abgleich ist für die Volumenstromverteilung im Netz verantwortlich. Fehlt er, besteht v.a. an den pumpennahen Heizkörpern ein Verschwendungspotential für Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung. Ein fehlender hydraulischer Abgleich bedingt i.d.R. die veränderte Heizkurven- und Pumpeneinstellung.
- Die Rücklauftemperatur ist eine resultierende Größe im Netz. Sie wird maßgeblich zur Bestimmung des Wärmeübertragerkennwertes benötigt und beeinflusst die Effizienz von Brennwertkesseln.

Aktion	Reaktion																				
	Transmission, Lüftung	Fremdwärmenutzung	Innentemperatur	Teilbeheizung	Erzeugertyp, -leistung	Mindestvolumenstrom	Heizkurveinstellung	Heizgrenztemperatur	Pumpenregelung	Netzvolumenstrom	Pumpendruckerhöhung	Netztyp, Druckverluste	Heizflächenbemessung	Bemessung THKV	Art und Einstellung THKV	P-Bereich	Ventilautorität	Wärmeübertragerkennwert	Regelstreckenkenlinie	Hydraulischer Abgleich	Rücklauftemperaturen
Transmission, Lüftung		+			○			+		+	○	○					○	○	○		+
Fremdwärme	+		+				○			○		○				○	○	○	○	○	+
Innentemperatur	+	○		○	○		○	+		○			+	○		○		+	○		○
Teilbeheizung	+	○	+		+		○			○	○	○	+					○		+	○
Erzeugertyp, -leistung	+			○		+	○			○	○		○								○
Mindestvolumenstrom	○						○		○	+	+		○	○	○					○	+
Heizkurveinstellung	○	○	+	+			○			+			+	○	○	○		+	○	○	+
Heizgrenztemperatur	+	+	○				○														
Pumpenregelung	○	○	○	○		○	○			+	+			○	+	+	○		○	○	
Netzvolumenstrom	○			+	○	○	○				○	+		○	○	○	○		○	+	+
Pumpendruckerhöhung	○			○		○	○			+		○		+	+	○	+		○	+	○
Netztyp, -druckverluste									○	+	+			+	+	○	+		○	+	
Heizflächenbemessung	○	+	○	○	○		+			+	○	○		○	○			○	○		+
Bemessung THKV	○	+	○	+						○	○	○			+	+	+	○	+	+	○
Art u. Einstellung THKV	○	+	○	+						○	○	○				+	+	○	+	+	○
P-Bereich	○	+	○																		○
Ventilautorität	○	○	○	○						○	○					○				+	○
Wärmeübertr.kennwert	○	○																	+		
Regelstreckenkenlinie	+	+	+																		○
Hydraulischer Abgleich	○	○	○	+	○		+	○	+	+	+	+				○	+	○	○		+
Rücklauftemperatur					○													+			
	+	Abhängigkeit vorhanden																			
	○	indirekte Abhängigkeit vorhanden																			
		keine/geringe Abhängigkeit vorhanden																			

Tabelle 6-1 Matrix der gegenseitigen Beeinflussung

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

Einzelmerkmal	Bilanzeinfluss	Transmissionswärmeverlust Q_T	Lüftungswärmeverlust Q_V	Fremdwärme Q_{f+s}	Verteilverluste Q_d	Speicherverluste Q_s	Erzeugerverluste Q_g	Trinkwassernutzwärme Q_{tw}	Hilfsenergie $Q_{elektrisch}$
Kompaktheit		+		○			○		
U-Wert, Wärmebrücken		+					○		
Speicherfähigkeit		○	○	○					
Solare Einstrahlung		○	○	+			○		
Infiltration, Dichtheit			+	○			○		
Fensterlüftung			+	○			○		
Belegungsichte		+	+	+			○	+	
Raumtemperatur (Sollwert)		+	+	○	○	○	○		
Teilbeheizung		+	+	○	○	○	○		
Personen-, Geräteabwärme		+	+	+			○		
Wasserverbrauch				+	○		○	+	
Erzeugerart					○	○	+		○
Erzeugerbereitschaftsverluste				+			+		
Erzeugerumwandlungsverluste							+		
Mindestvolumenstrom							○		○
Pumpenregelungsart		○	○		○				+
Pumpenleistung					○				+
Heizkurveneinstellung		○	○		+	○	○		○
Heizgrenztemperatur (Regler)		○	○	○	+	+	+		+
Verteilung (Längen, Dämmung)		+	+	+	+		○	○	○
Hydraulischer Abgleich		○	○		○		○		○
Netzvolumenstrom					○		○		○
Pumpendruckerhöhung									○
Heizflächenbemessung		○	○		○		○		
THKV, dezentrale Regelung		○	○		○				○
Netzdruckverluste									+
Speicherbereitschaftsverluste				+		+	○		
Systemtemperatur		○	○	+	+	+	+		○
	+	direkter Einfluss vorhanden							
	○	indirekter Einfluss vorhanden							
		kein/geringer Einfluss vorhanden							

Tabelle 6-2 Matrix der Einflüsse auf die Energiebilanz

Die Kenngrößen des Energieverbrauchs sind stark untereinander vernetzt, wobei in der Darstellung bereits auf viele Details verzichtet wurde. Fazit ist:

Die Merkmale der QS bestimmen das Verschwendungspotential, das sich in der Praxis

- *als veränderte mittlere Innentemperatur (je Zeiteinheit und ggf. räumliche Zone),*
- *als veränderter mittlerer Luftwechsel (je Zeiteinheit und ggf. räumliche Zone),*
- *als veränderte Länge der Heizzeit (theoretisch und real),*
- *als veränderte mittlere Systemtemperatur je nach Auslastung der Komponenten sowie*
- *als veränderter Hilfsenergieverbrauch*

äußert und somit auch in der Bilanz entsprechend quantifiziert werden kann.

Die Bestimmung der fünf benannten Mittelwerte anhand von Kenngrößen ist die zu lösende Aufgabe einer realitätsnahen Energiebilanz. Darin unterscheidet sich ein Bilanzverfahren zur Bewertung von QS von herkömmlichen Ansätzen.

6.2. Verbesserungsansätze etablierter Bilanzverfahren

Die Untersuchung etablierter Energiebilanzverfahren auf ihre Eignung zur Bewertung von QS zeigt, dass die Weiterentwicklung der Bilanzansätze notwendig ist (Kapitel 3.4). Erfolgversprechende Verfahren müssen einen hohen Praxisbezug aufweisen. Die folgenden Gesichtspunkte sind aus der Untersuchung abgeleitete Grundlagen und Ideen für eine Erweiterung von Energiebilanzverfahren – ggf. auch für die künftige Normung und Richtlinienarbeit zur Energiebilanzierung.

Flexible Heizgrenze und Bilanzzeiträume

Zur Bewertung des Energiebedarfs oder -verbrauchs eines Gebäudes ist eine flexibel einsetzbare bzw. wählbare Heizgrenze nötig. Diese muss durchgehend für die Bestimmung aller Energiekennwerte gelten. Da die Heizgrenze die Anzahl der Heiztage, die mittlere Außentemperatur und die solare Einstrahlung während der Heizzeit bestimmt, ist dieser flexible Ansatz für die Bewertung von QS sehr wichtig. Bei fehlender Qualität der Anlage und Nutzung verschiebt sich die Heizgrenze in Richtung höherer Außentemperaturen.

Für die Bereinigung von Energieverbrauchswerten sollten grundsätzlich die gleichen Ansätze wie für Bedarfsrechnungen gelten. Dies betrifft vor allem die Wahl der Heizgrenze und Heizzeit.

Die untersuchten Energiebilanzverfahren ermöglichen eine Bilanzierung in unterschiedlichen Zeitintervallen (jährlich, monatlich, stündlich etc.). Dabei werden teilweise für die bauliche und die anlagentechnische Bewertung unterschiedliche Bilanzzeiträume zugelassen (Kopplung von Monats- oder Stundenwerten für den Heizwärmebedarf mit einer Jahresbilanz für die technischen Verluste [44] [45] [162]). Diese Vermischung sollte vermieden werden, da die Rückkopplungen von Fremdwärme aus der Anlagentechnik auf den restlichen Fremdwärmeeintrag sowie weitere Effekte nicht korrekt abgebildet werden können, aber von erheblicher Bedeutung sind. Die Notwendigkeit einer geschlossenen Energiebilanz für das Gebäude und die Anlagentechnik verstärkt sich mit zunehmendem Dämmstandard und damit steigendem Einfluss der Fremdwärme bestehender sanierter und neuer Gebäude.

Art der Bilanzkennwerte

Bei der Energiebilanzierung werden verschiedene Kennwerte verwendet. Für eine transparente Bilanz sollten relative (multiplikative) Größen wie Deckungsanteile, Aufwandszahlen und Nutzungsgrade möglichst dann vermieden werden, wenn die abzubildenden realen Prozesse auch unabhängig von vor- und nachgeschalteten Vorgängen bewertbar sind (vgl. Kapitel 3.3). Bei Verteilverlusten von Warmwasserzirkulationsleitungen ist dies typisch der Fall. Abgasverlusten von Kesseln sind dagegen von der Nutzwärmeabnahme abhängig. Sie können multiplikativ angegeben werden.

Bei der Angabe flächen- oder volumenbezogener Kenngrößen muss die Bezugsgröße eindeutig bekannt sein. Da in der Praxis mit einer Vielzahl von Flächen (Nutzfläche, Geschossfläche, Hauptnutzfläche) und Volumina (Bruttovolumen, Nettovolumen, Luftvolumen) operiert wird, sollte zumindest als Basiswert einer Bilanz immer die absolute Energiemenge angegeben werden.

Verbrauchsbereinigung

Ausgangspunkt der Bereinigung ist der Endenergieverbrauch eines Gebäudes ggf. inklusive der Trinkwarmwasserbereitung (vgl. Bild 6-1). Die Anteile der verbrauchten Energiemengen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung sollten im Rahmen der Bewertung von QS anhand unterschiedlicher Rechenalgorithmen bereinigt werden. Nähere Ausführungen zu dieser Erweiterung des Verfahrens der VDI 3807 finden sich in [89] und [90].

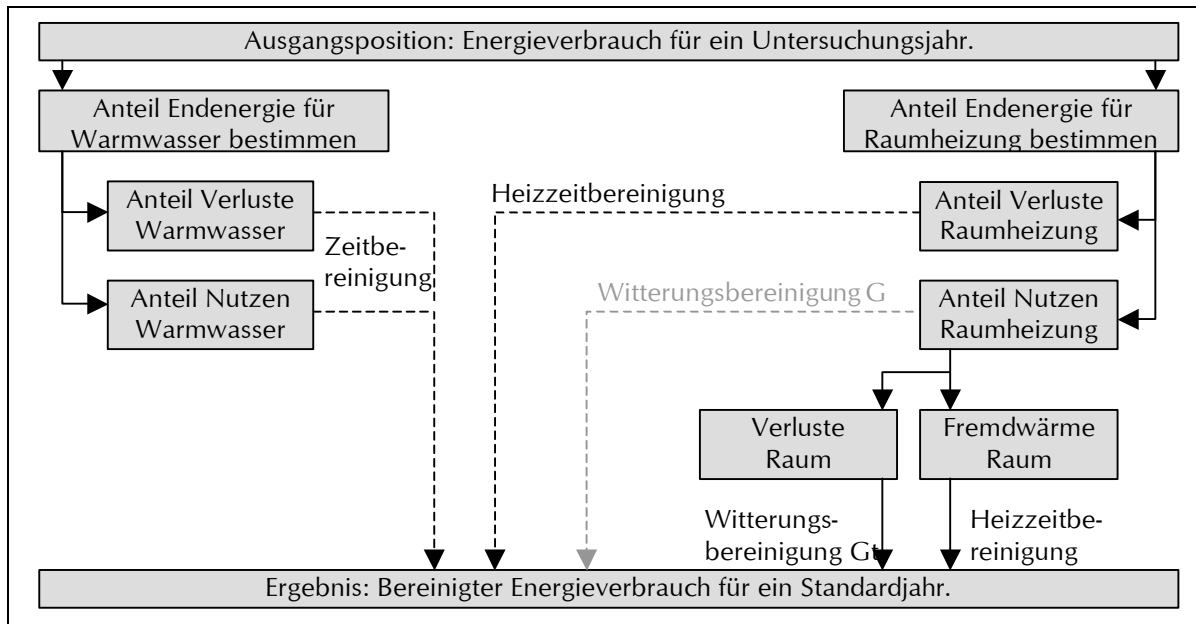


Bild 6-1 Schematischer Ablauf einer Verbrauchsdatenbereinigung

Aus dem gesamten Energieverbrauch für das Untersuchungsjahr wird der Anteil der Endenergie für die Warmwasserbereitung (durch Messung oder rechnerische Abschätzung) separiert. Die Nutz- und Verlustenergien der Trinkwarmwasserbereitung werden im Verhältnis der Länge des Untersuchungszeitraumes zum gesamten Jahr ausschließlich zeitbereinigt.

Von der verbleibenden Heizenergie (Anteil der Endenergie für Raumheizung) werden die technischen Verluste der Raumheizung abgezogen. Dies bedeutet die Ermittlung aller witterungsunabhängigen Wärmeverluste (die Annahme mittlerer Heizwassertemperaturen ist ausreichend), d.h. aller Energiemengen bis auf die geregelte Wärmeabgabe der Heizflächen. Die meist rechnerisch bestimmten Verluste werden vereinfachend anhand der Länge der Heizzeit normiert (Verhältnis: Anzahl der Heizztage im Untersuchungszeitraum zu Anzahl der Heizztage im Standardjahr).

Der rechnerisch verbleibende Nutzen der Heizung wird z.B. mit Hilfe der Heizgradtage G witterungsbereinigt (Verhältnis Heizgradtage im Untersuchungszeitraum zu Heizgradtagen im Standardjahr). Diese Bereinigung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Diese rühren aus der nicht eindeutigen Definition der Nutzenergie (vgl. Kapitel 3.3) bzw. speziell der Frage, ob die Wärmeabgabe der Heizverteilungen innerhalb des beheizten Bereiches rechnerisch zu den Verlusten oder zum Nutzen zählt.

Alternativ können daher die Verluste der Transmission und Lüftung mit den Gradtagszahlen Gt bereinigt werden. Dazu muss der gesamte Wärmeeintrag in den beheizten Bereich des Gebäudes bestimmt werden. Dies ist die Wärme Q_{intern} , die geregelt über die Heizkörper und unregelt über andere Komponenten der Heizungsanlage abgegeben wird sowie die sonstige solare und innere (Personen, Geräte und Trinkwarmwasserbereitung) Fremdwärme Q_{I+S} des Untersuchungsjahres. Die Fremdwärmeleistung \dot{Q}_{I+S} muss abgeschätzt werden, wobei hier jedoch üblicherweise Standardwerte verwendet werden. Die Bereinigung erfolgt nach Gleichung (6-1).

$$Q_{intern,bereinigt} = (Q_{intern} + Q_{I+S}) \cdot \frac{Gt_{Standard}}{Gt_{mess}} - \dot{Q}_{I+S} \cdot t_{HP,Standard} \quad (6-1)$$

Der Ansatz liefert sicherere Ergebnisse, wenn die Heizgrenztemperatur nicht genau bekannt ist bzw. Untersuchungszeiträume nicht genau ein Jahr umfassen, wobei auch in diesem Fall Unsicherheiten auftreten, wie bei Untersuchungen in der Praxis herausgearbeitet wurde [205].

Der Ansatz der Bereinigung beruht auch hier auf der Idee, die Verluste der Transmission und Lüftung seien proportional zur Außentemperatur. In den Berechnungsformeln spiegelt sich dieser Zusammenhang im Verhältnis der Gradtagszahlen bzw. Heizgradtage wieder. In der Praxis zeigt sich jedoch eine starke Abhängigkeit des Luftwechsels von der Außentemperatur bzw. vom Wetter. Energieverbrauch und Heizgradtage sind nicht ideal proportional zueinander. Dieses Problem der Bereinigung stellt auch SIEBERT fest und äußert die Vermutung, dass in einem ausgeprägt milden und sonnigen Übergangsmonat auch übermäßig gelüftet wird [9].

Der Verbrauch des Gebäudes kann bei der Bereinigung allein anhand des Außentemperaturverlaufes verzerrt werden, vor allem wenn die Monate der Übergangszeit des Untersuchungsjahres im Standardjahr kühler ausfallen. Die Bereinigung eines Energieverbrauches ist daher immer mit der Unsicherheit des unterschiedlichen Lüftungsverhaltens in verschiedenen Jahren geprägt. Ein Verfahren, welches das Problem der Nichtproportionalität des Verbrauchs zur

Außentemperatur berücksichtigt, ist in Kapitel 7.3.2 beschrieben. Hier werden nur die Transmissionswärmeverluste und ein Anteil für Mindestlüftung einer Bereinigung unterzogen.

Luftwechselkonstanz

Die beschriebene Erhöhung des Luftwechsels in den Übergangsmonaten muss sich auch in der Energiebedarfsbilanz widerspiegeln. Viele der etablierten Energiebilanzverfahren bewerten Gewinne und Verluste des beheizten Bereiches monatlich, wobei ein konstanter Luftwechsel verwendet wird. Die Wahl von konstanten (mittleren) Luftwechseln birgt die Gefahr, die Heizzeit zu kurz zu bestimmen. Die Fremdwärme deckt dann rechnerisch bereits bei geringeren Außentemperaturen die Heizlast. Auf diese Vorgehensweise muss bei der Bewertung von QS verzichtet werden. Die (vermutete) erhöhte Genauigkeit einer monatlichen Bilanz gegenüber der Jahresbilanz ist mit dieser Vereinfachung nicht gegeben.

Fremdwärmenutzungsgrad und Bewertung der inneren Fremdwärme

Die etablierten Energiebilanzverfahren bewerten die Nutzbarkeit von Fremdwärme im beheizten Bereich mit Hilfe von Fremdwärmenutzungsgraden ohne Berücksichtigung der eingesetzten Anlagentechnik. Die Ableitung eines entsprechenden Formelzusammenhangs beruht auf dynamischen Gebäudesimulationen, denen bestimmte Nutzungseigenschaften (vor allem Lüftungsverhalten und Toleranz gegenüber erhöhter Raumtemperatur) zugrunde liegen. Der Fremdwärmeeintrag aus der Anlagentechnik wird in der Bilanz der inneren Wärmequellen i.d.R. vernachlässigt, obwohl er gerade in der Übergangsjahreszeit eine große Bedeutung hat, der mit verbessertem Dämmstandard neuer und sanierter Gebäude zunimmt. Vier bisher verwendete Ansätze, diesen Anteil der Fremdwärme zu berücksichtigen, seien im Folgenden genannt:

- Die Fremdwärme aus Anlagentechnik wird zu *100 % nutzbar* angesehen. Dies betrifft z.B. die Wärmeabgabe von Heizverteilungen. Sie erscheint in der Bilanz weder als innerer Gewinn, noch als technischer Verlust des Systems (z.B. in [103] [161]). Die Wärmeabgabe der Leitungen wird behandelt, als wenn sie direkt vom Heizkörper abgegeben würde. Diese Vorgehensweise ist nicht korrekt, da die abgegebene Wärme nicht in jedem Fall Heizzwecken dienen kann. Die Wärmeabgabe von Anbindeleitungen, die der direkten Beeinflussung eines Thermostatventils unterliegen, muss nicht nutzbar sein, wenn diese Leitungen durch Räume geführt werden, in denen keine Heizlast besteht oder wenn sie in Bauteilen verlegt werden und dadurch nicht zeitnah nutzbar werden [68].
- Die Fremdwärme aus Anlagentechnik wird zu *100 % als Verlust*, aber trotz Auftretens im beheizten Bereich nicht als Fremdwärme bilanziert. Dieser Ansatz wird beispielsweise für die Wärmeabgabe von Komponenten des Trinkwassernetzes oder die Bereitschaftsverluste von Kesseln gewählt (z.B. [79]). Die Verluste des Systems werden damit insgesamt zu hoch bestimmt. Die Rückkopplungen auf die anderen Arten von Wärmeeintrag in den beheizten Bereich werden vernachlässigt.
- Die Fremdwärme aus Anlagentechnik wird als *teilweise nutzbar* angesehen, der Grad der Nutzbarkeit wird pauschal festgelegt [45]. Kopplungseffekte mit anderen Arten von Fremdwärme werden nicht berücksichtigt.

- Darüber hinaus gibt es Ansätze, welche die Fremdwärme aus Anlagentechnik zwar mit variablen, aber geringeren Nutzungsgraden als den sonstigen Fremdwärmeeintrag bewerten [70] [72].

Weder in der dynamischen Gebäudesimulation noch in den Bilanzverfahren, die einen Fremdwärmenutzungsgrad verwenden, sollte der Fremdwärmeeintrag aus Anlagentechnik wegen seiner Höhe und Bedeutung vernachlässigt oder pauschalisiert werden. Anderenfalls werden Rückkopplungen auf die anderen Arten von Fremdwärme nicht erfasst. Zur Bestimmung des Fremdwärmenutzungsgrades werden hauptsächlich zwei Ansätze in den etablierten Bilanzverfahren verfolgt:

- Der Fremdwärmenutzungsgrad hängt vom Verhältnis der solaren und inneren Fremdwärme (ohne Anlagentechnik) zu den Verlusten des beheizten Raumes ab [43] [79] [103]. Die Gebäudekonstante zur Quantifizierung der bezogenen Heizlast und der Gebäudespeicherkapazität wird berücksichtigt [43] [79].
- Der Fremdwärmenutzungsgrad wird vom Verhältnis der solaren Fremdwärme zu den Verlusten des beheizten Raumes, der Art der Regelung und der Gebäudekonstante abhängig gemacht [110] [161].

Da den in unterschiedlichen Bilanzverfahren jeweils angegebenen Berechnungsformeln Simulationsrechnungen zugrunde liegen, die Rückkopplungen mit Fremdwärme aus Anlagentechnik zumeist nicht berücksichtigen, sollten monatliche Ansätze, die eine hohe Rechengenauigkeit suggerieren, kritisch betrachtet und ggf. entsprechend angepasst werden.

Der Fremdwärmenutzungsgrad ist – wie andere Kennwerte der Gebäudebilanz – der Versuch, dynamische Prozesse in ein statisches Modell zu überführen. Da die Effekte der Wärmeübergabe und Regelung, Wärmeeinspeicherung in Bauteilen, Überwärmung des Raumes (Fremdwärmenutzung) miteinander und an das Nutzerverhalten gekoppelt sind, ist die Verwendung eines isolierten Fremdwärmenutzungsgrades insgesamt zu überdenken.

Bewertung der Einflüsse der Regelung und Qualitätssicherung

Eine Untersuchung verschiedener europäischer Bilanzverfahren stellt zusammenfassend fest: "*Quality control of the building design and construction has key impact of the actual performance ... this is especially so with the installation of insulation materials, air tightness of building envelope, balancing of heating network etc.*" [190]. Da die Einflüsse der QS sowie Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Anlagentechnik und Nutzung derzeit praktisch nicht bilanziert werden können, ist diese Äußerung als Arbeitsanweisung für die Entwicklung von Bilanzverfahren zu verstehen.

Die in Kapitel 3.4 untersuchten Energiebedarfsbilanzen bewerten Gebäude und Anlagentechnik als "nach den Regeln der Technik" ausgeführt. Energetische Auswirkungen mangelnder *immaterieller* Qualität werden damit nicht berücksichtigt. Auch die *materielle* Qualität – Ausstattung mit Regelgeräten, Leitungsdämmung usw. – wird nur in wenigen Bilanzverfahren bewertet. Auch der eingeschränkte Heizbetrieb wird in den untersuchten Bilanzverfahren nicht durchgehend bei der Bestimmung aller Verlustkennwerte berücksichtigt [44] [45] [103]. Sowohl verminderte Verluste

des beheizten Bereiches (Transmission und Lüftung) als auch verminderte Anlagentechnikverluste müssen bilanzierbar sein.

Problematisch ist die Abbildung eines nicht durchgeführten hydraulischen Abgleichs und die damit verbundene räumliche Einteilung des Gebäudes in Bereiche mit unterschiedlich hohen Leistungsangeboten und ggf. Energieverbräuchen. Diese Effekte können mit keinem der untersuchten Berechnungsverfahren berücksichtigt werden. Auch die Rückkopplung der Regelung im Raum (Schließen der THKV bei Fremdwärmeanfall) auf die Systemtemperaturen einer Heizungsanlage sowie den Fremdwärmenutzungsgrad wird in den üblichen Bilanzverfahren nicht berücksichtigt.

Alle instationären Effekte der Regelung, der Art der Wärmeübergabe (und Gebäudeträgheit) und vor allem der Qualität können – da sie sich in dieser Form auch in der Praxis äußern – als veränderte mittlere Raumtemperaturen, Luftwechsel, Heizzeiten und Systemtemperaturen sichtbar gemacht werden. Vereinfachend ist die Angabe von Differenzenergiemengen denkbar. Einen ähnlichen Ansatz schlägt auch ESDORN im Zusammenhang mit der Erarbeitung der Rechengrundlagen zur Energieeinsparverordnung vor [57].

6.3. Detaillierungsgrad für die Bewertung

Um die Abhängigkeiten zwischen Nutzung, Baukörper und Anlagentechnik darzustellen und Effekte der Qualität und Qualitätssicherung rechnerisch zu erfassen, sind verschiedene Detaillierungsgrade der Energiebilanz vorstellbar:

1. Eine dynamische, gekoppelte Simulation unter Berücksichtigung eines realen oder realitätsnahen Nutzerverhaltens.
2. Eine rechnerische Kennwertbilanz mit mittleren Energiekennwerten.
3. Eine Auswertung von Praxisobjekten zum Zwecke der Typologisierung.

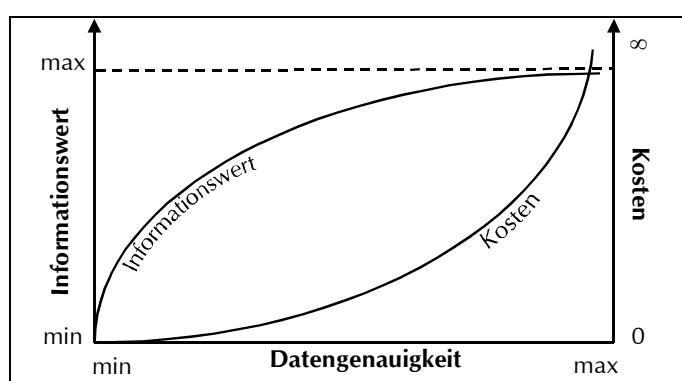


Bild 6-2 Informationswert und Kosten je nach Datengenauigkeit (nach [111])

Mit abnehmender Datengenauigkeit sinken i.d.R. die Kosten für die Datenerhebung und Auswertung, aber auch der Informationswert – vergleiche Bild 6-2. Die Kurven verlaufen nicht proportional, d.h. auch Verfahren mit relativ geringerer Detailtiefe und Datengenauigkeit können einen hohen Informationswert haben. Entsprechend dieses Zusammenhangs soll es Ziel der vor-

liegenden Arbeit sein, Verfahren geringerer Detailtiefe, also Kennwertbilanzen (Kapitel 6.4 und 6.5) und Auswertungen von Feldprojekten (Kapitel 7) heranzuziehen, um den Einfluss der Qualität abzuschätzen.

Simulationsrechnungen

Der Vorteil einer Simulation – gegenüber der vereinfachten Kennwertbilanz – ist die mögliche stärkere Berücksichtigung der Kopplung von Gebäude, Anlagentechnik und Nutzung. Mit entsprechender Rechnerkapazität können instationäre, zonierte Modelle erfasst und ausgewertet werden. Das HANDBUCH FÜR HEIZUNGSTECHNIK äußert sich folgendermaßen: Die rechnerische Betriebssimulation kann damit eine Prognose von Komfort und Energieverbrauch sein, ist jedoch auch mit dem Problem des hohen Eingabeaufwandes und der enormen Fehleranfälligkeit verbunden. Trotzdem können mit geringeren Kosten als bei einer Messung sehr viele Einzelfragen beantwortet werden [22].

Das Ergebnis der Simulation und seine Praxisnähe hängt von zwei entscheidenden Einflussgrößen ab: der Art der Berechnung und der Güte der Eingangsgrößen. Beide Einflüsse auf die Simulation z.B. des Energiebedarfes werden nachfolgend näher erläutert.

Unter der *Art der Berechnung* ist das verwendete Rechenmodell zu verstehen. In der Regel werden physikalische Vorgänge durch die bekannten mathematischen Zusammenhänge (Wärmeleitung, Speicherprozesse, Mischung usw.) ersetzt. Die Dynamisierung der statischen Berechnungsansätze erfolgt durch Wahl entsprechend kleiner Rechenzeitschritte, z.B. eine Berechnung für jede Stunde eines Jahres. Einzelprozesse, wie die instationäre Wärmeleitung durch eine Wand können auch in kleineren Zeitintervallen (z.B. Sekunden) berechnet werden. Da mit der Detaillierung der Datenaufwand und die Rechenzeit steigen, sind dem Verfahren auch bei heutiger Rechnerkapazität Grenzen gesetzt.

Das Ziel der Simulation ist i.d.R. die Untersuchung einer konkreten Fragestellung. Daher werden Bilanzelemente, die für das Ziel von untergeordneter Bedeutung erscheinen, mathematisch/physikalisch vereinfacht oder Kopplungen mit der Umwelt und anderen Komponenten werden rechnerisch ausgeblendet. Beides dient der Minimierung des Rechenaufwandes. Strömungssimulationen beschränken sich aus diesem Grund häufig auf entkoppelte Einraummodelle.

SCHINNERL ET AL [132] berichten über die Simulationsergebnisse sechs unterschiedlicher, in der Praxis etablierter Simulationsprogramme. Bilanziert wird ein Bürogebäude mit gleichen Eingangsbedingungen. Die Ergebnisse von fünf der sechs Programme sind – ohne Nennung der Produktnamen – in der VDI 6020 abgebildet. Die Jahresergebnisse für die Heizenergie schwanken im Bereich von 382 ... 604 MWh, für Kühlenergie im Bereich von 458 ... 554 MWh. Im Heizfall ist also unter gleichen Randbedingungen der maximale Wert etwa 60 % größer als der minimale. Auch der Summenwert des Gesamtenergieverbrauches (Heizung und Kühlung) streut stark. Der Maximalwert liegt 26 % höher als der Minimalwert [132].

Für die Simulation ist eine hohe *Güte der Eingangsgrößen* notwendig. Damit das Simulationsergebnis praxistauglich wird, müssen möglichst alle Eingangsgrößen aus der Praxis entnommen werden. Hier ist in erster Linie die Einschätzung des Nutzerverhaltens im Rahmen der Energiebilanz zu nennen. Wird dieses falsch eingeschätzt, bildet die Simulation das Gesamtverhalten des Gebäudes ebenso fehlerbehaftet ab wie eine Kennwertbilanz. Um den Rechenaufwand zu minimieren werden bei Parameterstudien nur die wichtigen, zu untersuchenden Einflussparameter variiert. Andere Größen werden konstant belassen. Drei Beispiele, sollen in diesem Zusammenhang beschrieben werden.

- ESDORN [56] hält durch Simulation von BACH [12] ermittelte Aufwandszahlen der Wärmeübergabe im Raum von 1,6 für unrealistisch. Der Nutzer greift in diesem Simulationsmodell nicht in die Regelung ein und toleriert Raumtemperaturen von 22 ... 25 °C (Zielwert 20 °C). Ziel der Untersuchungen war allein die Charakterisierung der Güte des Heizsystems und der Regelung – bei konstantem Nutzerverhalten.
- RICHTER, KNABE ET AL [127] bilden in einer Simulation zur Ermittlung der Wärmeübergabeverluste das Lastprofil des Raumes durch ein stark vereinfachtes und dadurch unnatürliches Lüftungsverhalten der Nutzer ab. Ein Ablüften erfolgt erst nach einer Raumtemperaturerhöhung um 3 K, wobei beim Lüften die Heizkörperventile manuell geschlossen werden. Es werden weiterhin ideal isolierte Anbindungsrohre der Heizflächen ohne Verluste angenommen. [127]. Auch hier werden standardisierte Nutzer vorausgesetzt, um Systeme vergleichen zu können.
- EISENMANN [49] vergleicht verschiedene Heizsysteme hinsichtlich der Behaglichkeit, des Energieverbrauchs, der Kosten und anderer Gesichtspunkte. Es erfolgt eine sehr genaue Simulation der Behaglichkeit; Randdaten der Hydraulik sind dagegen unter anderem konstante Rohrreibungsdruckgefälle und Ventilautoritäten. Das Betriebs- und Teillastverhalten (d.h. Massenstromänderung) von Pumpen und Thermostatventilen werden nicht erfasst, Heizkörper sind ideal gemischte Speicher ohne Schichtung, Thermostatventile sind exakt auf die Hälfte des maximalen Hubverhältnisses ausgelegt [49].

Die oben genannten Simulationen dienen jeweils nur der Berechnung einer oder mehrerer Systemeigenschaften – z.B. der Effekte der Wärmeübergabe – unter bestimmten Randbedingungen. Einflüsse einzelner Parameter lassen sich in einer solchen Simulation sehr viel preiswerter als in jeder Feldmessung abbilden. Die Ergebnisse lassen wegen der fest definierten Eigenschaften jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf reale Verhältnisse zu.

BACH ist der Meinung, dass Energieeinsparmaßnahmen nur durch Simulation objektiv beurteilt werden können, Experimente seien zu teuer, Feldversuche nicht reproduzierbar und verallgemeinerbar [181]. Angesichts der oben zitierten zwischen den unterschiedlichen Simulationsverfahren auftretenden Ergebnistoleranzen und in Kenntnis des heute üblichen Abbildes eines Standardnutzers, muss dies bezweifelt werden. Zumindest bedarf es realistischer Aussagen über das Nutzerverhalten, um die Auswirkungen einer Qualitätssicherung – die auch zu den Energieeinsparmaßnahmen gezählt werden kann – einigermaßen praxistgerecht abbilden zu können.

Energiebilanz mit Kennwerten

Zur Vereinfachung des Rechenaufwandes kann eine Kennwertbilanz verwendet werden. Auch in diesem Fall müssen das Rechenmodell physikalisch hinreichend genau und die Wahl der Randbedingungen möglichst praxisnah sein. Die in den etablierten Bilanzverfahren (Kapitel 3.4) beschriebenen Grundrechenmodelle zur Bestimmung der einzelnen Energiekennwerte unterscheiden sich – wegen der gleichen Physik – nur wenig. Die vorhandenen Ansätze können nach einer entsprechenden Anpassung zur Bewertung von QS verwendet werden. Die Wahl der Randbedingungen, vor allem der Nutzung, ist für die Aussagekraft des Ergebnisses entscheidend. Grundsätzlich ist die Frage zu beantworten, ob zwischen den Effekten eines Nutzereinflusses und denen einer Qualitätssicherung der Anlagentechnik differenziert werden kann.

Trotz Wahl praxisnaher Randbedingungen stellen PICKEL und KRETSCHMER [118] fest, dass eine Abweichung von maximal 40 % zwischen Verbrauchs- und bereinigten Bedarfskennwerten in einer Kennwertbilanz noch kein Beleg für falsche Erfassung oder Messgerätefehler ist. Der Unterschied kann vor allem auf nicht stimmende Eingangsdaten in der Bedarfsrechnung und auf ungenaue Rechenverfahren zurückgeführt werden [118]. Eine Kennwertbilanz kann also nur eine Abschätzung des Einflusses der QS sein.

Einfache Energiebilanzverfahren, Feldmessungen und Typologien

Eine sehr praxisnahe Bewertungsmöglichkeit für die Auswirkungen von QS ist die Auswertung von Feldmessungen. Auch hier wird ein gewisser Anteil an Rechenoperationen benötigt, um die Messergebnisse aufzubereiten und interpretieren zu können. Feldmessungen bieten den Vorteil, das Nutzerverhalten praxisgerecht zu beurteilen.

Einfache Energiebilanzverfahren oder Typologien unterscheiden sich von Kennwertbilanzen durch die zusammengefasste Darstellung von Einflüssen als Gesamtkennwerte. Diese Gesamtkennwerte gelten dann für eine bestimmte Klasse von Gebäuden. LOGA hält die Typologisierung für die kostensparendste, wenn auch die ungenaueste Methode der Gebäudeuntersuchung [53]. Bei der Typologisierung von Messwerten hat sich die Angabe von zwei Kennwerten bewährt: die Angabe des Mittelwertes und des Modalwertes (Wert der größten Häufigkeit) [166] [167]. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da Energieverbrauchswerte i.d.R. nicht normalverteilt sind.

6.4. Erweiterter Energiebilanzansatz

Ziel einer modifizierten und aus den bekannten Ansätzen weiterentwickelten Kennwertbilanz ist, die Qualität von Anlagentechnik – gegebenenfalls zusammen mit anderen materiellen und immateriellen Einflussgrößen – als *ein Energiekennwert* (Differenzenergiemenge) sichtbar zu machen. Das Verfahren wird im Folgenden ΔQ -Verfahren genannt. Vorarbeiten sind in [89] und [205] beschrieben.

Das ΔQ -Verfahren ist ursprünglich konzipiert als Bilanzverfahren für die Auswertung von Energieverbrauchswerten. Es kann jedoch auch zur Abschätzung der theoretischen Bandbreite des Einflusses von QS verwendet werden.

Grundidee des ΔQ -Verfahrens

Alle vom Referenzzustand abweichenden, nicht idealen Zustände durch Eingriff der zentralen und dezentralen Regelung, Einspareffekte des eingeschränkten Heizbetriebes etc. drücken sich in veränderten mittleren Innentemperaturen, dem mittleren Luftwechsel, der Heizzeitlänge und mittleren Systemtemperaturen aus [205]. Die Grundidee des Verfahrens ist, die Einflüsse der Regelung, der ggf. fehlenden Qualitätssicherung und anderer instationärer Vorgänge auf den Energieverbrauch als eine Differenzenergiemenge ΔQ – bezogen auf einen Referenzzustand – sichtbar zu machen. Bei der Auswertung von Verbrauchsdaten und bei der Abschätzung von Bedarfswerten wird auf die Verwendung des Fremdwärmenutzungsgrades und der Wärmeübergabeverluste verzichtet.

Verfahrensablauf

Das ΔQ -Verfahren lehnt sich bei der Bestimmung der Energieeinzelkennwerte an die Vorgehensweise anderer Bilanzverfahren an. Es ist eine Energiebilanz für den näherungsweise stationären Zustand eines Gebäudes, dynamische Prozesse werden durch vereinfachte statische Ansätze ersetzt.

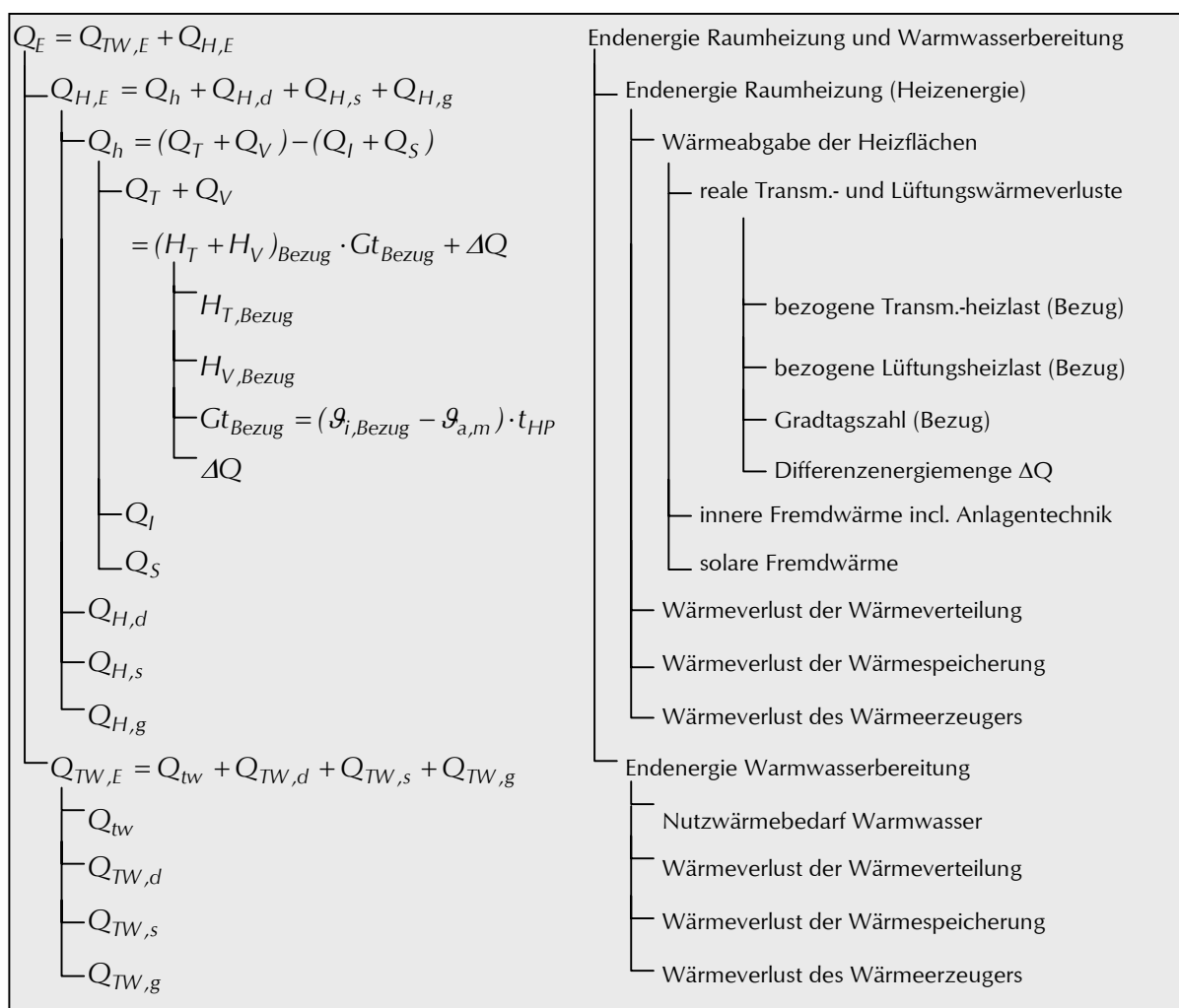


Bild 6-3 Rechenablauf des ΔQ -Verfahrens

Räumlich verteilte Größen werden i.d.R. durch Mittelwerte ersetzt. Für einen definierten Zeitraum werden die Energiegewinne und -verluste der Anlagentechnik und des Gebäudes anhand von Kennwerten und unter Voraussetzung einer bestimmten Nutzung ermittelt. Den Verfahrensablauf sowie eine Erläuterung der Größen und Formelzeichen gibt Bild 6-3 wieder.

Verfahrensbeschreibung für die Verbrauchsbewertung

Die Endenergie Q_E setzt sich aus den Anteilen für Heizung $Q_{H,E}$ und Trinkwarmwasserbereitung $Q_{TW,E}$ zusammen. Erfolgt keine Messung beider Anteile, müssen sie rechnerisch ermittelt werden.

Die Endenergie für Raumheizung $Q_{H,E}$ umfasst die geregelte Wärmeabgabe der Heizflächen Q_h (nicht mit dem Heizwärmebedarf zu verwechseln) sowie die technischen Verluste der Wärmeverteilung $Q_{H,dr}$, Speicherung $Q_{H,s}$ und Erzeugung $Q_{H,g}$. Die technischen Verluste leiten sich – soweit möglich – aus den realen Bedingungen der Anlage und Nutzung ab. Zur Bestimmung der technischen Verluste muss die Länge der Heizzeit bekannt sein. Sie wird vor der Bewertung z.B. anhand der Baualtersklasse, der Gebäudenutzung oder der Reglereinstellung abgeschätzt und kann anhand der berechneten Wärmegewinne und Verluste überprüft werden. Alternativ kann sie am realen Objekt durch Messung bestimmt werden.

Die Endenergie für Trinkwarmwasserbereitung $Q_{TW,E}$ setzt sich zusammen aus der Nutzwärmemenge Q_{tw} und den technischen Verlusten der Wärmeverteilung $Q_{TW,dr}$, Speicherung $Q_{TW,s}$ und Erzeugung $Q_{TW,g}$. Die Kennwerte werden möglichst durch Messung und aus realen Bedingungen (Wasserverbrauch, Leitungslängen, Speichergrößen, Dämmstandards etc.) der Anlagentechnik und Nutzung bestimmt. Fehlende Daten werden durch übliche Energiekennwerte ersetzt.

Die Wärmeabgabe (Fremdwärme) aller Anlagenkomponenten der Heizung und Warmwasserbereitung (Erzeuger, Speicher, Leitungen und ggf. Teile der Nutzwärme) während der Heizzeit und innerhalb des beheizten Bereichs des Gebäudes wird separat bestimmt. Ebenso die solare und innere Fremdwärme aus Personen und dem Verbrauch elektrischer Energie. Sofern verfügbar, sollten dafür reale Stromverbrauchswerte und Personenbelegungen herangezogen werden. Die Wärmeabgabe der Heizflächen Q_h wird bestimmt. In der Verbrauchsbewertung ist sie i.A. ein rechnerischer Wert. Sie ist die Differenz zwischen der bekannten Endenergie der Heizung $Q_{H,E}$ und den technischen Verlusten der Heizung ($Q_{H,dr}$, $Q_{H,s}$ und $Q_{H,g}$). Falls Messwerte für die Wärmeabgabe der Heizflächen vorliegen, kann der rechnerische Wert überprüft werden.

Die Wärmeabgabe der Heizflächen Q_h sowie die gesamte Fremdwärme (Geräte, Personen, Anlagentechnik und Solareinstrahlung) innerhalb der Heizzeit bilden das Wärmeangebot im beheizten Bereich: $Q_T + Q_V$. Das Wärmeangebot muss das Gebäude als reale Transmissions- und Lüftungswärmeverluste wieder verlassen. Die realen Verluste sind – je nach Grad der Qualität der Anlagentechnik und Nutzung – größer als die theoretisch für eine komfortable Nutzung des Gebäudes ausreichenden Bedarfswerte (ausgedrückt in den Größen $H_{T,Bezug}$, $H_{V,Bezug}$ und $G_{t,Bezug}$). Dieser Ansatz zeigt, dass nur eine Gesamtbilanzierung unter Verwendung bisher zur baulichen Bewertung eingesetzter Kenngrößen eine Bewertung der Anlagentechnik, der Nutzung und ihrer Qualitätssicherung ermöglicht.

Die Güte der Anlagentechnik und Nutzung im beheizten Bereich wird in der Größe ΔQ erfasst. Diese Energiemenge ist nach Bild 6-3 die Differenz zwischen den realen Verlusten der Transmission und Lüftung und definierten Bezugswerten. In erweiterter Form können zusätzlich die anlagentechnischen Mehraufwendungen außerhalb des beheizten Bereichs (erhöhte technische Verluste) aufgrund fehlender QS bestimmt werden.

Ausgewählte Bilanzgleichungen

Den Ablauf der Bewertung gibt Bilanzgleichung (6-2) wieder.

$$Q_E = Q_{TW,d} + Q_{TW,s} + Q_{TW,g} + Q_{tw} + Q_{H,d} + Q_{H,s} + Q_{H,g} + (Q_T + Q_V) - (Q_I + Q_S) \quad (6-2)$$

$$Q_E = Q_d + Q_s + Q_g + Q_{tw} + (H_{T,Bezug} + H_{V,Bezug}) \cdot Gt_{Bezug} - (Q_I + Q_S) + \Delta Q \quad (6-3)$$

Durch Umformen und Zusammenfassung der Anlagenverluste sowie Einführung des Terms ΔQ ergibt sich Gleichung (6-3). In dieser Darstellung lässt sich sehr gut erkennen, dass es zur Bestimmung von ΔQ nicht unbedingt notwendig ist, z.B. die Wärmeverluste eines zentralen Wärmeerzeugers zur Heizung und Trinkwarmwasserbereitung Q_g auf die beiden Bereiche aufzuteilen. Die Wärmemenge kann auch als Summenwert in die Bilanz einfließen. Dies ist in zentralen Netzen vorteilhaft, in denen die beiden Energiemengen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung erst hinter einem gemeinsamen Wärmeerzeuger messtechnisch erfasst werden.

Werden die Gleichungen (6-2) und (6-3) für die Verbrauchsanalyse verwendet, ist ΔQ nach Bestimmung aller anderen Energiekennwerte das Ergebnis der Berechnungen.

Verfahrensbeschreibung für die Bedarfsrechnung

Die Bedarfsberechnung unter Berücksichtigung der Qualitätssicherung kann für beliebige Bilanzzeiträume erfolgen. Es werden die gleichen Kennwerte wie in der Verbrauchsbewertung verwendet. Es bestehen für die Bilanzberechnungen zwei Alternativen:

1. Zunächst werden alle Kennwerte bis auf die unbekannte Energiemenge ΔQ für das konkrete Gebäude unter Voraussetzung idealer Anlagentechnik und realistischer Nutzung bestimmt. Der Summenwert ΔQ zur Bewertung der Qualität wird anschließend aus einer Typologie (vgl. Kapitel 7.4.3) entnommen. Alle Energiemengen werden analog Gleichung (6-3) summiert und ergeben den zu erwartenden Verbrauch unter Berücksichtigung der Qualität. Diese Vorgehensweise wird erst möglich, nachdem eine Typologie vorhanden ist. Sie ist dann sehr zeitsparend.
2. Für das Gebäude wird ohne Kenntnis der Differenzenergiemenge ΔQ jeder einzelne Energiekennwert nach Gleichung (6-2) sofort unter Berücksichtigung des Einflusses von QS und der realen Nutzung bilanziert. Die Summation der Differenzenergiemenge zur Berücksichtigung der Qualität entfällt somit, da alle Effekte bereits in den anderen Kennwerten enthalten sind. ΔQ kann aber ggf. nachträglich rechnerisch aus einem Vergleich mit dem idealen oder als realistisch einzuschätzenden möglichen Energiebedarf bestimmt werden. Dieses Verfahren dient dem Aufbau einer Typologie.

Vor- und Nachteile

Das ΔQ -Verfahren zur Auswertung von Verbrauchswerten hat den Vorteil, die Qualität der Anlagentechnik und Nutzung sehr einfach – als Differenzenergiemenge – sichtbar zu machen. Dabei müssen schwer quantifizierbare Effekte (Nachabsenkung, Teilbeheizung, Regelung, Wärmeübergabe, Bauschwere usw.) nicht mit Hilfe von Multiplikatoren (Aufwandszahlen oder Nutzungsgraden) bewertet werden, die aus theoretischen Simulationsprogrammen abgeleitet wurden. Gleiches gilt für alle Effekte einer Qualitätssicherung.

Nachteilig ist die nicht korrekte Bewertbarkeit der Auswirkung von Fremdwärme, sobald im beheizten Bereich ein Überangebot herrscht (Momentanleistung der Fremdwärme übersteigt das zur Aufrechterhaltung der Raumkonditionen notwendige Maß). Dies führt zu einer unvermeidbaren Erhöhung der Raumtemperatur und ggf. des Luftwechsels. Die Energiemenge ΔQ wird aber auf Basis eines Grundbedarfs bestimmt, der voraussetzt, dass jede Temperatur- und/oder Luftwechselerhöhung bzw. Heizzeitverlängerung ein *vermeidbarer* Mehrbedarf ist. Im Einzelfall kann dieser Mehrbedarf ggf. nicht vermieden werden, weder durch ideale Regelung noch durch optimales Nutzerverhalten. Dieser Nachteil wird in Kauf genommen.

Definition eines Grundbedarfs

Die als Vergleichsbasis zur Bildung von ΔQ dienende Rauminnentemperatur (in $G_{t_{\text{Bezug}}}$) und der gewählte Bezugs-Luftwechsel (in $H_{v,\text{Bezug}}$) sind frei wählbar. Die in Kapitel 4.2 genannten Werte für die Raumtemperaturen (20 ... 21 °C) und den Luftwechsel (0,25 ... 0,60 h⁻¹) werden als realistisch angesehen. Wichtige Einflussgrößen für die Raumtemperaturfestlegung sind z.B. die Gebäude- oder Nutzungskategorien (z.B. EFH, MFH) sowie der Dämmstandard des Gebäudes und für den Luftwechsel die Personenbelegungsdichte. Die konkrete Wahl von Werten hängt auch von den Alternativen der Auswertung als Monats- oder Jahresbilanz ab. Die Bezugswerte für die Monate variieren, wobei die geringeren Werte für den Luftwechsel in der Kernheizzeit angesetzt werden.

Anwendung in der Praxis

Das ΔQ -Verfahren konnte im Rahmen von Praxisprojekten an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel angewendet werden und auf Praktikabilität geprüft werden. Einen Auszug der Praxisergebnisse zeigt Kapitel 7.6.

6.5. Bandbreite des Einflusses von QS in der Kennwertbilanz und Definition von Verbrauchstypen

Die aus Felduntersuchungen extrahierten Kennwerte der Anlagentechnik nach Kapitel 5 und der erweiterte Energiebilanzansatz nach Kapitel 6.4 bieten die Möglichkeit, das maximale Verschwendungspotential für Heizenergie heute typischer Gebäude und Anlagen abzuschätzen. Gleichzeitig eröffnet sich damit die Möglichkeit, den Einfluss von Qualitätssicherung der Anlagentechnik sichtbar zu machen. Im Folgenden werden Beispielrechnungen an zwei fiktiven aus Mittelwerten (vgl. Kapitel 5) konstruierten Typgebäuden durchgeführt und daraus allgemeine Aussagen über das Einsparpotential abgeleitet.

Definition von Typgebäuden

Als Typgebäude für den Wohnbau werden ein Einfamilienhaus mit Baujahr vor 1977 und ein Mehrfamilienhaus mit Baujahr nach 1978 definiert. Beide Gebäude werden zentral von einer Pumpenwarmwasserheizung (witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung, Heizkörper, Thermostatventile) und zentraler Trinkwarmwasserbereitung mit Zirkulation versorgt. Die Technikzentrale befindet sich jeweils im unbeheizten Keller. Zur Beschreibung der maximalen Heizlast, aller installierter Leistungen und weiterer Merkmale werden die in Kapitel 5 angegebenen, typischen anlagentechnischen Kenndaten verwendet. Wichtige Merkmale der Gebäude sind in Tabelle 6-3 zusammengestellt. Sie entsprechen jeweils den in der Praxis am häufigsten vorkommenden Eigenschaften. Standardwerte für Fremdwärmeleistung je Person, Feuchteintrag sowie Kennwerte für die passive Solarwärmenutzung werden Tabelle A-2 (Anhang, Seite 213) bzw. Tabelle A-3 (Anhang, Seite 214) entnommen.

Merkm ^{al}	EFH, Baujahr vor 1977	MFH, Baujahr nach 1978	Quelle
beheizte Fläche A_{EB}	156 m ²	840 m ²	Tabelle A-1, Anhang, Seite 210
Anzahl der Heizkörper	12	84	Tabelle 5-2, Seite 75
Belegungsdichte	40 m ² /Person	40 m ² /Person	Tabelle A-3, Anhang, Seite 214
Verhältnis von Hüllfläche zu beheizter Fläche A/A_{EB}	2,0	1,7	Tabelle A-1, Anhang, Seite 210
Raumhöhe	2,5 m	2,5 m	nach [101]
maximale Wärmeerzeugerleistung (bei $\vartheta_{a,min} = -14\text{ °C}$)	134 W/m ²	109 W/m ²	Tabelle 5-11, Seite 112
maximale Heizlast des Gebäudes (bei $\vartheta_{a,min} = -14\text{ °C}$)	86 W/m ²	43 W/m ²	Tabelle 5-2, Seite 75
Heizkörperleistung bei 75/65 °C	162 W/m ²	68 W/m ²	
Steilheit der Heizkurve	1,7	1,5	Tabelle 5-8, Seite 104
Parallelverschiebung der Heizkurve	2 K	7 K	
installierte Pumpenleistung bezogen auf A_{EB}	0,42 W/m ²	0,14 W/m ²	Tabelle 5-7, Seite 101
Leitungslänge des längsten Heizungsstranges	35 m	78,6 m	Bemerkungen zu Gleichung (5-6)
Hydraulischer Widerstand C	0,065 bar·h ² /m ⁶	0,0084 bar·h ² /m ⁶	Gleichung (5-6), Seite 97
Ventilkennwert $k_{V,S}$	0,7 m ³ /h	0,7 m ³ /h	Kapitel 5.2.2
Länge der Trinkwarmwasserleitun- gen im beheizten Bereich bezogen auf A_{EB} (Anteil 70 %)	0,7 · 0,25 m/m ²	0,7 · 0,25 m/m ²	Kapitel 5.6
Temperatur des Trinkwarmwassers	56 °C	58 °C	Tabelle 5-13, Seite 120
längenbezogener Wärmeverlust der Trinkwarmwasserleitungen	0,3 W/(m·K)	0,3 W/(m·K)	Bild A-1, Anhang, Seite 210
Anteil Zirkulationsleitungen	50 %	50 %	nach [45]

Tabelle 6-3 Merkmale von Typgebäuden

Mit den festgelegten Daten ist der maximale mögliche Energieverbrauch der Gebäude festgelegt. Er kann so hoch sein, wie die Komponenten es zulassen, d.h. bis sich eine Leistungsbegrenzung durch eine der anlagentechnischen Komponenten (Erzeuger, Pumpe im Zusammenspiel mit dem Rohrnetz und den THKV, Heizfläche zusammen mit der Vorlauftemperatur und dem Massenstrom) ergibt.

Merkmale nach der Optimierung

Die Kenndaten der Praxis führen zu dem bereits beschriebenen Verschwendungspotential der Anlage, da insgesamt eine Überdimensionierung festzustellen ist. Ausgehend vom Zustand der typischen Anlage erfolgt eine rechnerische Optimierung. Diese umfasst die Verminderung der Wärmeerzeugerleistung, der Pumpenleistung sowie die Anpassung der Heizkurveinstellung. Ein hydraulischer Abgleich wird dafür vorausgesetzt. Alle anderen Kennwerte bleiben gleich.

Die Wärmeerzeugerleistung entspricht nach der Optimierung der maximalen Heizlast. Die elektrische Pumpenleistung wird um den typischen Faktor für die Überdimensionierung (EFH: 3,3 und MFH: 2,3) nach Tabelle 5-7 (Seite 101) vermindert. Die Heizkurve wird soweit abgesenkt, dass die Raumheizlast gerade ausreichend gedeckt werden kann, jedoch kein großer Leistungsüberschuss besteht. Es ergeben sich für das EFH eine Steilheit von 1,1 bei 1 K Parallelverschiebung ($\vartheta_{V,A} = 60 \text{ °C}$ bei $\vartheta_{a,min} = -14 \text{ °C}$) und für das MFH eine Steilheit von 1,0 bei einer Parallelverschiebung von 2 K ($\vartheta_{V,A} = 58 \text{ °C}$ bei $\vartheta_{a,min} = -14 \text{ °C}$).

Möglicher Energieverbrauch

Für die beiden Typgebäude wird der Energieverbrauch innerhalb des beheizten Bereichs (ohne technische Verluste der Anlagentechnik) jeweils drei mal bestimmt:

1. *Anlage nicht optimiert, Nutzer verschwendet*: Maximal möglicher Energieverbrauch bei vorhandener typischer Anlagentechnik. Die Wärmeabgabe der Heizflächen wird rechnerisch bis zur Leistungsgrenze der Technik erhöht. Dies kann die Leistungsbegrenzung des Kessels, der Heizflächen in Verbindung mit der Vorlauftemperatur oder der Pumpe im Zusammenspiel mit dem Verteilnetz und den Ventilen sein.
2. *Anlage optimiert, Nutzer verschwendet nicht*: Vorgehen wie unter 1. bei optimierter Anlagentechnik.
3. *Nutzer verschwendet nicht*: Möglicher Energieverbrauch des Gebäudes bei angepasstem Nutzerverhalten. Hier wird eine Raumtemperatur von 21 °C und ein zum Feuchte- und CO₂-Abtransport notwendiger Mindestluftwechsel (siehe Bild A-9 im Anhang, Seite 216) vorgegeben.

Bilanziert wird über die gesamte Heizzeit, d.h. vereinfachend über alle Tage mit Außentemperaturen $\leq 15 \text{ °C}$. Die Heizzeit wird in drei Zeitabschnitten bilanziert:

1. alle Tage mit Temperaturen $\vartheta_a \leq 5 \text{ °C}$ (115 Tage, mittlere Außentemperatur $\vartheta_{a,m} = 0 \text{ °C}$),
2. alle Tage mit Temperaturen $\vartheta_a > 5 \dots \leq 10 \text{ °C}$ (70 Tage, $\vartheta_{a,m} = 8 \text{ °C}$) sowie
3. alle Tage mit Temperaturen $\vartheta_a > 10 \dots \leq 15 \text{ °C}$ (90 Tage, $\vartheta_{a,m} = 13 \text{ °C}$).

Die Ergebnisse der Energiebilanz zeigt Tabelle 6-4.

Typge- bäude	Tage mit Außen- temperaturen ...	Mittlere Außen- temperatur und Zahl der Heiz- tage	Wärmeverbrauch im beheizten Bereich, in [kWh/(m ² ·a)] (Wert in Klammern: Verhältnis bezogen auf Minimalwert)		
			Maximaler Verbrauch bei nicht optimierter Anlage	Maximaler Verbrauch nach Optimierung der Anlage	Minimaler Verbrauch mit angepasstem Nutzerverhalten
EFH	≤ 5 °C	0 °C, 115 d	257 (2,0)	142 (1,1)	130
	> 5 ... ≤ 10 °C	8 °C, 70 d	94 (2,2)	53 (1,3)	42
	>10 ... ≤ 15 °C	13 °C, 90 d	73 (3,2)	41 (1,8)	23
	≤ 15 °C (Heizzeit)		Σ 425 (2,2)	Σ 235 (1,2)	Σ 195
MFH	≤ 5 °C	0 °C, 115 d	133 (2,4)	66 (1,2)	56
	> 5 ... ≤ 10 °C	8 °C, 70 d	58 (4,1)	25 (1,8)	14
	>10 ... ≤ 15 °C	13 °C, 90 d	56 (5,6)	21 (2,1)	1
	≤ 15 °C (Heizzeit)		Σ 247 (3,4)	Σ 112 (1,6)	Σ 72

Tabelle 6-4 Wärmeverbrauch im beheizten Bereich für zwei Typgebäude

Mit heutiger installierter Anlagentechnik kann je nach Gebäude das Zwei- bis Dreifache der Energiemenge abgegeben werden, die das Gebäude im minimalen Fall mit angepasstem Nutzerverhalten benötigt. Aus Tabelle 6-4 lassen sich folgende Aussagen ableiten.

- Eine Optimierung der Anlagentechnik mindert das Abgabepotential der Anlage deutlich. Es liegt jedoch immer noch deutlich über dem minimalen Verbrauch, so dass ausreichend komfortable Luftwechsel und Raumtemperaturen erreicht werden können.
- Der Effekt einer QS macht sich deutlicher bemerkbar in Gebäuden mit höheren baulichen Wärmeverlusten bzw. mit geringeren Anteilen von Fremdwärme. Hier bestimmt die Wärmeabgabe der Heizflächen den Verbrauch maßgeblich, nicht der Fremdwärmeanfall
- Der Effekt der QS ist deutlicher in der Kernheizzeit zu bemerken. In der Übergangszeit bestimmt der Fremdwärmeanfall den Verbrauch, das Abgabepotential der Anlagentechnik wäre nicht notwendig, ist aufgrund der Einstellung der Regelung (Heizkurve, Heizgrenze) jedoch trotzdem vorhanden.

Ein Vergleich mit Berechnungen von MÜGGE [173] bestätigt die Tendenz. Er untersuchte 48 baugleiche EFH und ermittelte ein Verhältnis von maximalem zu minimalem Verbrauch von etwa 2,0 [173]. Dabei entsprechen die Randbedingungen für den minimalen Verbrauch etwa den Tabelle 6-4 zugrundeliegenden Randdaten für optimales Nutzerverhalten.

Die technischen Verluste außerhalb des beheizten Bereiches werden hier nicht vertieft untersucht. Die Tendenz ist jedoch: eine Optimierung vermindert die Systemtemperaturen und den Energieverbrauch innerhalb des beheizten Bereiches. Daher werden auch die technischen Verluste entsprechend sinken. Die durchgeführte Abschätzung ist eine Näherung auf Basis von Kennwertbilanzen. Eine genauere Untersuchung mit Berücksichtigung der zeitlichen und räum-

lichen Verteilung des Energieverbrauchs erfordert eine Simulation, v.a. des Nutzerverhaltens und des hydraulischen Abgleichs.

Energieverbrauchstypen

Ableitet aus den Erkenntnissen der Energiebilanz für die Typgebäude EFH und MFH lassen sich *Energieverbrauchstypen* von Gebäuden definieren. Diese unterscheiden sich dahingehend, dass eine Optimierung bzw. QS der Anlagentechnik andere Effekte auf den Energieverbrauch hat und ggf. daher unterschiedliche Optimierungsstrategien angewendet werden müssen. Erläuterungen für drei Energieverbrauchstypen liefert Tabelle 6-5 und Bild 6-4.

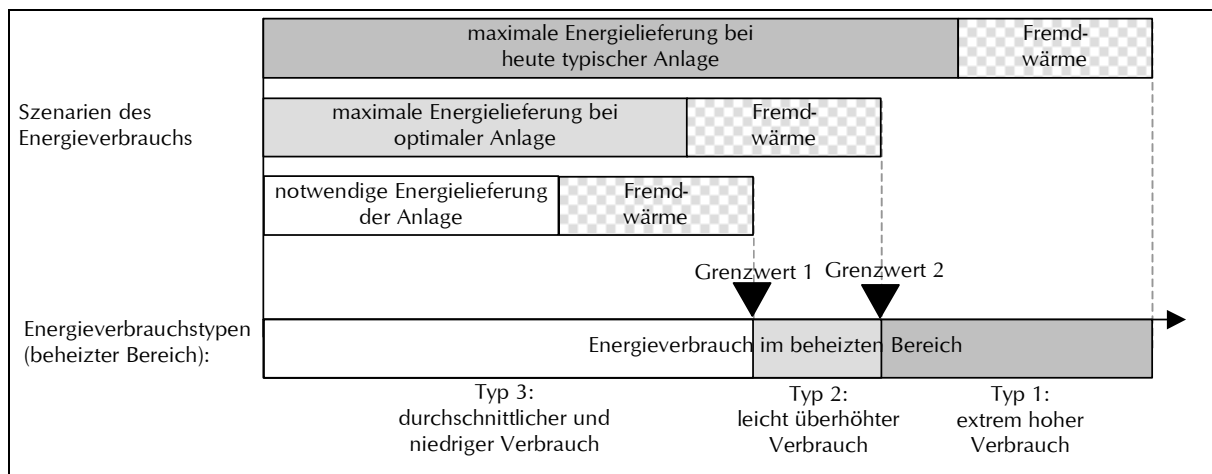


Bild 6-4 Energieverbrauchstypen

Energieverbrauchstyp		Merkmale
Typ 1	extrem hoher Verbrauch mit Nutzung des Verschwendungspotentials der Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> Verglichen mit ähnlichen Gebäuden (Dämmstandard, Anlage, Nutzung) liegt ein sehr hoher Verbrauch vor. Dieser könnte mit einer qualitätsgesicherten Anlage und der dann vorhandenen Leistungsbegrenzung nicht erreicht werden. Das gebotene Verschwendungspotential wird genutzt. Eine Optimierung der Anlagentechnik führt hier insgesamt zu einer Drosselung des Energieverbrauchs innerhalb des beheizten Bereichs sowie einer Minderung der technischen Verluste.
Typ 2	leicht überhöhter, jedoch auch mit optimierter Technik erreichbarer Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> Verglichen mit anderen Gebäuden liegt ein leicht überhöhter Verbrauch vor. Dieser könnte jedoch auch mit optimierter Anlagentechnik erreicht werden. Das Nutzerverhalten ist nicht optimal: trotz ausreichend vorhandener Fremdwärme, wird die Leistung der Anlage beansprucht. Eine Optimierung der Anlage kann hier nur in Verbindung mit einer Nutzerschulung größere Einsparungen bewirken. Im Einzelfall tritt nur eine Effizienzverbesserung (Verminderung technischer Verluste) ein.
Typ 3	durchschnittlicher oder unterdurchschnittlicher Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> Das Nutzerverhalten ist trotz eines ggf. vorhandenen Verschwendungspotentials der Anlage optimal. Eine Optimierung der Anlagentechnik kann hier nur die Effizienz der Anlage verbessern.

Tabelle 6-5 Definition von Energieverbrauchstypen

Der Energieverbrauchstyp 2 ist vor allem unter den neuen Gebäuden bzw. den baulich sanierten Gebäuden mit geringer Transmissionsheizlast zu finden. Hier können vorhandene Fremdwärmeleistungen große Anteile der nutzungsbedingten Verluste decken. Da die Leistungsbemessung und Regelung des Anlagensystems jedoch für einen Zustand ohne Fremdwärme erfolgt, steht praktisch immer mehr Leistung als notwendig zur Verfügung. Das Verschwendungspotential entspricht also auch bei optimierter Anlage etwa dem Fremdwärmeangebot (siehe auch [110]). Es kann bei heute üblicher Regelung nicht weiter minimiert werden; dies würde eine lastabhängige Regelung erfordern, die auftretende Fremdwärme erkennt.

Fazit dieser Betrachtung ist: die Optimierung der Anlagentechnik hat umso größere Effekte, je geringer der Anteil von Fremdwärmelasten in einem Gebäude ist. In nachträglich gedämmten Gebäuden mit großen Mengen ungedämmt verlaufender Leitungen auf hohem Temperaturniveau (Trinkwarmwasserleitungen, Einrohrheizung) muss eine Qualitätssicherung mit der nachträglichen Dämmung der Leitungen beginnen. Eine Verminderung des Leistungsangebotes (Verschwendungspotentials) der Heizflächen unter die üblichen Auslegungsleistungen sollte jedoch generell nicht erfolgen, da dann die Aufheizung nicht mehr sichergestellt werden kann.

Trotz der Effekte der Fremdwärme kann eine QS der Anlagentechnik auch in Gebäuden des Typs 2 und 3 eine Verminderung der Wärmeabgabe im beheizten Bereich erwirken. Dies erfolgt durch Verminderung von punktuell hohen Einzelverbräuchen, z.B. durch versehentliches Ablüftungen von Wärme bei gekippten Fenstern. Durch die Leistungsbegrenzung der Heizkörper wird die Verschwendung vermindert. In der Kennwertbilanz kann dies wegen der räumlichen und zeitlichen Mittelung der Kennwerte i.A. nur schwer sichtbar gemacht werden. Die Verminderung der Wärmeverluste zeigt sich jedoch bei der Verbrauchsauswertung in der Praxis.

Auf diesen Erkenntnissen beruhende Handlungsempfehlungen für die Optimierung und Nutzerschulung finden sich in Tabelle 9-1 (Kapitel 9.2).

Zuordnung von realen Gebäuden zu Energieverbrauchstypen

Die Zuordnung eines realen Gebäudes zu einem der drei Energieverbrauchstypen erfordert zunächst die Berechnung bzw. Abschätzung der beiden Grenzkennwerte (Energieverbräuche), welche die Typen 1 und 2 bzw. 2 und 3 trennen. Für das Gebäude sind zu bestimmen:

1. Die vorhandene innere und solare Fremdwärme aufgrund der Personenbelegung, der Solareinstrahlung und der Wärmeabgabe von Trinkwarmwasserkomponenten innerhalb der Heizzeit, vereinfacht unterhalb einer Heizgrenze von 15 °C. Hier kann auf Standardwerte zurückgegriffen werden. Geeignet ist die Abschätzung der Fremdwärme aufgrund von Monatsmesswerten nach dem in Kapitel 7.2.2 beschriebenen Vorgehen.
2. Die vorhandene Transmissionsheizlast H_T , z.B. aus einer Heizlastberechnung.
3. Das beheizte Luftvolumen.
4. Die Gradtagszahlen $Gt_{20,15}$ für das Untersuchungs Jahr, in dem Vergleichsmesswerte vorliegen.
5. Der real vorhandene Wärmeeintrag in den beheizten Bereich, der sich aus Messwerten ergibt. Hier sind ggf. die Wärmeverluste außerhalb des beheizten Bereichs abzuziehen.

Der *Grenzwert für den durchschnittlichen Verbrauch (Grenzwert 1)* ist der für das Gebäude minimale notwendige Wärmeverbrauch im beheizten Bereich unter Voraussetzung von Standardnutzungsdaten (Innentemperatur und Luftwechsel). Dabei werden die real vorhandenen Werte für die Transmissionsheizlast, das beheizte Luftvolumen und die Gradtagszahl im Untersuchungsjahr verwendet. Der notwendige Luftwechsel wird mit Standardwerten, z.B. $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Die Berechnung ist eine Bedarfsrechnung der Wärmeverluste für Transmission und Lüftung.

Der *Grenzwert für den leicht erhöhten Verbrauch (Grenzwert 2)* ist der für das Gebäude durch die Wärmeabgabe einer optimierten Anlage und der zusätzlichen Fremdwärmeeinträge erreichbare Wärmeverlust des beheizten Bereiches. Er wird bestimmt, indem die vorhandene Fremdwärme und die maximale Energielieferung einer optimierten Anlage addiert werden. Die Energielieferung der Anlage ist vereinfacht das Produkt aus der Gradtagszahl $Gt_{20,15}$ des Untersuchungsjahres und der bezogenen Heizlast H_{T+V} . Die Einzelgrößen H_T und H_V entstammen den vorher erhobenen Gebäudedaten, wobei ein minimaler Luftwechsel, z.B. $n_{min} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ (Heizlastberechnung), zur Bestimmung von H_V verwendet wird.

Ein Zwangswärmekonsum (z.B. ungewolltes Ablüften von Wärmeverteilverlusten in Abluft-räumen o.ä.) sollte bei der Bestimmung der Wärmeabgabe der optimierten Anlage überschlägig berücksichtigt werden.

Der Istwert des Gebäudes zur Eingruppierung wird folgendermaßen berechnet: Zum gemessenen Energieverbrauch des Gebäudes ist die Fremdwärme zu addieren. Der so bestimmte Kennwert ist mit den beiden Grenzwerten zu vergleichen und das Gebäude damit einzuordnen. Die Bereinigung entfällt, weil die Grenzwerte mit realen Wetterdaten berechnet wurden.

7. Feldmessungen zur Quantifizierung von Einsparpotentialen

Aus Felduntersuchungen können reale Bandbreiten des Einflusses einer QS abgeleitet werden. Der theoretisch denkbare Bereich bei maximaler Nutzung des Verschwendungspotentials nach Kapitel 6.5 wird damit praxisnah eingeschränkt. Nachfolgend werden Ansätze zur Analyse konkreter Objekte beschrieben. Durch Auswertungen nach diesem Vorgehen können Typologien aufgebaut werden. Diese liefern Energiekennwerte für Objekte, für die noch keine Verbrauchsdaten vorliegen bzw. die aus Kostengründen keiner genauen Analyse unterzogen werden sollen [66]. Das Vorgehen bei der Messwertauswertung zeigt Bild 7-1.

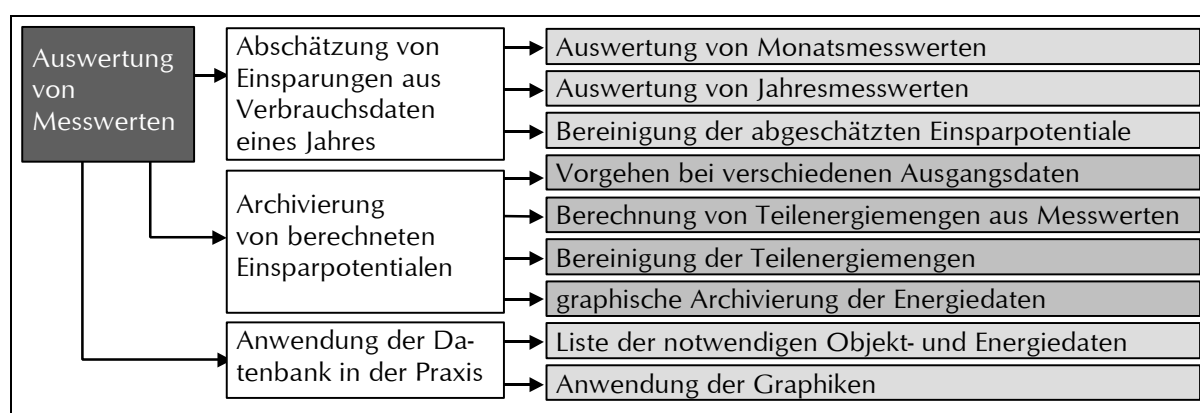


Bild 7-1 Auswertung von Messdaten

7.1. Allgemeine Hinweise zum Bilanzverfahren

Im Folgenden wird die erweiterte Energiebilanz (ΔQ -Bilanz) nach Kapitel 6.4 an die Auswertung von realen Objekten angepasst. Dazu werden an einzelnen Stellen Vereinfachungen getroffen.

Soll das Einsparpotential durch QS aus Verbrauchsmessungen abgeschätzt werden, gibt es verschiedene Vorgehensweisen, von denen drei im Folgenden detaillierter vorgestellt werden.

1. Vergleich der Energieverbrauchsdaten von zwei Stichprobenmengen von Gebäuden mit jeweils gleichen (zu definierenden) Hauptmerkmalen. Dabei hat die eine Gruppe keine QS erfahren, während die andere Gruppe optimiert ist. Die optimierten Gebäude können weiterhin unterschieden werden in Bestandsgebäude mit nachträglicher QS und neue Gebäude, die bereits unter Beachtung der Qualitätssicherung erstellt worden sind.
2. Vergleich des Energieverbrauchs konkreter Objekte vor und nach einer Optimierung. Die Gruppe der Gebäude, die bereits unter Beachtung der QS erstellt werden, muss weiterhin wie unter 1. gesondert untersucht werden.
3. Abschätzung des Einsparpotentials für einzelne Objekte anhand monatlicher und/oder jährlicher Verbrauchswerte – ohne QS bzw. Optimierung.

Notwendige Messwerte

Zur Abschätzung oder Berechnung des Einsparpotentials für ein konkretes Objekt müssen dessen Verbrauchsdaten vorliegen. Die Verwendung von Monatsmesswerten ist unbedingt empfehlenswert, denn diese liefern detaillierte Hinweise über die bauliche Qualität sowie die Qualität der Anlage und Nutzung. Folgende Größen sollten über ein Jahr erfasst werden (vgl. Bild 7-2):

- die primär (dem Erzeuger) zugeführte Energiemenge,
- die vom Erzeuger abgegebene Wärmemenge für Heizung (Nutzen und Verluste),
- sofern vorhanden die vom Erzeuger abgegebene Wärmemenge für die zentrale Trinkwarmwasserbereitung (Nutzen und Verluste) und
- die Witterungsdaten.

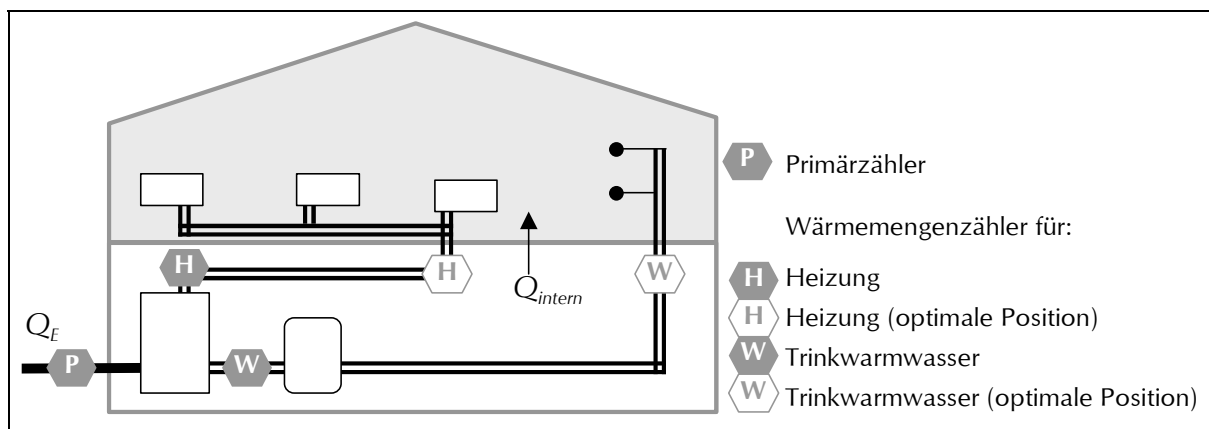


Bild 7-2 Position zentraler Zähler im Gebäude

Vereinfachungen der Bilanz

Grundsätzlich müssen für ein Gebäude zwei Energiemengen unterschieden und bestimmt werden: die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich und die anlagentechnischen Verluste außerhalb des beheizten Bereichs. Für beide Bereiche wird ein Einsparpotential ΔQ bestimmt. Die Berechnung beider Werte aus Verbrauchsdaten wird nachfolgend anhand der Bilanzansätze des ΔQ -Verfahrens nach Kapitel 6.4 erläutert

Wärmezufuhr der Heizung in den beheizten Bereich Q_{intern}

Fehlende Qualitätssicherung kann sich in erhöhten Raumtemperaturen, Luftwechsell und verlängerten Heizzeiten ausdrücken. Um dieses Potential aufzudecken, muss für ein konkretes Objekt die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich bekannt sein, siehe Gleichung (7-1). Die Wärmezufuhr Q_{intern} enthält alle Wärmemengen, die das Heizungssystem geregelt über die Heizflächen (Q_h) oder unregelt über wärmeführende Komponenten im beheizten Bereich ($Q_{H,d,beheizt}$, $Q_{H,s,beheizt}$, $Q_{H,g,beheizt}$) abgibt - vgl. Bild 7-2.

$$\begin{aligned} Q_{intern} &= Q_h + Q_{H,d,beheizt} + Q_{H,s,beheizt} + Q_{H,g,beheizt} \\ &= Q_{H,E} - Q_{extern} \end{aligned} \quad (7-1)$$

Die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich kann auch ohne separate Ausweisung der Einzelanteile für Q_{hr} , $Q_{H,d,beheizt}$ usw. indirekt bestimmt werden. Dazu werden ausgehend von einem Zählermesswert vor oder hinter (empfohlen) dem zentralen Wärmeerzeuger alle Wärmeverluste von Leitungen, ggf. Heizungspufferspeichern oder des Erzeugers, die im unbeheizten Bereich und bei der Wärmeumwandlung anfallen (Q_{extern}), bestimmt. Durch Differenzbildung des Messwertes und der technischen Verluste im unbeheizten Bereich ergibt sich die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich. Diese Vorgehensweise empfiehlt sich, da in der Praxis praktisch nie Messwerte für die Wärmeabgabe der Heizflächen vorhanden sein werden.

Mögliche Rechenverfahren zur Abschätzung der technischen Verluste auf Basis des ΔQ -Verfahrens sind in [205] beschrieben. Der Wert Q_{intern} eines Objektes wird benötigt, um beispielsweise mit Hilfe einer Typologie das Einsparpotential ΔQ_{intern} abschätzen zu können. Er muss noch bereinigt werden (siehe Kapitel 7.3.2).

Technische Verluste der Komponenten im unbeheizten Bereich Q_{extern}

Einsparpotentiale im unbeheizten Bereich liegen in der Verminderung der Wärmeverluste von Leitungen und Speichern aufgrund veränderter Systemtemperaturen, Heizzeiten und/oder verbesserter Dämmung sowie in geringeren Wärmeverlusten von Erzeugern. Für den Wärmeverbrauch der Heizungskomponenten, der nicht im beheizten Bereich wirksam wird, gilt Gleichung (7-2).

$$Q_{extern} = Q_{H,d,unbeheizt} + Q_{H,s,unbeheizt} + Q_{H,g,unbeheizt} + Q_{H,g,Umwandlung} \quad (7-2)$$

Die Energiemengen Q_{extern} und Q_{intern} ergeben zusammen den Endenergieverbrauch der Heizung $Q_{H,E}$. Aus dem Kennwert Q_{extern} lässt sich das Einsparpotential ΔQ_{extern} ableiten.

7.2. Abschätzung von Einsparpotentialen ohne Optimierung

Ziel des in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahrens ist, aus den Verbrauchsmesswerten eines Jahres auf das Verschwendungspotential und damit auf das mögliche Einsparpotential eines Gebäudes durch QS zu schließen. Das untersuchte Gebäude muss dabei keiner Optimierung unterzogen werden. Sinnvoll ist jedoch die Auswertung von Monatsmesswerten, da diese genaueren Aufschluss über die zeitliche Verteilung des Verbrauchs geben können.

Die (monatlichen) Messintervalle werden der Kernheizzeit oder der Übergangszeit zugeordnet. Die *Kernheizzeit* ist im Rahmen dieser Arbeit als Zeit von November bis einschließlich März definiert. Innerhalb dieser Zeit kann außer bei Passivhäusern von einer Vollbeheizung ausgegangen werden. Die Mitteltemperatur aller Tage der Kernheizzeit liegt näherungsweise unterhalb der Heizgrenztemperatur. Zur *Übergangszeit* zählen die Monate September, Oktober, April und Mai. Diese Teilung des Jahres lehnt sich an die Untersuchungen von REIß ET AL an, in der eine Winterperiode von November bis Februar definiert ist [121].

7.2.1. Auswertungsdiagramme und deren Aussagekraft

Aus der Auftragung der monatlichen Messwerte bzw. daraus abgeleiteter Energiekennwerte in Diagrammen können Aussagen über das Einsparpotential getroffen werden.

Darstellung von Monatsmesswerten im \dot{Q}_g -Diagramm

Die aussagekräftigste Darstellungsmöglichkeit monatlicher Messwerte ist das \dot{Q}_g -Diagramm. Die mittlere monatliche Heizleistung, die sich aus den Verbrauchsdaten in der Messzeit ergibt, wird über der mittleren Außentemperatur aufgetragen. Die aufgetragene Leistung ergibt sich aus dem Verbrauch (kWh/Zeitintervall) bezogen auf die Heizzeit (Stunden/Zeitintervall). Diese Auftragung ist sinnvoll, da Messintervalle bei manueller Ablesung unterschiedlich lang sind.

Der auszuwertende Verbrauch ist die Wärmezufuhr der Heizungsanlage in den beheizten Bereich Q_{intern} nach Gleichung (7-1). Der Kennwert Q_{intern} umfasst keine Wärmezufuhr der evtl. vorhandenen zentralen Trinkwarmwasserbereitung. Werte eines Beispielhauses [158] [205] finden sich in Bild 7-3.

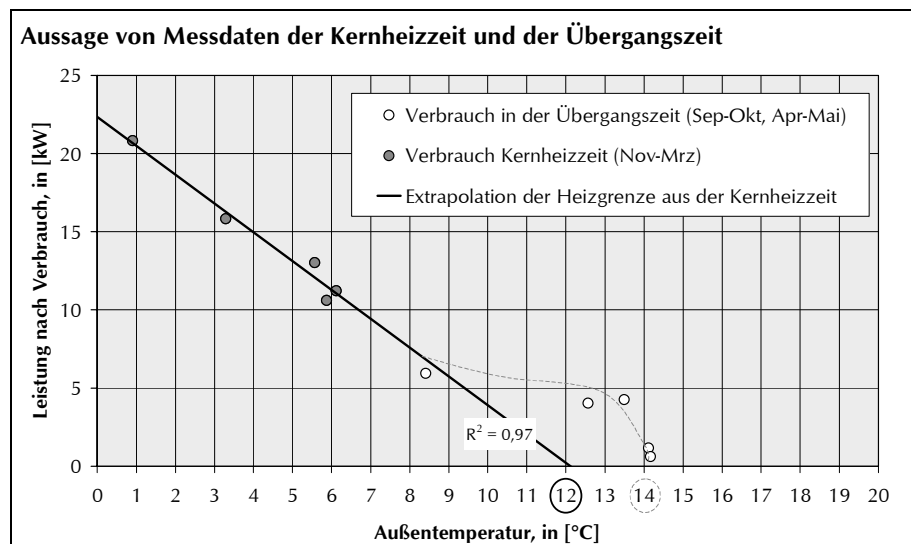


Bild 7-3 Auftragung der mittleren Leistung über der Außentemperatur

Erreichbare Heizgrenze und Mehrverbrauch in der Übergangszeit

Im \dot{Q}_g -Diagramm werden zunächst die Messpunkte gekennzeichnet, die zur eingangs definierten Kernheizzeit gehören (alternativ können Messzeiträume herangezogen werden, deren mittlere Außentemperatur unterhalb der mittleren Außentemperatur der gesamten Heizzeit liegt). Es sollten mindestens 4 Messpunkte vorhanden sein, um eine hinreichende Genauigkeit zu erreichen [33]. Verbindet man diese Punkte durch eine Regressionsgerade, ergibt sich als Schnittpunkt mit der Abszisse ein Wert für die Heizgrenze. Im Beispielgebäude nach Bild 7-3 läge diese bei etwa $\vartheta_{HG} = 12 \text{ °C}$.

Die zusätzlich eingetragenen Leistungen der Monate in der Übergangszeit liegen im Beispiel deutlich höher als der Trend der Kernheizzeit. Dies spricht für einen Mehrverbrauch durch

Ablüften. Da die bezogene Transmissionswärmeleistung H_T in Kern- und Übergangszeit annähernd gleich ist, muss auf erhöhte Lüftung geschlossen werden. Blicke der Luftaustausch annähernd gleich, müsste die Kurve in der Übergangszeit sogar noch steiler abfallen und die Heizgrenze früher erreicht sein, denn der solare Fremdwärmeeintrag steigt in der Übergangszeit. Die Bestimmung der Heizgrenze aus Messdaten erfolgt auch bei Auftragung der Endenergie (unter Berücksichtigung technischer Verluste außerhalb des beheizten Bereiches) noch hinreichend genau [158].

Maximale Leistung

Das \dot{Q}, ϑ -Diagramm und die Trendkurve der Kernheizzeit kann weiterhin zur Abschätzung einer Maximalleistung für das Gebäude verwendet werden. Extrapoliert man die Kurve bis zur Auslegungsaußentemperatur, ergibt sich die maximale Leistung unter Berücksichtigung der Fremdwärmeeinträge. Im Bild 7-4 beträgt die Leistung $\dot{Q}_{max, mess, mitFW} = 48 \text{ kW}$. Eine parallele Verschiebung der Geraden durch eine gewählte Referenzraumtemperatur (z.B. $20 \text{ }^\circ\text{C}$) ergibt die maximale Leistung ohne Fremdwärmeeinfluss, hier $\dot{Q}_{max, mess, ohneFW} = 63 \text{ kW}$.

Beide Leistungswerte ergeben sich, sofern das Nutzerverhalten und die Fremdwärmeeinflüsse im gesamten "Kernwinter" (Temperaturen hier im Mittel unter $6 \text{ }^\circ\text{C}$) als etwa gleichmäßig anzusehen sind. Obwohl dies mit typischem Nutzerverhalten nicht bis zu extremen Außentemperaturen der Fall sein wird, lässt sich mit dieser Auswertung überprüfen, ob das Gebäude ein "Vielverbraucher" ist. Dazu sollte als Vergleichswert die Heizlast bzw. die minimal erforderliche Erzeugerleistung \dot{Q}_{min} bekannt sein. Liegt diese unterhalb der gemessenen Leistung $\dot{Q}_{max, mess, ohneFW}$ kann von erhöhten Nutzeranforderungen ausgegangen werden.

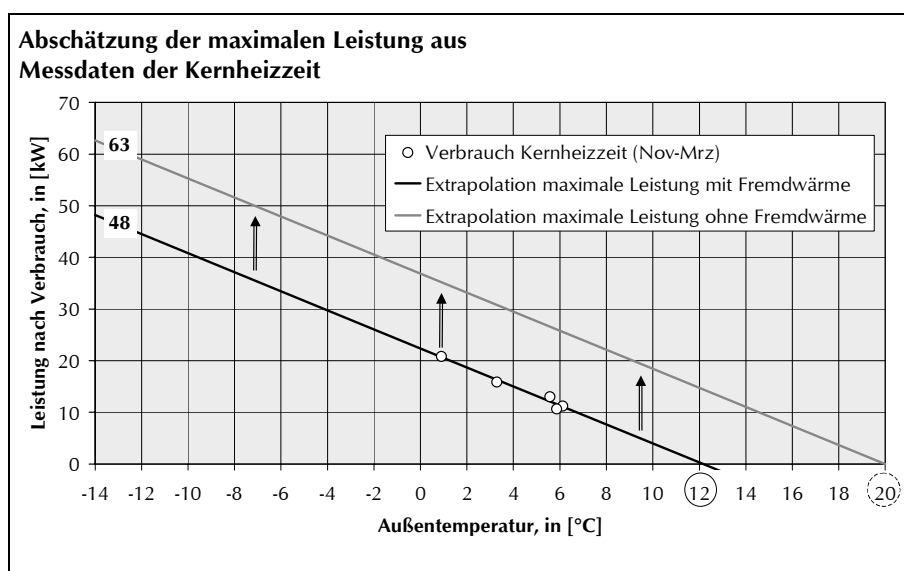


Bild 7-4 Maximale Leistung mit und ohne Fremdwärmeeinfluss

Die notwendige Auslegungsleistung (Spitzenleistung), die maximal in diesem Gebäude zu erwarten ist, kann sich von $\dot{Q}_{max, mess, ohneFW}$ unterscheiden, da hier mit Monatswerten operiert wird. Ein Verfahren zur Bestimmung der Auslegungsleistung aus einer 12-tägigen Messung beschreibt FARAGÓ [58].

Bezogene Heizlast

Neben den Schnittpunkten mit Ordinate und Abszisse liefert auch die Steigung der Regressionsgeraden einen wichtigen Energiekennwert, die bezogene Heizlast H_{T+V} als Summenwert. Diese Messgröße kann als Vergleichswert zu einer theoretisch, z.B. im Rahmen der Energiebilanz nach der Energieeinsparverordnung, bestimmten bezogenen Heizlast herangezogen werden.

Verhältnis der Fremdwärme zu den Verlusten

Die Messdaten der Kernheizzeit liefern darüber hinaus eine Möglichkeit, die Höhe der Fremdwärme in der Kernheizzeit abzuschätzen. Die aus den Messwerten der Kernheizzeit extrapolierte Heizgrenze ist die Außentemperatur, ab der keine aktive Beheizung mehr notwendig wäre. Das bedeutet, die Zufuhr von Wärme in den beheizten Bereich Q_{intern} ist nur unterhalb der Heizgrenze ϑ_{HG} notwendig – Gleichung (7-3). Die bezogene Transmissions- und Lüftungsheizlast H_{T+V} wird oberhalb der Heizgrenze allein durch die innere und solare Fremdwärme Q_{I+S} (incl. Anteilen aus der Trinkwarmwasserbereitung) gedeckt – Gleichung (7-4).

$$H_{T+V} \cdot (\vartheta_{HG} - \vartheta_a) \cdot t = Q_{intern} \quad (7-3)$$

$$H_{T+V} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{HG}) \cdot t = Q_{I+S} \quad (7-4)$$

$$Q_{I+S} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{HG}}{\vartheta_{HG} - \vartheta_a} \cdot Q_{intern} \quad (7-5)$$

$$Q_{T+V} = Q_{intern} + Q_{I+S} \quad (7-6)$$

Aus dem bekannten Messwert für die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich kann mit Gleichung (7-5) die Fremdwärmemenge (bzw. die mittlere Fremdwärmeleistung) und mit Gleichung (7-6) die Summe aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten in der Kernheizzeit abgeschätzt werden. Dieses Verfahren kann verwendet werden, um aus Messwerten der Kernheizzeit die mittlere Lüftungsheizlast H_V und die ungefähre Höhe der Fremdwärme Q_{I+S} (incl. Anteilen aus der Trinkwarmwasserbereitung) zu bestimmen. Der Wert für H_T ist dabei sinnvoll abzuschätzen; vorteilhaft ist ein vorhandener Wärmeschutznachweis.

Abschätzung von Energiekennwerten durch Nachbildung der "Leistungsgeraden"

Das vorher beschriebene Verfahren kann noch erweitert werden, um Bandbreiten oder konkrete Mittelwerte für die Innentemperatur ϑ_i , die Fremdwärmeleistung \dot{Q}_{I+S} und den Luftwechsel n in der Kernheizzeit sowie den mittleren U-Wert U_m zu bestimmen. Dazu wird die Gleichung (7-7) aufgestellt. Ziel ist, die freien Parameter dieser Gleichung für die Kernheizzeit so festzulegen, dass die Kurve der realen Messergebnisse möglichst genau nachgebildet wird.

$$\dot{Q}_{intern} = (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot (U_m \cdot A + n \cdot \rho \cdot c_p \cdot V) - \dot{Q}_{I+S} \quad (7-7)$$

Die Größen ϑ_a , $\rho \cdot c_p$ (Stoffwerte der Luft), die Hüllfläche A und das Luftvolumen V des Gebäudes werden als bekannt vorausgesetzt. Ein mittlerer Luftwechsel und der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient, d.h. die Veränderung der bezogenen Last H_{T+V} bestimmen die Steilheit der Kurve. Eine Variation der Innentemperatur oder der Fremdwärmeleistung verschiebt die Ergebniskurve

\dot{Q}_{intern} parallel nach oben und unten. Es lassen sich also jeweils Paare " \mathcal{G}_i und \dot{Q}_{i+s} " sowie " n und U_m " finden, für welche die nachgebildete Leistungskurve genau deckungsgleich mit der Linie (Regressionsgeraden) der Messwerte liegt.

Ist jeweils eine der Größen eines Paares hinreichend genau bekannt, kann auf den anderen Wert geschlossen werden. Kann also z.B. die Innentemperatur – durch Messung oder aus anderen Untersuchungen – recht genau abgeschätzt werden, ergibt sich die Fremdwärmeleistung aus dem Messwerten und umgekehrt. Gleiches gilt für den Luftwechsel n und den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U_m . Die für die Kernheizzeit ermittelten Werte können Aufschluss über die Verhältnisse in der Übergangszeit und über mögliche Einsparpotentiale geben. Ein Anwendungsbeispiel ist in Kapitel 7.6 aufgeführt.

Darstellung von Monatswerten im H, \mathcal{G} Diagramm

Eine weitere Darstellung der Messwerte ist die Auftragung im H, \mathcal{G} Diagramm. Die aus Messdaten bestimmten Leistungswerte werden dazu zusätzlich auf die Temperaturdifferenz "Heizgrenze – Außentemperatur im Messzeitraum" bezogen. Die Heizgrenztemperatur ergibt sich aus den Daten der Kernheizzeit wie oben beschrieben (Bild 7-3, Seite 149). Die bezogene Last H kann zusätzlich auf die Fläche oder das Volumen bezogen werden.

Für das Beispielgebäude ergibt sich die Auftragung in Bild 7-5. Erkennbar ist das recht gleichmäßige Verbrauchsverhalten bis etwa $8,5^\circ\text{C}$ Außentemperatur. Dies bestätigt den prinzipiellen Zusammenhang der Gleichungen (7-3) bis (7-6). An den wärmeren Tagen der Übergangszeit ist die Last nicht mehr zur Außentemperatur proportional. Statt eines Abfalls, wie er aufgrund vermehrter solarer Fremdwärme zu erwarten wäre, steigt die Last H stark an.

Diese Darstellung wird in begleitenden Untersuchungen als sogenannter *Kurzcheck der Verbrauchsdaten* bezeichnet und getestet [205].

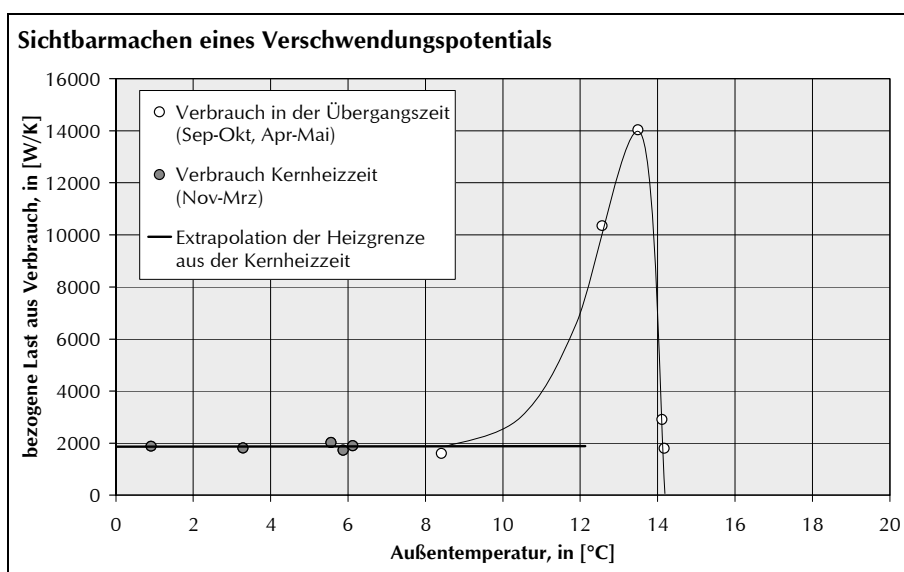


Bild 7-5 Auftragung der mittleren bezogenen Last über der Außentemperatur

Übertragung der Heizlast der Kernheizzeit auf die Übergangszeit

Die beschriebenen Auswertungen von Messdaten implizieren, dass die aus der Kernheizzeit extrapolierte Heizgrenztemperatur im realen Gebäude erreichbar ist. Es fehlt dazu für das konkrete Gebäude oder (ganz allgemein) der Beweis, dass diese Heizgrenze keine Einschränkung hinsichtlich des Lüftungsverhaltens der Nutzer, v.a. in der Übergangszeit, bedeutet. Folgende Vorüberlegungen über den Luftwechsel werden benötigt:

1. In der Kernheizzeit hat die Außenluft eine geringe absolute Feuchte, in der Übergangszeit steigt diese an. Die Aufnahmekapazität der Luft für zusätzliche Innenfeuchte sinkt. Soll die Feuchte in den Innenräumen sich im ganzen Jahr innerhalb bestimmter Grenzen bewegen, muss der Luftwechsel in der Übergangszeit ansteigen.
2. In der Kernheizzeit hat der Fremdwärmeeintrag ein bestimmtes Niveau. In der Übergangszeit steigt er, vor allem wegen der solaren Einstrahlung, an. Somit ermöglicht der Fremdwärmeanstieg auch einen Anstieg der Lüftungsheizlast (somit auch des Luftwechsels) in der Übergangszeit, ohne dass die Wärmeabgabe der Heizflächen überproportional steigen muss.
3. Der Feuchteanfall in den Wohnräumen hängt stark von der Belegungsichte ab, ebenfalls das Auftreten von innerer Fremdwärme. Sinkt die Belegungsichte, sinken Feuchteeintrag und innere Fremdwärme und damit der notwendige Luftwechsel.
4. Der Luftwechsel für einen ausreichenden CO₂-Abtransport und daran gebunden zur Vermeidung von Geruchsbelästigung hängt ebenfalls von der Belegungsichte ab[125].

Fazit der Vorüberlegungen ist: Der aus Feuchtesicht und zum CO₂-Abtransport notwendige Luftwechsel sowie der durch Ablüften von Fremdwärme mögliche Luftwechsel steigen mit der Belegungsichte und in der Übergangszeit an. Eine im Anhang (Tabelle A-5, Seite 215) dokumentierte Parametervariation führt die Überlegungen fort. Fazit ist: für die im Wohnbau typische mittlere Belegungsichte von 40 m²/Person sowie einen mittleren Fensteranteil ergibt sich beispielsweise in der Kernheizzeit ein möglicher Luftwechsel von 0,29 h⁻¹, wenn alle inneren und solaren Fremdwärmeeinträge abgelüftet werden.

Der Luftwechsel könnte weiter erhöht werden, wenn auch die innere Fremdwärme aus Trinkwarmwasserverteilleitungen zusätzlich abgelüftet würde. Aus Feuchtesicht wäre in der gleichen Zeit ein Luftwechsel von 0,24 h⁻¹ und zum CO₂-Abtransport von 0,25 h⁻¹ notwendig. Die drei Werte korrespondieren in der Kernheizzeit etwa. In der Übergangszeit ist der mögliche Luftwechsel aus vollständigem Ablüften der Fremdwärme größer als die notwendigen Werte zum CO₂- und Feuchteabtransport. Die Zusammenhänge gelten auch für andere Belegungsichten, Fensterkennwerte und Feuchteinträge, sie sind verallgemeinerbar.

Aus den Überlegungen wird deutlich: die Grundheizlast der Kernheizmonate H , die aus Messwerten abgeleitet werden kann, ist näherungsweise auch auf die Übergangszeit übertragbar, siehe Trendkurve in Bild 7-5 auf Seite 152. Bleiben die inneren Fremdwärmeeinträge in etwa so erhalten und steigen die solaren Einträge in der Übergangszeit an, so ist insgesamt bei gleicher bezogener Last H ein größerer Luftwechsel möglich. Damit bedeutet eine konstante Last H , die

durch die Wärmeabgabe der Heizflächen gedeckt werden muss, keine Einschränkung des Nutzerverhaltens hinsichtlich der Lüftung. In der Übergangszeit kann bei gleicher Last H deutlich mehr gelüftet werden.

Diese Zusammenhänge gelten sowohl für neue als auch für bestehende Gebäude, sofern eine ausreichende Gebäudedichtheit (geringe Infiltration) sichergestellt ist. Bis auf sehr alte Fensterkonstruktionen (Einscheibenverglasung) erfüllen die üblichen Fenster diese Anforderung. Weitere Verwendung finden diese Vorüberlegungen im nachfolgenden Kapitel 7.2.2.

7.2.2. Auswertung von Monatsmesswerten

Bei der Auswertung monatlicher Messwerte zur Abschätzung eines Einsparpotentials kann verschieden detailliert vorgegangen werden. Im Folgenden werden vier Berechnungsansätze (1 ... 4) vorgestellt. Diese sind schematisch als \dot{Q}, ϑ Diagramm (Bild 7-6) und H, ϑ Diagramm (Bild 7-7) dargestellt. Verwendete Größen:

- $H_{Kern,m}$ - bezogene Heizlast aus Messwerten der Kernheizzeit (Steigung), in [W/K]
- H_{min} - mögliche minimale Heizlast, in [W/K]
- ϑ_{HG} - Heizgrenztemperatur (Schnittpunkt mit der Abszisse), in [°C]

Alle vier Ansätze der Abschätzung eines Einsparpotentials beziehen sich auf die vorhandenen Verbrauchsdaten (in den Bildern mit "0" gekennzeichnete Kurve), die als Vergleichsbasis zur Bestimmung der möglichen Einsparungen dienen.

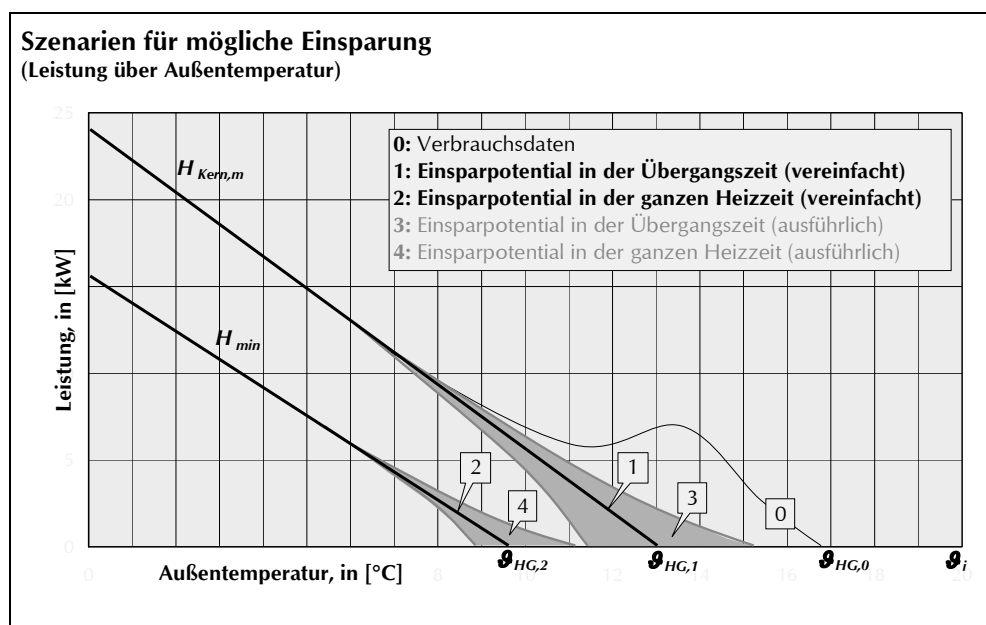


Bild 7-6 Einsparszenarien (Leistung über Außentemperatur)

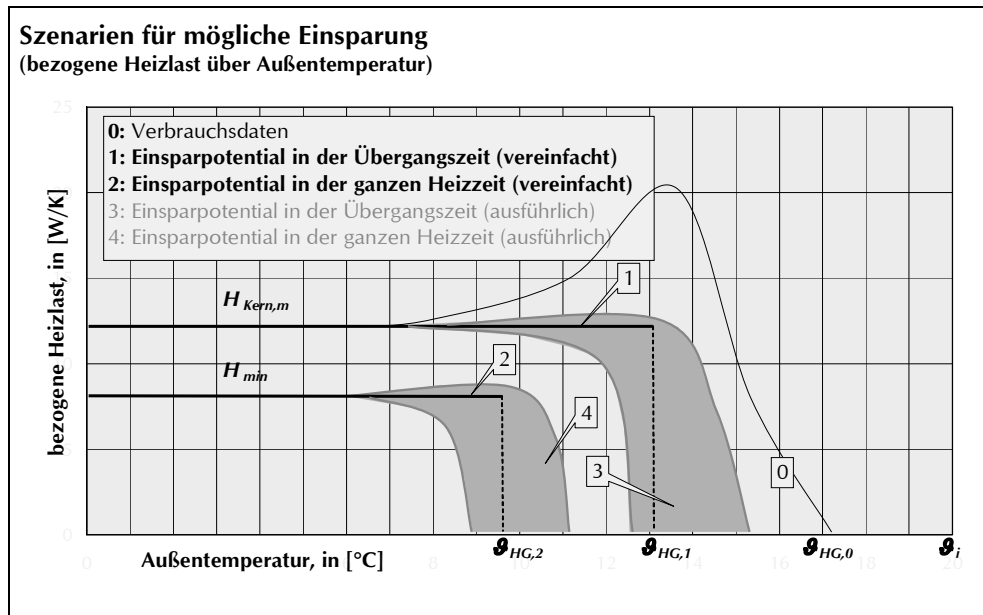


Bild 7-7 Einsparpotentialen (Bezogene Heizlast über Außentemperatur)

Ansatz 1: Einsparpotential in der Übergangszeit (vereinfachter Ansatz)

Die Berechnung des Einsparpotentials nach diesem Ansatz geht davon aus, dass die vorhandene, bezogene Heizlast H in der Kernheizzeit nicht minimiert werden kann. Allein in der Übergangszeit tritt ein nicht notwendiger Energieverbrauch, das Einsparpotential, auf. Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass über den mittleren U-Wert der Gebäudehülle, die solaren und inneren Fremdwärmelasten bei der Datenauswertung nicht spekuliert werden muss. Die minimal erreichbare Heizlast H wird vollständig aus Messwerten bestimmt. Nachteil ist: eine evtl. vorhandene Verschwendung im Kernwinter wird bei der Abschätzung des Einsparpotentials nicht erfasst.

Das Einsparpotential ΔQ_1 bezogen auf den realen Verbrauch $Q_{intern,mess}$ wird nach Gleichung (7-8) bestimmt. Die mittlere, bezogene Heizlast $H_{Kern,m}$ der Monate des Kernwinters wird anhand der Heizgradtage $G_{g_{HG,1}}$ auf das ganze Jahr hochgerechnet. Die maßgebliche Heizgrenze $g_{HG,1}$ ergibt sich aus dem extrapolierten Verbrauch (der mittleren Wärmeleistung) der Kernheizzeit.

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &= Q_{intern,mess} - Q_{intern,ideal} \\ &= Q_{intern,mess} - H_{Kern,m} \cdot G_{g_{HG,1}} \end{aligned} \quad (7-8)$$

Ansatz 2: Einsparpotential in der Kernheiz- und Übergangszeit (vereinfachter Ansatz)

Ansatz 2 verfolgt eine ähnliche Grundidee wie Ansatz 1. Die Berechnung des Einsparpotentials ΔQ_2 nach diesem Ansatz geht jedoch davon aus, dass ein Mehrverbrauch bereits im Kernwinter auftritt. Es müssen daher sowohl eine minimale bezogene Heizlast H_{min} als auch die minimal vorhandenen Heizgradtage $G_{g_{HG,2}}$ (bzw. vorher eine minimale Heizgrenztemperatur) definiert werden, die mit normalem Nutzerverhalten erreichbar sind. Zunächst sollte jedoch aus den Monatsmesswerten die Berechnung der Einzelparameter nach Gleichung (7-7) bzw. (7-9) erfolgen. Die durchschnittliche Fremdwärmeleistung und der mittlere Luftwechsel der Kernheizzeit können durch eine möglichst genaue Annahme von Innentemperatur und U-Wert bestimmt werden.

$$\dot{Q}_{intern} = (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot (U_m \cdot A + n \cdot \rho \cdot c_p \cdot V) - \dot{q}_{I+S} \cdot A_{EB} \quad (7-9)$$

Dann werden rechnerisch Innentemperatur und Luftwechsel in der Kernheizzeit auf ein normales Niveau (Bezugsniveau) festgelegt. Der Mindestluftwechsel in der Kernheizzeit kann beispielsweise auf $0,25 \text{ h}^{-1}$ analog der Auslegungheizlast oder angepasst an die Belegungsdichte ($0,3 \dots 0,4 \text{ h}^{-1}$) festgelegt werden. Es ergibt sich zusammen mit der bezogenen Transmissionsheizlast H_T der Bezugswert H_{min} . Zusammen mit der nach Gleichung (7-9) festliegenden Fremdwärmeleistung \dot{Q}_{+S} und der Bezugsinnentemperatur kann die neue Heizgrenze $\vartheta_{HG,2}$ bestimmt werden. Aus dieser resultieren die minimalen Heizgradtage $G_{\vartheta_{HG,2}}$. Das Einsparpotential ΔQ_2 wird nach Gleichung (7-10) bestimmt. Die Heizlast H_{min} des Kernwinters wird anhand der Heizgradtage $G_{\vartheta_{HG,2}}$ auf das ganze Jahr hochgerechnet.

$$\begin{aligned} \Delta Q_2 &= Q_{intern,mess} - Q_{intern,ideal} \\ &= Q_{intern,mess} - H_{min} \cdot G_{\vartheta_{HG,2}} \end{aligned} \quad (7-10)$$

Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass die monatliche Berechnung der inneren und solaren Fremdwärme entfällt und eine mögliche Verschwendung (Einsparpotential) auch im Kernwinter erfasst wird. Dazu muss jedoch die Transmissionsheizlast sehr genau bestimmt werden. Das Verfahren wird in Kapitel 7.6 an einem Beispiel demonstriert.

Ansätze 3 und 4: Ausführliche Berechnung

Die Berechnung der Einsparung nach dem dritten und vierten Ansatz erfolgt ausführlich anhand von Monatsbilanzen. Alle Kennwerte Q_{Tr} , Q_{Vr} , Q_i und Q_s sowie der Wärmeeintrag in den beheizten Bereich Q_{intern} werden dazu monatlich bestimmt. Durch Differenzbildung mit dem realen Messwert wird das Einsparpotential bestimmt. Je nach Verhältnis der Wärmeverluste zur Fremdwärme ergeben sich die grau hinterlegten Bereiche 3 und 4 in Bild 7-6 bzw. Bild 7-7.

Der dritte Ansatz geht dabei ebenfalls davon aus, dass die bezogene Heizlast im Kernwinter nicht weiter zu vermindern ist, während der vierte Ansatz ein Verschwendungspotential im Winter berücksichtigt. Der zur Berechnung notwendige monatliche Mindestluftwechsel je nach Belegungsdichte kann mit Bild A-9 (Anhang, Seite 216) abgeschätzt werden.

Für die ausgewerteten Feldprojekte im Rahmen dieser Arbeit kommen die vereinfachten Ansätze 1 und 2 zur Anwendung.

7.2.3. Auswertung von Jahresmesswerten

Auch mit Hilfe von Jahresmesswerten kann ein Einsparpotential für ein konkretes Objekt abgeschätzt werden. Die erreichbare Genauigkeit kann jedoch an dieser Stelle nicht vorhergesagt werden. Wegen der in der Praxis meist vorhandenen geringen Ausgangsdatenbasis kommen nur zwei Ansätze zur Bestimmung des Einsparpotentials ΔQ in Betracht.

Minimaler Rechenaufwand

Analog Gleichung (7-10) wird das Einsparpotential mit Hilfe einer definierten Mindestheizlast bestimmt. Diese setzt sich zusammen aus der Transmissionsheizlast und ggf. einem Zuschlag für Mindestlüftung H_{min} . Die maßgeblichen, erreichbaren Heizgradtage G können mithilfe einer abgeschätzten Heizgrenze nach Bild A-8 (Anhang, Seite 215) bestimmt werden.

Berücksichtigung weiterer Kennwerte

Alternativ kann eine ausführliche Bilanz erfolgen. Dazu werden alle Kennwerte Q_T , Q_V , Q_I und Q_S sowie der Wärmeeintrag in den beheizten Bereich Q_{intern} bestimmt. Dem realen Verbrauch wird der erreichbare minimale Verbrauch gegenübergestellt. Die Abschätzung des minimalen Luftwechsels kann nach Bild A-10 im Anhang Seite 216 erfolgen oder es kann ein anderer Bezugs-luftwechsel angesetzt werden (z.B. $n_{Bezug} = 0,4 \text{ h}^{-1}$).

7.2.4. Bereinigung von Messdaten und abgeschätzten Einsparpotentialen

Die Berechnungen nach Kapitel 7.2.2 und 7.2.3 erfolgen für ein konkretes Gebäude mit den aktuellen Wetterdaten des Standortes bzw. der maßgeblichen Wetterstation. Sofern solare Strahlungsdaten benötigt werden, muss i.d.R. auch im Messzeitraum auf Standardwerte zurückgegriffen werden. *Die ermittelten rechnerischen Einsparpotentiale gelten daher prinzipiell nur für den Untersuchungszeitraum, -ort und das untersuchte Jahr.*

Der Ansatzfehler der zur Verallgemeinerung von Messdaten notwendigen Witterungsbereinigung ist in Kapitel 6.2 beschrieben: die Bereinigung setzt voraus, dass das Lüftungsverhalten unabhängig von der Außentemperatur ist und der Verbrauch daher nur aufgrund der Temperatur korrigiert werden muss. Dies ist in der Praxis nicht der Fall. Tendenziell wird in Jahren (und an Standorten) mit milder Übergangszeit mehr gelüftet. Daher sind Verbrauchsdaten und berechnete Einsparpotentiale nicht universell vergleichbar, auch nicht nach der Bereinigung.

Eine Möglichkeit der Problemlösung kann sein, die Bereinigung gar nicht durchzuführen. Für die gänzliche Vernachlässigung der Bereinigung spricht, dass an Orten mit kälterem Klima (höherer Wert für G oder Gt) als am Untersuchungsort das rechnerische Einsparpotential mit der Bereinigung steigen würde. Dies ist an Orten mit kälterem Klima wegen des "witterungsgeführten" Nutzerverhaltens aber nicht unbedingt zu erwarten. Eine zweite Möglichkeit wäre die Bereinigung des aus Messwerten berechneten Einsparpotentials ΔQ_{mess} anhand der Gradtagszahl $Gt_{20,20}$ (entspricht den Heizgradtagen G_{20}) vgl. Gleichung (7-11). Dafür spricht die Tatsache, dass sich mit dem Verhältnis $Gt_{20,20,Bezug}/Gt_{20,20}$ bzw. $G_{20,Bezug}/G_{20}$ die kleinsten – und damit konservativ vorsichtigen – Umrechnungsfaktoren für die Witterung ergeben.

$$\Delta Q = \Delta Q_{mess} \cdot \frac{G_{20,Bezug}}{G_{20}} = \Delta Q_{mess} \cdot \frac{Gt_{20,20,Bezug}}{Gt_{20,20}} \quad (7-11)$$

Die Verfahren zur Abschätzung von Einsparpotentialen aus monatlichen oder jährlichen Messwerten eignen sich vor allem zur Untersuchung konkreter Einzelobjekte. Für die Verallgemeinerung und Typologisierung sollten Auswertungen nach Kapitel 7.3 bevorzugt werden.

7.3. Auswertung von Optimierungen und Archivierung von Verbrauchsdaten

Ziel des im Folgenden beschriebenen Verfahrens ist es, Verbrauchsmesswerte so auszuwerten und zu archivieren, dass im Vergleich untereinander auf ein Energieeinsparpotential geschlossen werden kann. Gleichzeitig soll dem späteren Anwender der archivierten Kennwerte ein leichter Einstieg ermöglicht werden, d.h. es sollte eine geringe Aufarbeitung der Messwerte notwendig werden.

7.3.1. Notwendige Kennwerte zur Bewertung

Unabhängig davon, ob der Energieverbrauch eines Gebäudes ausgewertet wird, um eine Datenbank mit Kennwerten aufzubauen oder ob für das Gebäude mit Hilfe einer Datenbank das Einsparpotential abgeschätzt werden soll, zunächst müssen für das Gebäude zwei Kennwerte bestimmt werden: der Wärmeverbrauch innerhalb und außerhalb des beheizten Bereichs.

Gebäude ohne zentrale Trinkwarmwasserbereitung

Für die zu untersuchenden Gebäude ohne zentrale Trinkwarmwasserbereitung müssen der Energieeintrag in den beheizten Bereich Q_{intern} nach Gleichung (7-1) (Seite 147) sowie die Wärmeverluste außerhalb des beheizten Bereichs Q_{extern} nach Gleichung (7-2) (Seite 148) bestimmt werden.

Gebäude mit zentraler Trinkwarmwasserbereitung

Liegt neben der Heizung eine zentrale Trinkwarmwasserbereitung vor, lassen sich einzelne Kennwerte in der Bilanz nicht trennen. Dies gilt in verstärktem Maße für Gebäude mit hohem Wärmeschutz. Ein Beispiel für einen gekoppelten Kennwert ist der Wärmeverlust des gemeinsamen Erzeugers. Aber auch die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich ist gekoppelt, weil Wärmeeinträge des Trinkwarmwassersystems im beheizten Bereich unmittelbare Auswirkungen auf die Wärmeabgabe der Heizflächen haben. Wird das Trinkwarmwasserzirkulationssystem beispielsweise nachträglich optimiert, so dass sich der Fremdwärmeanfall im beheizten Bereich vermindert, bewirkt dies einen Mehrbedarf an Heizwärmezufuhr über die Heizflächen.

Diese Quereffekte erschweren die Angabe eines Einsparpotentials allein für die Heizung. Daher muss die zentrale Trinkwarmwasserbereitung eines Gebäudes bei der Energiebilanzierung und Auswertung von Feldmessdaten sowie bei der Bestimmung eines Einsparpotentials berücksichtigt werden. Die Kennwerte Q_{intern} und Q_{extern} sind in modifizierter Form zu ermitteln.

Bei der Bestimmung des Wärmeeintrags in den beheizten Bereich wird die Wärmeabgabe von Komponenten der Trinkwarmwasserbereitung mit berücksichtigt. Der resultierende Fremdwärmeeintrag wird dabei ganzjährig bestimmt und der Wärmezufuhr der Heizung in den beheizten Bereich Q_{intern} nach Gleichung (7-1) zugeschlagen. Dies hat zwei Gründe:

1. Der Wärmeeintrag in den beheizten Bereich kann ganzjährig leicht aus Zählermesswerten bestimmt werden, während eine Beschränkung auf die Heizzeit weitere Rechenarbeit (Abschätzung der Verlustanteile im Sommer und Winter) erfordern würde.

2. Auch die externen Verluste (v.a. Wärmeerzeugerverluste eines gekoppelten Erzeugers) müssen ganzjährig bestimmt werden, so dass hier eine gewisse Konsistenz erreicht wird und bei der Aufteilung des gesamten Endenergiebedarfs (innerhalb und außerhalb des beheizten Bereiches, innerhalb und außerhalb der Heizzeit) keine Restenergiemengen verbleiben.

Es ergibt sich der Zusammenhang nach Gleichung (7-12). Die Wärmezufuhr der Heizung und Trinkwarmwasserbereitung Q_{intern} kann indirekt durch Abzug der Verluste im unbeheizten Bereich Q_{extern} sowie der Nutzwärmemenge für Trinkwarmwasser Q_{tw} von der Endenergie Q_E erfolgen. Zur Anordnung evtl. notwendiger Messstellen im Gebäude vgl. Bild 7-2 auf Seite 147.

$$\begin{aligned} Q_{intern} &= Q_{intern} + (Q_{TW,d,beheizt} + Q_{TW,s,beheizt} + Q_{TW,g,beheizt}) \\ &= Q_E - (Q_{tw} + Q_{extern}) \end{aligned} \quad (7-12)$$

Die über ein Jahr auftretenden technischen Verluste einer zentralen Trinkwarmwasserbereitung, die außerhalb des beheizten Bereiches auftreten, werden dem Wert Q_{extern} nach Gleichung (7-2) zugeschlagen. Es ergibt sich der modifizierte Wert Q_{extern} nach Gleichung (7-13).

$$\begin{aligned} Q_{extern} &= Q_{extern} + (Q_{TW,d,unbeheizt} + Q_{TW,s,unbeheizt} + Q_{TW,g,unbeheizt} + Q_{TW,g,Umwandlung}) \\ &= Q_E - (Q_{intern} + Q_{tw}) \end{aligned} \quad (7-13)$$

7.3.2. Herkunft und Bereinigung der Rohdaten

Der Aufbau von Datenbanken mit archivierten Kennwerten kann anhand verschiedener Ausgangsdaten erfolgen. Je nach Datenherkunft müssen die Kennwerte bereinigt werden.

Auswertung von Optimierungen

Der Vergleich von Energieverbrauchsdaten kann für ein konkretes Gebäude vor und nach einer Optimierung durch Qualitätssicherung erfolgen. Jeweils vor- und nachher sind die Kennwerte Q_{intern} und Q_{extern} (bzw. bei zentraler Trinkwarmwasserbereitung Q_{intern} und Q_{extern}) zu bestimmen. Es ist eine Witterungsbereinigung der beiden Teilenergiemengen nötig.

Auswertung von Stichprobenmesswerten

Alternativ werden Gebäude zusammengestellt, die repräsentativ für eine ganze Klasse stehen. Die Verbrauchswerte der Gebäude mit und ohne QS können beispielsweise miteinander verglichen werden. Es können Messwerte beliebiger Jahre herangezogen werden, eine Witterungsbereinigung ist notwendig.

Bereinigung von Q_{intern}

Die Wärmezufuhr des Heizsystems in den beheizten Bereich Q_{intern} kann in verschiedener Detailtiefe bereinigt werden. Generell ergibt sich jedoch für alle Arten der Bereinigung das in Kapitel 7.2.4 beschriebene Problem des Nutzerverhaltens. Der nutzerbedingte Luftwechsel ist nicht konstant über die Außentemperatur, sondern unterliegt einem Temperatureinfluss. Folgende Konsequenzen resultierten bei unterschiedlichen Bereinigungsansätzen:

- Bereinigung der gesamten Wärmezufuhr in den beheizten Bereich mit Gradtagszahlen: falsche Bewertung der Fremdwärme und des Lüftungsverhaltens.
- Bereinigung der gesamten Wärmezufuhr in den beheizten Bereich mit den Heizgradtagen: falsche Bewertung des Lüftungsverhaltens.
- Bereinigung der Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung mit den Gradtagszahlen: falsche Bewertung des Lüftungsverhaltens.

Für die detaillierte Auswertung von Messdaten empfiehlt sich daher folgendes Vorgehen. Die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich wird in die drei Hauptkennwerte – Transmission, Lüftung, Fremdwärme – separiert. Dabei kann das auf Seite 151 beschriebene Verfahren der Messdatenauswertung hilfreich sein. Anschließend wird nur der Energieverbrauch für Transmission und einen Mindestluftwechsel (z.B. mit $n_{min} = 0,25 \text{ h}^{-1}$) anhand der Gradtagszahl bereinigt. Im einfachsten Fall kann hierzu das Gradtagszahlverhältnis $G_{t_{20,20,Bezug}}/G_{20,20,mess}$ analog Gleichung (7-11) auf Seite 157, verwendet werden. Der über n_{min} hinausgehende Anteil der Lüftung wird nicht bereinigt, weil davon ausgegangen werden kann, dass bei veränderten Witterungsbedingungen dieser Teil des Lüftungswärmebedarfs nicht proportional zur Außentemperatur schwankt. Es wird also nur der rechnerische "Bedarfsanteil" des Wärmeverbrauchs witterungsbereinigt.

Erfolgt keine genaue Untersuchung der Einzelkennwerte, wird konservativ und vereinfachend der Gesamtkennwert Q_{intern} mit dem Gradtagszahlverhältnis $G_{t_{20,20,Bezug}}/G_{20,20,mess}$ bereinigt, da eine Bereinigung mit Heizgradtagen ein zu optimistisches Einsparpotential versprechen würde.

Bereinigung von Q_{intern}

Enthält die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich auch – die ganzjährig auftretende – Fremdwärme aus Trinkwarmwasserbereitung, muss dieser Anteil separat behandelt werden. Eine Bereinigung dieser Energiemenge erfolgt, wenn nötig, anhand der Messzeit auf die Länge eines Jahres. Für den Anteil der Heizung Q_{intern} gilt die Bereinigung wie oben beschrieben.

Bereinigung von Q_{extern} und Q_{extern}

Die Energieaufwendungen im unbeheizten Bereich des Gebäudes (ohne oder mit Trinkwarmwasserbereitung Q_{extern} bzw. Q_{extern}) sollten ebenfalls bereinigt werden. Hier empfiehlt sich für den Anteil der Heizung eine Bereinigung anhand der Heizzeitlänge, für den Anteil der Trinkwarmwasserbereitung eine Bereinigung auf die Länge eines vollen Jahres.

Soll oder kann der vorliegende Summenwert Q_{extern} nicht weiter in Anteile für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung unterschieden werden, empfiehlt sich eine reine Zeitbereinigung auf ein komplettes Jahr. Voraussetzung dafür ist, dass der Messzeitraum bereits ungefähr ein Jahr umfasst, damit der Fehler gering bleibt. Auf die Bereinigung des zeitunabhängigen, aber von der Nutzwärmeabgabe abhängigen Anteils der Verluste $Q_{g,Umwandlung}$ wird aus Gründen der Vereinfachung gänzlich verzichtet.

7.4. Vereinfachte Kennwertematrix für Feldprojekte

Die für reale Objekte nach Kapitel 7.2 oder 7.3 aus Messungen berechneten bzw. abgeschätzten Einsparpotentiale durch QS müssen in geeigneter Weise aufbereitet und archiviert werden. Nur so können die Erkenntnisse auf andere Projekte übertragen werden, d.h. zur Abschätzung des Energiebedarfs im Neubau oder nach einer Modernisierung herangezogen werden.

Die Parameter zur Systematisierung von Verbrauchsdaten sind vielfältig: Gebäudegröße, Dämmstandard, Kompaktheitsgrad, Gebäudenutzungstyp, Heizzeitlänge, Typ der zentralen und dezentralen Regelung, Vorhandensein eines hydraulischen Abgleichs, Heizflächentyp, Status der Nutzeraufklärung, Erzeugerart usw. Die folgenden Ausführungen unterbreiten geeignete Vorschläge.

7.4.1. Vorhandene Typologien

In der Literatur sind zahlreiche Vorschläge für die Typologisierung von Gebäuden vorhanden. Sie beziehen sich i.d.R. auf bauliche Standards und Nutzungstypen. Wichtige Auszüge von vorhandenen Vorarbeiten werden nachfolgend kurz benannt.

- KOLMETZ, OSTERMEIER und ROUVEL [97] schlagen die Typologisierung in Gebäude mit 1 ... 2 (Einfamilien-, Doppel-, Reihenhäuser), 3 ... 6 (kleine Mehrfamilienhäuser), 7 ... 12 (große Mehrfamilienhäuser) und über 12 (Hochhäuser) Wohneinheiten vor. Die weitere Einteilung erfolgt anhand der Altersklassen. Diese sind durch markante Ereignisse geprägt, die zu einem Bauwandel führten. Beispiele hierfür sind: die Zeit der Weimarer Republik bis einschließlich der ersten Nachkriegsjahre (1919 ... 1948), die Wirksamkeit der ersten DIN 4108-6 (1957 ... 1968) oder der ersten Wärmeschutzverordnung (1978 ... 1983) in der BRD. Auch in der Typologisierung von Gebäuden der ehemaligen DDR sind Änderungen des Wärmeschutzes mit Einführung und Novellierung der TGL sichtbar [97].
- REIß und ERHORN definieren Typgebäude je nach Wohnungszahl über die vorhandene Geometrie (Flächen, Kompaktheit, Fensterflächenanteil) [124].
- EBEL, LOGA ET AL geben im Rahmen von Studien Energiekennwerte für verschiedene Baualtersklassen (Baujahre), Bauausführungen (Fachwerk, Massivbau) und Gebäudegrößen (Ein- und Mehrfamilienhaus etc.) an [47] [101] [103].
- GEIGER typologisiert Verbrauchsdaten anhand des Gebäude- und des Anlagenalters [64].
- ROGATTY und BURGER geben Heizlasten für 5 Gebäudetypen und 7 Altersklassen an [129].
- Diesen Ansatz verfolgt auch das SCHWEIZER MINERGIE-PROJEKT [18], welches Gebäude anhand einer Heizlast unter Berücksichtigung von Wärmegewinnen klassifiziert.
- Die SIA 380-1 legt verschiedene Nutzungstypen fest [143] [144].
- WITTMANN bildet Energiekennwerte aus Verbrauchsdaten je nach Gebäudenutzungstyp (Büro, Labor, Halle, Wohngebäude usw.) und baulichen Merkmalen (Kompaktheitsgrad und äquivalenter, mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient) [199].
- Eine weitere Möglichkeit ist die Festlegung von energetischen Gebäudeklassen, die sich durch einen bestimmten mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten auszeichnen: 0 ... 0,25 W/(m²·K) – 0,25 ... 0,75 W/(m²·K) – 0,75 ... 1,25 W/(m²·K) usw. Diese Aufteilung hat gegenüber der Typologisierung nach Baualtersklassen den Vorteil, dass eine nachträgliche Änderung des Wärmeschutzes berücksichtigt wird. Zusätzlich kann der Kompaktheits-

grad A/A_{EB} als Multiplikator berücksichtigt werden, so dass sich ein Hüllflächenkennwert $U \cdot A/A_{EB}$ ergibt [89].

7.4.2. Allgemeine Festlegungen

Ausgehend von den vorhandenen Typologisierungen werden Merkmale für eine geeignete Darstellung von Einsparpotentialen durch Qualitätssicherung abgeleitet. Die entwickelte Übersicht zeigt Tabelle 7-1. Sie stellt einen erweiterbaren Vorschlag dar.

Es wird die Angabe zweier Einsparpotentiale unterschieden: das Energieeinsparpotential innerhalb des beheizten Bereiches ΔQ_{intern} (bzw. $\Delta Q_{intern}''$) und das Energieeinsparpotential für die technischen Verluste außerhalb des beheizten Bereiches ΔQ_{extern} (bzw. $\Delta Q_{extern}''$). Alle Energiekennwerte können zusätzlich bezogen auf die beheizte Fläche, das beheizte Volumen oder absolut angegeben werden.

Merkmalsname	Kürzel	Untergruppen
Gebäudetyp	T	T ₁ Wohngebäude T ₂ Krankenhaus T ₃ Bürogebäude
Gebäudegröße	G	G ₁ bis 250 m ² (z.B. Einfamilien-, Zweifamilien-, Reihenhaus) G ₂ 251 ... 500 m ² (z.B. kleines Mehrfamilienhaus) G ₃ 501 ... 1500 m ² (z.B. großes Mehrfamilienhaus) G ₄ über 1500 m ² (z.B. Hochhaus)
Stand der Qualitätssicherung	QS	QS ₀ keine Qualitätssicherung feststellbar QS ₁ nachträgliche Qualitätssicherung im Bestand (mindestens vollständige immaterielle Verbesserung) QS ₂ Qualitätssicherung ab Planung vorhanden (nur Neubau)
Art der Energieversorgung	E	E ₁ Brennwertkessel E ₂ Niedertemperaturkessel E ₃ Nah- und Fernwärme
Als weiteres charakteristisches Merkmal kommt der Gebäudekennwert " $H_T + H_{V,min}$ " infrage.		

Tabelle 7-1 Merkmale der Typologie

7.4.3. Archivierung von berechneten und gemessenen Einsparpotentialen

Unabhängig von der Art der Bestimmung eines Einsparpotentials – Berechnung oder Messung – müssen die typologisierten Werte entsprechend aufbereitet werden, damit sie für eine Bedarfsrechnung verwendbar sind. Es eignen sich graphische Darstellungen, wobei zur Konstruktion von Kennlinien jeweils repräsentative Stichproben von mindestens 10 ... 15 Gebäuden Umfang vorliegen sollten. Werden Gebäude vor und nach einer QS untersucht, kann der Umfang geringer sein.

Voraussetzung jeder Typologisierung ist, dass der gemessene Energieverbrauch Q in die beiden Teilmengen Q_{intern} und Q_{extern} (bzw. Q_{intern}'' und Q_{extern}'') aufgeteilt wird.

Einsparpotential ΔQ_{intern} bzw. $\Delta Q_{intern}''$

Je Gebäudegröße $G_1 \dots G_x$ wird eine graphische Auswertung angefertigt. Die bereinigten Messwerte einer Stichprobe werden durch eine Ausgleichsgerade (ggf. auch eine andere Funktionsart) miteinander verbunden. Bei Angabe absoluter Kennwerte kann eine logarithmische Achsen-einteilung sinnvoll sein. Eine beispielhafte Darstellung zeigt Bild 7-8.

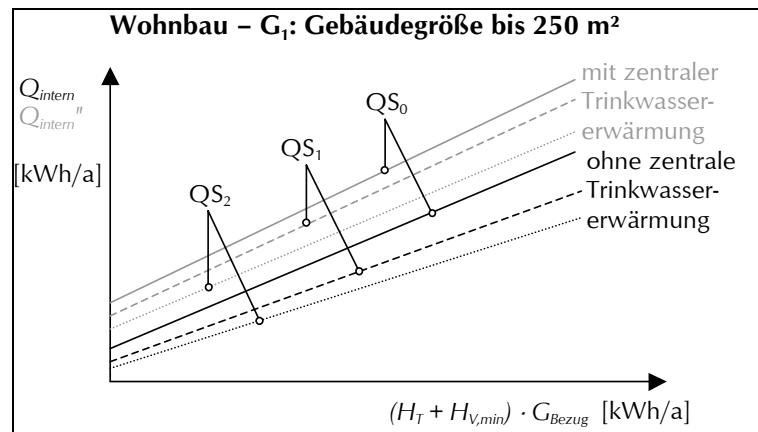


Bild 7-8 Einsparpotentiale Q_{intern} (schematisch)

Das typische Einsparpotential ist die Differenz zwischen zwei Linien für QS , z.B. QS_0 und QS_1 . Es kann als absolute Größe abgelesen werden und damit auch als relativer Wert bestimmt werden. Die im Diagramm aufgetragenen Werte sind:

- Auf der Abszisse: der theoretische Referenzwert für den bezogenen Transmissions- und einen Mindestlüftungswärmeverlust $H_T + H_{V,min}$ (berechnet mit einem Mindestluftwechsel n_{min} , z.B. $0,25 \text{ h}^{-1}$) multipliziert mit dem Bezugswert für die Heizgradtage G_{Bezug} (z.B. G_{20}).
- Auf der Ordinate: die dem beheizten Bereich zugeführte bereinigte Energiemenge Q_{intern} für Gebäude mit einer zentralen Trinkwarmwasserbereitung Q_{intern}'' .

Die aufgetragenen Werte können auch in anderer Art und Weise dargestellt werden, solange die Kerninformation "gemessener über theoretischem Verbrauch" erhalten bleibt. Es kommt beispielsweise für beide Achsen auch eine Darstellung als mittlere Leistung (in W oder W/m^2) oder ein einheitenloser normierter Energieverbrauch in Frage. Bezugsgröße für einen dimensionslosen Energiekennwert kann beispielsweise der maximal ohne Fremdwärme notwendige Energiebedarf des beheizten Bereichs sein [35] [89].

Einsparpotential ΔQ_{extern} bzw. $\Delta Q_{extern}''$

Je Versorgungssystem $E_1 \dots E_x$ wird eine graphische Auswertung ggf. mit logarithmischer Achsen-einteilung analog Bild 7-9 angefertigt. Die bereinigten Messwerte einer Stichprobe werden durch eine Ausgleichsfunktion (z.B. Gerade) miteinander verbunden. Die Anlagen- bzw. Gebäudegröße wird durch die Auftragung absoluter Kenngrößen berücksichtigt. Auch in der Darstellung nach Bild 7-9 wird nicht nur das Einsparpotential ΔQ dargestellt, sondern auch die absolute Größe des Verbrauchs. Dies ermöglicht die Ermittlung prozentualer Einsparung.

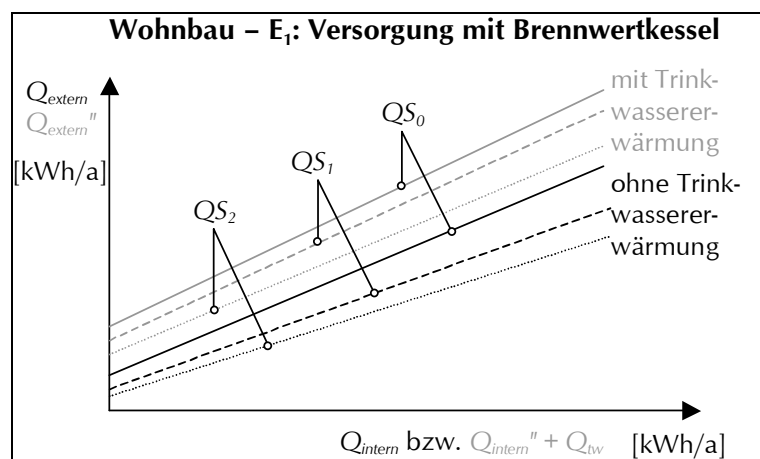


Bild 7-9 Einsparpotentiale Q_{extern} (schematisch)

Die aufgetragenen Werte sind:

- Auf der Abszisse: die dem beheizten Bereich über die Heizung zugeführte Wärme Q_{intern} wenn keine zentrale Trinkwarmwasserbereitung vorliegt. Wird das Trinkwasser zentral bereit, so wird die Summe aus Q_{intern}'' und der Trinkwassernutzwärme Q_{tw} aufgetragen.
- Auf der Ordinate: die technischen Verluste der Technik Q_{extern} bzw. bei zentraler Trinkwarmwasserbereitung Q_{extern}'' .

7.4.4. Ausblick auf die Anwendung in der Praxis

Die Typologien können wie folgt angewendet werden: für ein konkretes Objekt werden anhand seiner Eigenschaften (Typ T , Größe G und Energieversorgung E) die passenden Diagramme für das Einsparpotential innerhalb und außerhalb des beheizten Bereiches ausgesucht. Zur Ableitung typischer Werte für ΔQ_{intern} bzw. $\Delta Q_{\text{intern}}''$ wird der Eingangskennwert für die Abszisse ($H_T + H_{V,\text{min}}$) aus den Gebäudedaten bestimmt. Aus der Auftragung im Diagramm wird das absolute Einsparpotential durch Ableseung zweier Werte für QS (vorher, nachher) abgelesen.

Ist der real vorhandene Wert für Q_{intern} bzw. Q_{intern}'' – zumindest näherungsweise – bekannt, kann dieser in das Diagramm eingetragen werden. Diese Eintragung zeigt, ob das Gebäude einen hohen oder geringen Verbrauch hat und ob das Einsparpotential ggf. korrigiert werden sollte. Für die Ermittlung des Einsparpotentials ΔQ_{extern} bzw. $\Delta Q_{\text{extern}}''$ gelten die Aussagen analog. Als Einstiegsgröße in das Diagramm sollten bevorzugt reale Werte verwendet werden.

Umsetzung in die Praxis

Die Auftragungen und Auswertungen für Bild 7-8 (Seite 163) und Bild 7-9 (Seite 164) können bei der Erstellung der Arbeit noch nicht mit konkreten Messwerten belegt werden. Für ein derartiges Vorgehen sind umfangreiche Datenerhebungen über einen sehr langen Zeitraum erforderlich. Die vorgestellte Art der Auswertung und Typologisierung wird in den parallel zu dieser Arbeit begleiteten Messvorhaben nach Abschluss der vorliegenden Arbeit möglich sein und entsprechend angewendet werden. Dabei werden zunächst ca. 80 Gebäude ausgewertet.

7.5. Genauigkeit einfacher Verfahren

Statistische Sicherheit

Ziel der Auswertung von Feldprojekten ist die Systematisierung von Energiekennwerten, im speziellen Fall dieser Arbeit die systematische Bestimmung der Energiemenge ΔQ für unterschiedliche Qualitätsstandards. Die abgeleitete Typologie setzt eine hinreichend große Menge von Daten voraus. Folgende Aussagen über das Erreichen einer statistischen Sicherheit bei der energetischen Auswertung von Gebäuden sind der Literatur entnommen:

- Nach Aussagen von LOGA liegt die statistische Sicherheit bei der Auswertung von MFH etwa vor, wenn mindestens 20 Wohneinheiten erfasst sind [101].
- GEIGER sieht bei der Untersuchung von Verbrauchswerten eine statistische Signifikanz bei Kollektiven von 10 oder mehr Gebäuden als erreicht an [64].
- Nach MATTHIES, STARKEN und VOGLER sollte für eine statistische Sicherheit eine Stichprobe von Gebäuden mindestens 20 umfassen [108].

Eine Stichprobe von 10 ... 15 Gebäuden je Gruppe der Typologie wird auf Basis dieser Aussagen als realistisch angesehen. Es wird abgeschätzt, dass die Zahl auf 5 ... 10 vermindert werden kann, wenn für konkrete Objekte Messwerte jeweils vor und nach einer Qualitätssicherung vorliegen.

Die Energiekennwerte innerhalb einer Stichprobe von Gebäuden entsprechen i.d.R. nicht der idealen Gaußverteilung, d.h. es gibt einzelne Gebäude, die einen sehr hohen Verbrauch aufweisen, so dass der Bereich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit und des arithmetischen Mittelwertes nicht ideal übereinander liegen. Bei der Auswertung sind daher Objekte auszuklammern, die außerhalb eines statistischen Vertrauensbereiches von 2σ (umfasst 95,4 % der Stichprobe) liegen [64]. Das bedeutet i.d.R., dass die Gebäude mit den höchsten Verbrauchswerten nicht mit in die Stichprobe genommen werden.

Systematische und zufällige Fehler

Bei der Auswertung von Messdaten zur Bestimmung des Einsparpotentials ΔQ ist mit systematischen und zufälligen Fehlern zu rechnen, die das Ergebnis beeinflussen. Systematische Fehler sind wiederkehrende Fehler, für die folgende einfache Regeln gelten: bei einer additiven Verknüpfung der Einzelkennwerte addieren sich die absoluten Fehler, bei der multiplikativen Verknüpfung der Einzelkennwerte die relativen Fehler zum Gesamtfehler [118]. Systematische Fehler resultieren z.B. aus falschen Bilanzansätzen, immer wiederkehrenden Messgerätefehlern usw. Sie werden in der Energiebilanzierung i.A. vernachlässigt. Zur Bestimmung des systematischen Fehlers kann Gleichung (A-0-15) im Anhang (Seite 216) verwendet werden.

Zufällige Fehler beruhen auf nicht vorhersagbaren Unsicherheiten, z.B. Ablesefehlern, Messgerätetoleranzen usw. Sie sind in der Regel nach Gauß normalverteilt. Die Schwankungsbreite wird nicht als absoluter Fehler sondern als Standardabweichung σ (mit der gleichen Einheit wie die Messgröße) angegeben. Innerhalb des Bereiches $\pm\sigma$ um den Mittelwert (Wert der höchsten Wahrscheinlichkeit) liegen 68,3 % und innerhalb $\pm 2\sigma$ liegen 95,4 % aller wahrscheinlichen Werte. Zur Bestimmung des zufälligen Fehlers wird Gleichung (A-0-16) im Anhang (Seite 216)

angesetzt. Die Betrachtung von Fehlertoleranzen mit Hilfe der Standardabweichung ist in der Energiebilanzierung üblich.

Typische Fehlerbandbreiten

Typische Fehler bei der Energiebilanzierung werden unter anderem von PICKEL und KRETSCHMER [118] sowie WITTMANN [199] abgeschätzt und beurteilt. Die über diese Quellen hinaus teilweise ergänzten Daten sind in Tabelle 7-2 wiedergegeben. Verlässliche Werte für die Fehlertoleranz anderer Kennwerte (innere Fremdwärme, Verschattung der Fenster, Trinkwarmwasserverbrauch usw.) müssen bei Bedarf zusätzlich abgeschätzt werden.

Merkmals	nähere Erläuterung	Fehlerbandbreite, absolut oder relativ
mittlere Innentemperatur	ohne Messung	± 1 K
mittlerer Luftwechsel	ohne Messung	± 50 %
Heizgrenze	keine Auswertung von Monatswerten möglich	± 3 K
mittlere Außentemperatur	bei bekannter Heizgrenze; durch Abweichungen der Witterung innerhalb des Gebietes einer Wettermess-Station	± 1 K
Heizgradtage	bei falscher Annahme der Heizgrenztemperatur von max. ± 3 K	$\pm 2,5$ %
mittlere Globalstrahlung	bei bekannter Heizgrenze; bekannte Wetterstation, wegen der unterschiedlichen Werte in den einzelnen Jahren	± 100 kWh/(m ² ·a) bzw. ± 4 % [6] [7]
mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	ohne Messung und genauer Kenntnis des Wandaufbaus	± 25 % bzw. $\pm 0,25$ W/(m ² ·K)
	mit Kenntnis des Wandaufbaus, wegen der Wärmebrückenwirkung	± 5 %
Hüllfläche	grobe Messung bzw. Abschätzung nach Sichtung	± 10 %
	Pläne bekannt und richtig, aber Toleranzen am realen Gebäude	± 1 %
externes bzw. Hüllvolumen	grobe Messung bzw. Abschätzung nach Sichtung	± 10 %
	Pläne bekannt und richtig, aber Toleranzen am realen Gebäude	± 1 %
Energiemenge am Wärmemengenzähler	Messwert	± 8 % maximal
Volumenstrom am Gaszähler	Messwert	± 4 % maximal
Massenstrom Öl	Messwert	± 10 % maximal

Tabelle 7-2 Typische Fehlergrenzen

Die größten Unsicherheiten bei der Energiebilanzierung liegen – sofern die Größen nicht gemessen oder aus Messdaten abgeschätzt werden – in der Annahme der Heizgrenze (daraus abgeleitet die Heizzeit, mittlere Außentemperatur, Globalstrahlung, Heizgradtage, Gradtagszahlen), des Luftwechsels und des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle. Wird die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich in einer Jahresbilanz mit der zusammengefassten Größe G (Heizgradtage) gerechnet, kompensieren sich die Fehlannahmen der Heizgrenztemperatur

sehr stark. Die erhöhte Globalstrahlung in einer zu lang geschätzten Heizzeit gleicht zumindest theoretisch die erhöhten Transmissions- und Lüftungsverluste aus. Bei Betrachtung einzelner Monate ist dies nicht zu erwarten (vgl. Tabelle A-2 im Anhang, Seite 213). Die technischen Verluste außerhalb des beheizten Bereichs hängen dagegen immer sehr stark von der Heizzeit ab.

Die wichtigste Forderung für Bedarfs- und Verbrauchsbewertungen ist die hinreichend genaue Bestimmung des Luftwechsels und des Wärmedurchgangskoeffizienten, da das berechnete Einsparpotential sehr sensibel auf Fehlannahmen reagiert. In einer überschlägigen Verbrauchsanalyse kann ggf. auf die genaue U-Wert-Bestimmung verzichtet werden. Zitiert sei hier auch WETZEL [53], der es für wenig sinnvoll hält, die Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle für überschlägige Berechnungen bzw. ein Schnellanalyseverfahren sehr genau zu erfassen. Der Zeitaufwand steht in keinem Verhältnis zur Verringerung des Fehlers, der ohnehin durch veränderte Luftwechsel auftritt [53].

Fehler in den Bedarfsbilanzen zur Abschätzung von ΔQ

Hauptfehlerquelle in der Einschätzung des Einflusses von QS in der Kennwertbedarfsbilanz sind Annahmen über sich einstellende Raumtemperaturen und Luftwechsel bei üblichem Nutzerverhalten sowie die jeweils minimal erreichbaren Werte. Alle anderen Größen (Leitungslängen, Dämmstandards etc.) sind mit denselben Fehlern behaftet, wie sie jeder Bedarfsbilanz zugrunde liegen. Da in der Praxis nicht messbare Größen wie Fremdwärmenutzungsgrade und Wärmeübergabeverluste als veränderte Innentemperaturen, Luftwechsel und Heizzeiten ausgedrückt werden, vermindert sich an dieser Stelle das Fehlerpotential.

Fehler in der Bestimmung von ΔQ durch Feldmessungen

Die vereinfachten Rechenverfahren zur Bestimmung von Einsparpotentialen aus monatlichen oder jährlichen Messwerten zeichnen sich durch eine geringere Fehleranfälligkeit als Bedarfsbilanzen aus, weil viele Größen aus den Messwerten ermittelt werden können und nicht geschätzt werden müssen. Das Einsparpotential wird für das konkrete Objekt im einfachsten Fall nur aus Messwerten hergeleitet. Dies setzt voraus, dass der Wärmeeintrag in den beheizten Bereich mit einem Zähler erfasst werden kann und monatliche Messwerte vorliegen. Weiterhin werden die Wetterdaten für den Standort und den Referenzort benötigt.

Fehlerquellen liegen in der Erfassung der Messwerte und der Wetterdaten sowie der Art der Bereinigung. Werden Monatswerte ausgewertet, kann aus dem Messdatenverlauf recht genau auf die Heizgrenze, bei bekanntem mittleren U-Wert auf den Luftwechsel und bei näherungsweise bekannter Raumtemperatur auf die innere Fremdwärme geschlossen werden. Die am stärksten mit Fehlern behaftete Größe bei der Auswertung ist der mittlere U-Wert der Gebäudehülle. Die Auswertung in Hinblick auf die Qualität der Anlage und Nutzung erfordert daher auch immer eine genaue Aufnahme der Außenbauteile.

Einsatz von Messgeräten

Um die Fehlertoleranz und den Kostenaufwand bei der Erfassung der Messwerte gering zu halten, ist der Einbau zentraler Wärmemengenzähler zur Erfassung der vom Wärmeerzeuger bereitgestellten Wärme (möglichst getrennt nach Heizung und Trinkwarmwasser) zu empfehlen.

Die Wahl der Dimension muss dem Durchfluss angepasst werden, da zumindest bei den heute üblichen Flügelradzählern ein hohes Fehlerpotential in der Erfassung des Volumenstroms liegt. Die Messwerterfassung sollte automatisch monatlich zum Stichtag erfolgen, so dass Ablesungenauigkeiten und Personalaufwand für die Ablesung verringert werden. Zähler mit Speicherfunktion der letzten 12 Monatsmesswerte sind heute ohne Aufpreis erhältlich.

7.6. Praxisergebnisse

An dieser Stelle folgen Erkenntnisse aus Praxisuntersuchungen, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit zur Bewertung des Energieverbrauchs und der Qualität von Anlagentechnik durchgeführt wurden. Es wird jeweils nur ein kurzer Einblick in die Problemstellung der Untersuchung gegeben und für weitere Informationen auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Forschungsprojekt: Begrenzung des Lüftungswärmeverbrauchs

Im Rahmen des Forschungsprojektes [205] und zugehöriger Diplomarbeiten [68] [158] wurden drei MFH und ein EFH detailliert hinsichtlich ihres Energieverbrauchs untersucht. Eines der MFH wurde nachträglich baulich modernisiert, die anderen drei Gebäude sind Neubauten; alle weisen einen Endenergieverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser von etwa 100 kWh/(m²·a) auf.

Ziel der Untersuchungen war die Abschätzung eines Einsparpotentials, das durch verändertes Lüftungsverhalten bzw. anlagentechnische und regelungstechnische Maßnahmen zu erreichen ist. Für die Untersuchung der Gebäude wurden zwei durchgehende Energiebilanzverfahren entwickelt, das Gesamtbilanzverfahren und das ΔQ -Verfahren. Auf Basis der in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Energiebilanzierung, wurden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Bilanzansätze (siehe Kapitel 6.4) weiterentwickelt.

Zur Bestimmung realistischer Luftwechsel aus den Messwerten wurde wie folgt vorgegangen: aus den Verbrauchswerten und der mit Standardwerten berechneten inneren und solaren Fremdwärme wurde die gesamte Wärmezufuhr in den beheizten Bereich bestimmt. Aus dieser konnten Luftwechsel und Innentemperatur indirekt bestimmt werden. Da keine Messwerte für die Innentemperatur vorlagen, ergaben sich jeweils korrespondierende Paare für Luftwechsel und Innentemperatur, vgl. Bild 7-10.

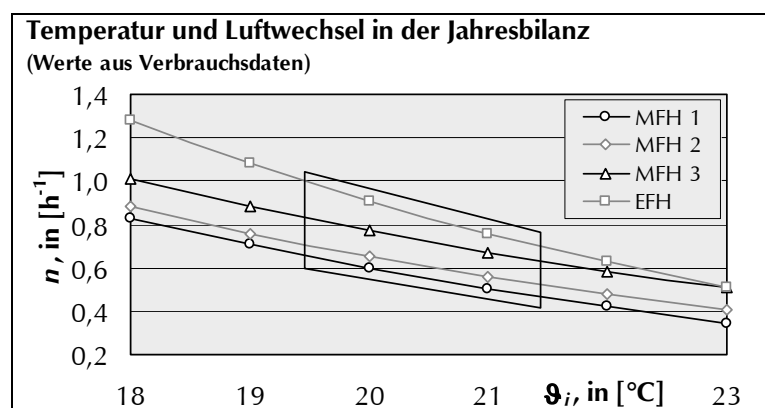


Bild 7-10 Luftwechsel und Innentemperaturen für vier Gebäude [205]

Der realistische mittlere Luftwechsel in der Heizzeit (bei einer Heizgrenze von 15 °C) liegt in den untersuchten Gebäuden bei 0,6 ... 0,8 h⁻¹ [205]. Die Untersuchung monatlicher Verbrauchswerte für zwei der MFH ergab zusätzlichen Aufschluss über das Lüftungsverhalten abhängig von der Außentemperatur. Es zeigten sich Luftwechsel in der Kernheizzeit von 0,4 ... 0,5 h⁻¹, jedoch bedeutend höhere Werte in der Übergangszeit [205]. Mit einem Bezugsnutzerprofil (ganzjährig $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$ und $\vartheta = 21 \text{ °C}$) konnten daraus mögliche Einsparpotentiale von etwa 10 kWh/(m²·a) im MFH abgeschätzt werden [205].

Das Verfahren zur monatlichen Datenauswertung wurde in der vorliegenden Arbeit über das Forschungsprojekt hinaus weiterentwickelt. Die näherungsweise Abschätzung der Heizgrenze und der inneren Fremdwärme aus Messdaten der Kernheizzeit (vgl. Kapitel 7.2.1) ermöglicht somit eine noch detailliertere Datenauswertung.

Beispielhafte Auswertung eines Niedrigenergiehauses (zu Kapitel 7.2.1 und 7.2.2)

Die in Kapitel 7.2.1 und 7.2.2 beschriebenen Möglichkeiten zur Auswertung monatsweiser Verbrauchsdaten sollen im Folgenden an einem Beispielgebäude demonstriert werden. Verbrauchsdaten (Wärmeeintrag des Heizsystems in den beheizten Bereich) und wichtige Gebäudedaten finden sich in Tabelle 7-3. Die zugehörigen Vorarbeiten sind in [33] dokumentiert.

Gebäudedaten	Heizperiode 2001/2002	Verbrauch, in [kWh/mon]	Außentemperatur, in [°C]
$A_{EB} = 1421 \text{ m}^2$	September	3135	12,6
	Oktober	3339	13,5
$V_e = 5244 \text{ m}^3$	November	9951	5,6
	Dezember	14618	0,9
$A = 2177 \text{ m}^2$	Januar	12723	3,3
	Februar	7757	6,1
$V = 3553 \text{ m}^3$	März	8173	5,9
	April	4504	8,4
$U_m = 0,394 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Mai	1045	14,1
	Juni	576	14,2

Tabelle 7-3 Objekt- und Verbrauchsdaten für ein MFH

Zunächst werden die Messdaten der Kernmonate November bis März als mittlere Leistungswerte in ein \dot{Q}, ϑ -Diagramm eingetragen. Es ergibt sich die Auftragung in Bild 7-11 a). Eine aus den Messdaten extrapolierte Heizgrenze von etwa 13 °C kann abgelesen werden.

Anhand der auf Seite 151 zu Gleichung (7-7) beschriebenen Vorgehensweise kann der reale Verlauf der Ausgleichsgerade nachgebildet werden. Für das Gebäude müssen dazu Innentemperatur, Luftwechsel und Fremdwärmeleistung in der Kernheizzeit abgeschätzt werden. In Gleichung (7-14) sind die festen Gebäudewerte bereits eingesetzt, die gesuchten Werte und die Außentemperatur müssen entsprechend ergänzt werden. Das Berechnungsergebnis der Gleichung wird als Funktion der Außentemperatur ebenfalls in ein Diagramm eingetragen – Bild 7-11 b).

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot (U_m \cdot A + n \cdot \rho \cdot c_p \cdot V) - \dot{q}_{I+S} \cdot A_{EB} \\ &= (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot \left(0,394 \cdot 2177 \frac{\text{W}}{\text{K}} + n \cdot 0,34 \cdot 2177 \frac{\text{Wh}}{\text{K}} \right) - \dot{q}_{I+S} \cdot 1421 \text{m}^2 \end{aligned} \quad (7-14)$$

Bei einer Parametervariation ist festzustellen, dass für eine vorher festgelegte Innentemperatur von 20 °C und den gegebenen U-Wert nur eine Lösung für den Luftwechsel ($n = 0,71 \text{ h}^{-1}$) und die Fremdwärmeleistung ($\dot{q}_{I+S} = 8,6 \text{ W/m}^2$) gefunden werden kann, so dass die Verbrauchsgerade exakt nachgebildet wird. Wird der Luftwechsel zu gering angenommen (z.B. mit $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$) verläuft die nachgebildete Gerade flacher, wird die Fremdwärmeleistung zu gering angesetzt, ergibt sich eine parallel nach oben verschobene Kurve.

Da die Innentemperatur nicht genau bekannt ist und vorher festgelegt wurde, kann auch über die Höhe der Fremdwärme nur eine näherungsweise Aussage getroffen werden. Es gibt jeweils korrespondierende Paare von Innentemperatur und Fremdwärmeleistung, welche die Gleichung erfüllen und jeweils zu einer Heizgrenze von 13 °C führen. Der Luftwechsel ist hingegen im Rahmen der Genauigkeit der Regression eindeutig mit der Festlegung des U-Wertes (und der Gebäudegeometriedaten) bestimmt.

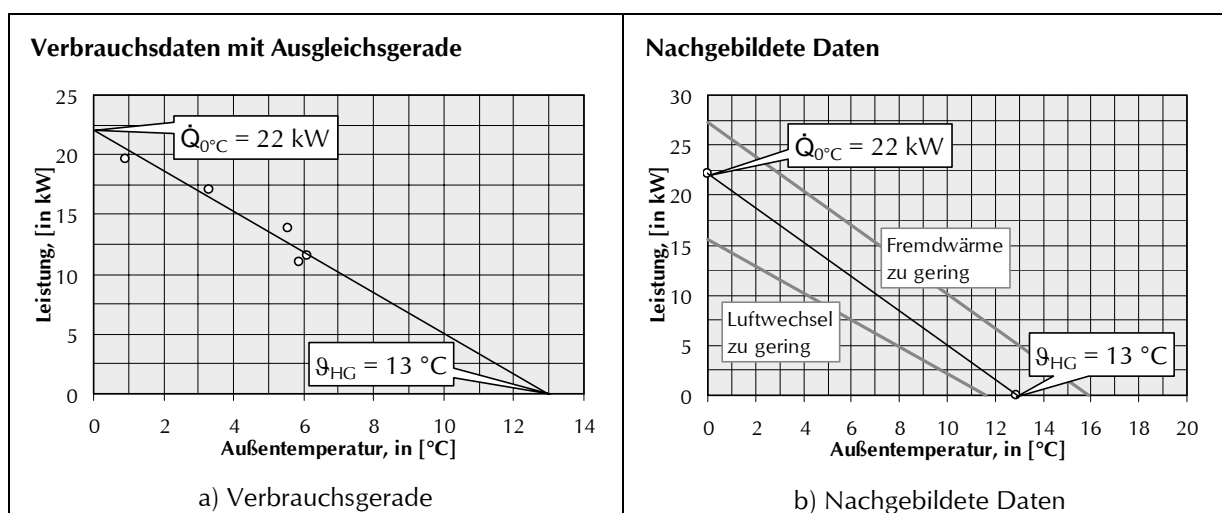


Bild 7-11 Verbrauchsdaten und nachgebildete Daten

Nachdem für Luftwechsel, Innentemperatur und Fremdwärme praxisnahe Werte abgeschätzt sind, sollen die Untersuchungen für das Gebäude nachfolgend auf das Einsparpotential ausgedehnt werden. Es wird vorausgesetzt, dass im vorliegenden Fall sowohl in der Kernheizzeit als auch in der Übergangszeit ein Verschwendungspotential vorhanden ist (vgl. Erläuterungen Seite 155, Ansatz 2).

Zur Bestimmung des Einsparpotentials müssen zunächst die Minimalwerte (Bezugswerte) definiert werden. Es wird ein Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ in der Kernheizzeit als ausreichend angesehen. Dieser Wert ist verhältnismäßig hoch, wird aber angesichts des insgesamt hohen Verbrauchs für dieses Gebäude als praktisch erreichbar gehalten. Die mittlere Bezugsinnentemperatur wird auf 20 °C festgelegt, so dass sich eine minimale Last von 1462 W/K ergibt – vgl. Gleichung (7-15).

$$\begin{aligned}
 H_{min} &= (U_m \cdot A + n_{min} \cdot \rho \cdot c_p \cdot V) \\
 &= \left(0,394 \cdot 2177 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 0,5 \cdot 0,34 \cdot 3553 \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \\
 &= 1462 \text{ W / K}
 \end{aligned} \tag{7-15}$$

Anschließend wird mit der minimalen Last die neue Heizgrenze nach Bild 7-12 abgeschätzt. Für diese wird aus den Wetterdaten des Standortes eine mittlere Außentemperatur und die Länge der neuen Heizzeit bestimmt. Daraus können mit Gleichung (7-16) die minimalen Heizgradtage bestimmt werden.

$$\begin{aligned}
 G_{g_{HG,2}} &= (g_{HG,2} - g_a) \cdot t_{HP} \\
 &= (11,5^\circ\text{C} - 5,5^\circ\text{C}) \cdot 202 \text{ d / a} \\
 &= 29 \text{ kWh / a}
 \end{aligned} \tag{7-16}$$

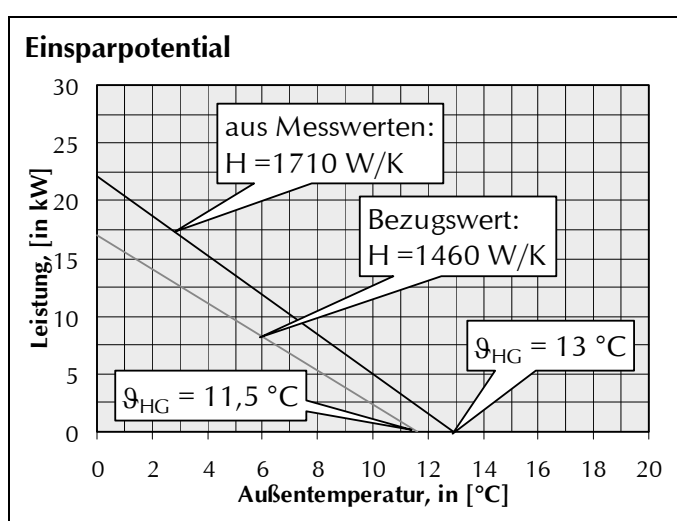


Bild 7-12 Abschätzung eines Einsparpotentials

Das Einsparpotential wird nach Gleichung (7-17) berechnet. Für das untersuchte Gebäude ergeben sich etwa 23 MWh bzw. 16 kWh/(m²·a) oder etwa 35 % bezogen auf den Verbrauch des Untersuchungsjahres. Da im Untersuchungsjahr trotz des hohen Fremdwärmeanfalls und des guten Dämmstandards ein sehr hoher Verbrauch, auch in der Übergangszeit vorgelegen hat, erscheint das hohe Einsparpotential realistisch.

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_2 &= Q_{mess} - H_{min} \cdot G_{g_{HG,2}} \\
 &= 65821 \text{ kWh / a} - 1462 \text{ W / K} \cdot 29 \text{ kWh / a} \\
 &= 23423 \text{ kWh / a}
 \end{aligned} \tag{7-17}$$

Bestimmung von Heizgrenze und Einsparpotentialen an 9 Testgebäuden

Im Rahmen einer begleitenden Diplomarbeit [33] wurden für 5 EFH und 4 MFH die Heizgrenztemperaturen nach dem in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Verfahren bestimmt. Folgende Schlussfolgerungen können aus der Auswertung gezogen werden:

- Für Gebäude, deren monatlicher Energieverbrauch über mehrere Jahre ausgewertet wurde, ergeben sich in der durchschnittlich wärmeren Heizperiode (2001/2002) höhere Heizgrenztemperaturen als in einem vergleichsweise kalten Jahr (2002/2003) [33].
- Die anhand von Verbrauchswerten abgeschätzten Heizgrenztemperaturen liegen i.d.R. höher, wenn die Monate September bis Mai anstelle der Kernheizzeitmonate November bis März herangezogen werden. Dies deutet auf einen überdurchschnittlich hohen Verbrauch in der Übergangszeit hin [33].

Die Berechnung des Einsparpotentials nur in der Übergangszeit nach dem in Kapitel 7.2.2 beschriebenen Ansatz 1 (keine Verschwendung im Winter vorausgesetzt) beträgt für die 9 Gebäude etwa 3 ... 6 % im warmen Jahr und 0 % im kalten Jahr [33].

Untersuchungen von Verteilsystemen und Zwangswärmekonsum

Die im Rahmen einer Diplomarbeit [109] durchgeführte Untersuchung des Heizenergieverbrauchs in baulich modernisierten Plattenbauten mit Fernwärmeanschluss lieferte wichtige Erkenntnisse über den Zwangswärmekonsum. Untersucht wurden Wohneinheiten mit zusammen etwa 250.000 m² beheizter Wohnfläche, von denen ein Teil mit Zweirohrheizung, der andere Teil mit Einrohrheizung ausgestattet war. Sowohl mittlerer U-Wert als auch Kompaktheitsgrad der Gebäude der untersuchten Gebäude waren nahezu identisch.

Die Bereinigung von Verbrauchsdaten ergab, dass die Gebäude mit Einrohrheizung durchschnittlich 140 kWh/(m²·a), die Gebäude mit Zweirohrheizung 110 kWh/(m²·a) verbrauchen [109]. In Gebäuden mit Zweirohrheizung wurden etwa 35 ... 45 % der Wärme über die Rohre abgegeben, während der Anteil bei der Einrohrheizung bei 80 ... 85 % lag [109]. Wegen der großen Anzahl untersuchter Wohnungen und damit nahezu auszuschließender statistischer Fehler konnte der Verbrauchsunterschied nur durch verändertes Nutzerverhalten erklärt werden. Hier war von einem Zwangswärmekonsum auszugehen, der durch das nahezu ungedämmt durch das Gebäude verlaufende, auf hohem Temperaturniveau beheizte Einrohrverteilsystem provoziert wurde.

Wärmekurzschlüsse und ihre Auswirkungen in der Energiebilanz

Bei der Begehung und Untersuchung bestehender Gebäude im Rahmen der Qualitätssicherung konnten zwei Wärmekurzschlüsse festgestellt werden, die hier näher vorgestellt werden sollen. Unter einem Wärmekurzschluss sind innerhalb des beheizten Bereichs lokal anfallende Wärmemengen zu sehen, die in einer Art Kurzschluss den beheizten Bereich wieder verlassen, ohne zur Beheizung beitragen zu können bzw. ohne vollständig genutzt zu werden.

Der erste Effekt ist das Ablüften von Heizkörperwärme hinter geschlossenen Vorhängen. Hinter den Vorhängen sind weit über der Raumtemperatur liegende Temperaturen anzutreffen. Die aufgrund der gekippten Fenster zu vermutenden Luftwechsel liegen ebenfalls weit über dem Mittelwert des Raumes oder Gebäudes. Der so im Kurzschluss abgelüftete Wärmestrom kann nicht zur Raumheizung beitragen. Da die Leistung des Heizkörpers über die Vorlauftemperatur der Witterung angepasst wird, macht sich dieser Wärmeverlust auch in der Energiebilanz als witterungsabhängiger Verlustanteil bemerkbar.

Der zweite Wärmekurzschluss beruht auf dem Ablüften von Wärmeverlusten im Estrich verlegter Rohrleitungen über eine zentrale Abluftanlage. Die in Fluren (Überströmzonen) frei werdende Wärme äußert sich in lokal erhöhten Raumtemperaturen und wird über die Ablufträume aus dem Gebäude transportiert. Im Fall der vorgefundenen innenliegenden Ablufträume, die selbst praktisch keine Heizlast hatten, bedeutet dies ebenso eine unnötige Verschwendung. Dieser Wärmekurzschluss wird in der Energiebilanz als teils witterungsabhängig (Wärmeverluste der Heizungsrohre), teils witterungsunabhängig (Wärmeverluste von Trinkwasserleitungen) sichtbar.

Forschungsprojekt zur Untersuchung von Brennwertkesseln im Feld

Die bereits in Kapitel 5.4.2 zitierte Untersuchung von 60 Brennwertkesselanlagen in Einfamilienhäusern [204] befasst sich mit der Auswirkung verschiedener Anlagenmerkmale auf den Jahresnutzungsgrad und mittleren jährlichen Kesselwirkungsgrad der Kessel sowie die absoluten Kesselverluste. Die untersuchten Anlagen und Gebäude waren keiner gesonderten Qualitätssicherung unterworfen, damit möglichst praxisnahe Ergebnisse ermittelt werden konnten.

Die monatlich erfassten Energiedaten (Wärmeabgabe des Kessels, zugeführte Gasmenge, Brennwert des Gases im Versorgungsgebiet) ermöglichen die Bestimmung der Kesseleffizienzmerkmale für eine untersuchte Anlage, vgl. Bild 7-13.

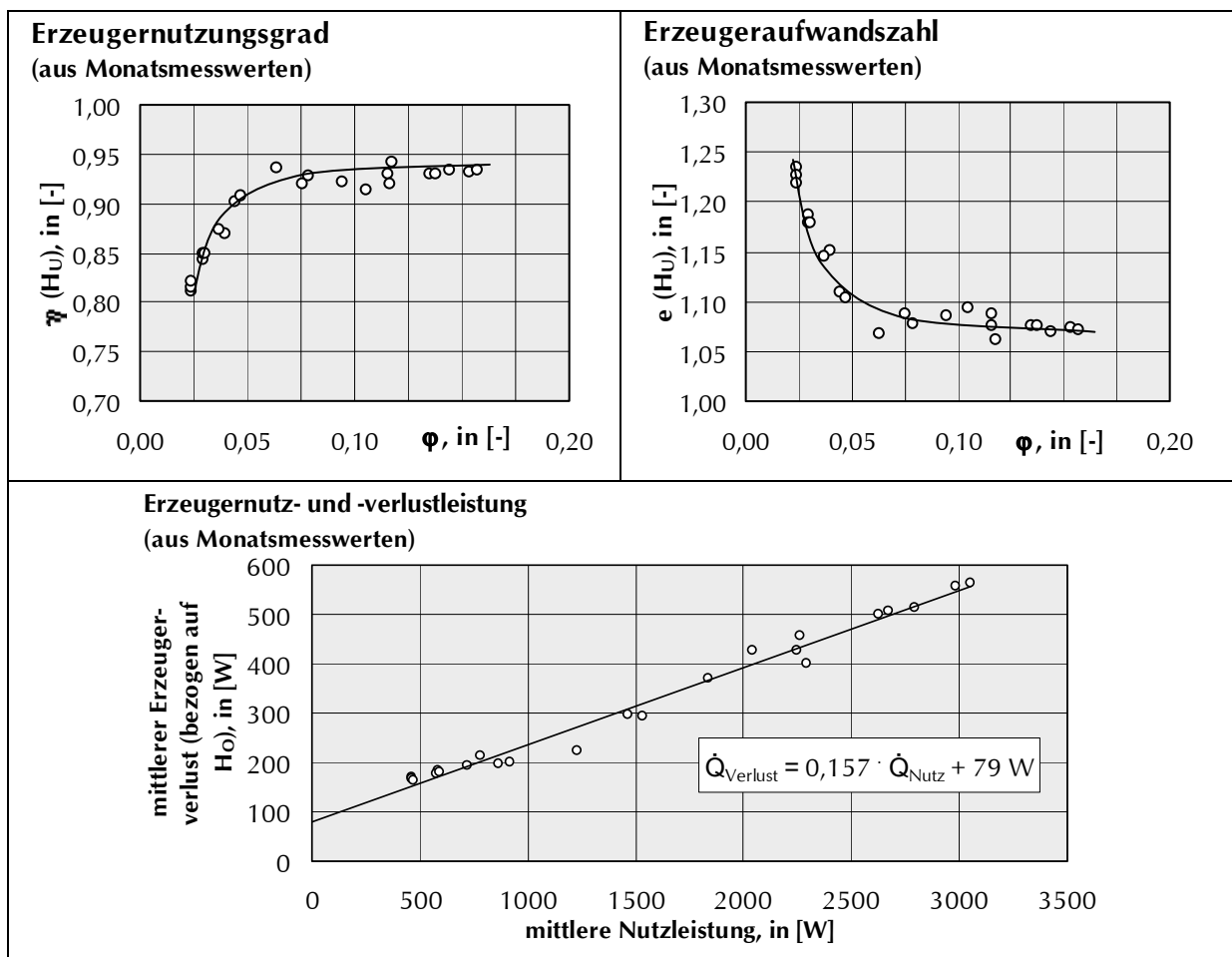


Bild 7-13 Erzeugerverluste, -nutzungsgrad und -aufwandszahl für ein Beispielgebäude (Daten aus [204])

Die Auftragungen zeigen den Verlauf der Kesselverlustleistung (bezogen auf den Brennwert H_O) sowie Nutzungsgrad und Aufwandszahl der Erzeugung (beide bezogen auf den Heizwert H_U) für ein etwa 150 m² großes EFH mit einer Brennwerttherme (Leistung ca. 20 kW). Die anhand der Kesselnennleistung bestimmte mittlere Kesselauslastung liegt bei etwa 7 %, der mittlere Nutzungsgrad bei 91 %, die Erzeugeraufwandszahl entsprechend bei 1,10.

Aus der Auftragung der absoluten Erzeugerleistungen kann der mittlere Umwandlungswirkungsgrad bestimmt werden. Er leitet sich aus der Geradensteigung ab und beträgt im Beispiel $1/(1 + 0,157) = 0,864$. Weiterhin wird eine praktisch immer vorhandene mittlere Verlustleistung von 79 W sichtbar. Diese umfasst die Bereitschafts- und Strahlungsverluste incl. der Abgasverluste zu deren Bereitstellung. Die an den umgebenden Raum abgegebene Dauerleistung ergibt sich zu $0,864 \cdot 79 \text{ W} = 68 \text{ W}$.

Ein Fazit der Untersuchungen des Projektes ist unter anderem: die Kesselauslastung ist in der Praxis sehr gering. Zusammen mit den hydraulischen und regelungstechnischen Randbedingungen ergeben sich Jahresnutzungsgrade von etwa 96 % (H_U). In Anlagen ohne Überströmventil ist der Wert höher, bei vorhandenem Überströmventil geringer als der Mittelwert [204].

Status der Anlagenqualität im Bestand

Die Untersuchung von Bestandsanlagen im Rahmen von Diplomarbeiten [140] [200] hat an entsprechender Stelle in den Erläuterungen des Kapitel 5 Eingang gefunden. An dieser Stelle soll eine kurze Zusammenfassung gegeben werden.

Die untersuchten Anlagen im Bestand weisen eine großzügige Wärmeerzeugerauslegung (Überdimensionierung fast 2,0 bezogen auf die Gebäudeheizlast), Pumpenauslegung (Leistungsüberdimensionierung etwa 2 ... 3 bezogen auf die ausreichende elektrische Leistung) und Heizkörperbemessung (Verhältnis Heizkörpernormleistung zu effektiver Raumheizlast etwa 2,0) auf. Die Durchflusswerte der eingesetzten Ventile sind etwa 7 ... 10fach zu groß. Die zentrale Heizkurveneinstellung ermöglicht nahezu unabhängig von Baualter Vorlauftemperaturen von ca. 80 ... 85 °C bei Auslegungsaußentemperatur (-15 °C). Der hydraulische Abgleich ist in deutlich weniger als 10 % der Anlagen vorhanden. (Daten nach [200]).

Innerhalb des beheizten Bereiches sind durchschnittlich 0,6 ... 0,7 Meter Rohrleitungen des Heizungs- und Trinkwarmwassersystems verlegt, meist mit nur geringem Dämmstandard [140]. Zusammenfassend betrachtet, wird dem Nutzer heute typischer Wohngebäude und Anlagen damit ein enormes Verschwendungspotential geboten. Es muss außerdem davon ausgegangen werden, dass die technischen Verluste hoch und die Effizienz der Wärmebereitstellung gering bzw. nicht dem technischen Stand der Einzelkomponenten angemessen ist.

Wirtschaftlichkeit von Qualitätssicherungsmaßnahmen im Bestand

Aus den Investitionskosten für Qualitätssicherungsmaßnahmen kann durch eine Gesamtkostenrechnung das notwendig Energieeinsparpotential zum Erreichen einer Wirtschaftlichkeit bestimmt werden (vgl. auch Kapitel 8.4.3). Die Ergebnisse der Untersuchung an realen Gebäuden zeigt Tabelle 7-4.

Maßnahmenbeschreibung	untersuchte Gebäude	Investitionskosten bezogen auf A_{EB} [€/m ²]	Erforderliche Kosten- bzw. Energieeinsparung bezogen auf den Momentanverbrauch, in [%]
Optimierung durch Einstellung aller Komponenten sowie ggf. Einbau eines Schmutzfilters	8 EFH 2 MFH	2	4 %
Optimierung mit Einstellung aller Komponenten, Einbau von voreinstellbaren THKV sowie ggf. eines Schmutzfilters	5 EFH 7 MFH	3	5 %
Optimierung mit Einstellung aller Komponenten, Einbau von voreinstellbaren THKV, Pumpe oder Differenzdruckregler sowie ggf. eines Schmutzfilters	6 EFH 3 MFH	5	9 %

Table 7-4 Wirtschaftlichkeit von Optimierungen realer Gebäude (Daten nach [200])

Abhängig vom Umfang der bereits vorhandenen Anlagentechnikkomponenten ergeben sich zu tätige Investitionen. Die QS umfasst jedoch immer eine Bestandsaufnahme sowie die Berechnung der Heizlast und des Rohrnetzes. Es zeigt sich, dass die erforderliche Energiekosteneinsparung bezogen auf den heutigen Verbrauch etwa 4 ... 5 % beträgt, wenn kein Pumpenaustausch oder Einbau eines Differenzdruckreglers nötig ist. Ist dies der Fall, steigen in den untersuchten Gebäuden die notwendigen Einsparungen auf etwa 9 %.

Dies entspricht notwendigen Energieeinsparungen an thermischer Energie von etwa 7 ... 15 kWh/(m²·a) in den untersuchten Gebäuden. Wird elektrische Energie eingespart, sinkt die notwendige Menge auf etwa 2 ... 5 kWh/(m²·a).

Fazit

Die Übersicht der in Feldprojekten gewonnenen Erkenntnisse zeigt einen kleinen Ausschnitt der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Energiebilanzverfahren zur Bewertung der Qualität. Die Untersuchungen der benannten Projekte werden in vielen Fällen künftig weitergeführt, so dass die Inhalte und Vorschläge der vorliegenden Arbeit bei der weiteren Projektauswertung genutzt werden können.

8. Wirtschaftliche Bewertung von Qualitätssicherung

8.1. Geeignete Wirtschaftlichkeitsverfahren

Ziel der wirtschaftlichen Bewertung einer Qualitätssicherungsmaßnahme ist i.d.R. ein Nachweis, dass diese betriebswirtschaftlich sinnvoll ist. Das bedeutet, durch die QS müssen die Gesamtausgaben sinken. Zu definieren ist dazu der Standpunkt des Betrachters. Es kommen beispielsweise Gebäudenutzer oder Mieter, Gebäudebesitzer oder Anlagenbetreiber, Energieversorger sowie Fachunternehmen der TGA in Frage.

Nicht alle Vorteile einer QS und eines sparsamen Energieeinsatzes lassen sich mit Geldgrößen bewerten. Durch den geringeren Energieverbrauch wird die Umwelt entsprechend weniger belastet. Die damit eingesparten sozialen und ökologischen Folgekosten (externe Kosten) werden von der betriebswirtschaftlichen Rechnung nicht erfasst. Durch Steuern oder Abgaben können diese externen Kosten zum Teil sichtbar gemacht werden, jedoch ist eine finanzielle Bewertung aller zukünftigen Schäden prinzipiell nicht möglich. Im Rahmen der Arbeit soll ausschließlich die Betriebswirtschaftlichkeit aus Sicht des Nutzers/Besitzers (Träger der Energiekosten) und des Eigentümers oder Anlagenbetreibers (Träger der Investitions- und Instandhaltungskosten) untersucht werden. Ist die QS für beide Seiten positiv, hat das Fachunternehmen TGA, das eine Optimierung durchführt, stichhaltige Argumente für die Umsetzung dieser Dienstleistung.

Zur Bewertung der QS müssen einerseits zusätzliche Ausgaben für die Umsetzung und andererseits durch QS erreichte Kostenersparnisse oder Geldeinnahmen bestimmt werden. Die direkte Kostenersparnis wird in erster Linie aus einer Energieeinsparung resultieren, sie kommt dem Nutzer zugute. Aber auch verminderte Instandhaltungskosten (geringere Wartungshäufigkeit etc.) aufgrund einer verbesserten Qualität sind Kostenersparnisse. Zusätzliche Geldeinnahmen treten beispielsweise durch Erhöhungen des Wohnkomforts bei verminderten Betriebskosten und damit einer verbesserten Vermietbarkeit auf. Beides kommt dem Gebäudebesitzer oder Anlagenbetreiber zugute. Die Ersparnisse oder Einnahmen werden zusammengefasst als "geldwerter Vorteil" bezeichnet. Die Investition für eine Qualitätssicherung im Neubau oder Bestand kann die Anschaffung von speziellen Anlagenkomponenten sein, aber auch der reine Geldwert einer optimierten Gebäudeplanung (im Bestand incl. Datenerhebung) oder Nutzerschulung. Diese Kosten trägt in erster Linie der Gebäudeeigentümer, aber indirekt über die Kaltmieten letztlich auch der Nutzer.

Bei der Bewertung der Vorteile einer QS wird als Referenzfall der Zustand ohne Qualitätssicherung herangezogen. Bezogen auf diesen Zustand werden zusätzliche Einnahmen und Ausgaben bestimmt. Das Wirtschaftlichkeitsverfahren muss also mit Differenzkosten operieren. Es müssen alle genannten Kostengruppen d.h. Investitionsausgaben, Wartungskosten, Unterhaltskosten, Energiekosten, Mieteinnahmen usw., bewertet werden können. Daher wird ein Gesamtkostenansatz gewählt.

Da die Qualität eines Gebäudes den Energieverbrauch auf mehrere Jahre festlegt, muss eine dynamische Berechnung erfolgen, mit der Preissteigerungen und zeitliche Unterschiede im Anfall der Kosten und Erlöse berücksichtigt werden können.

8.2. Gesamtkostenverfahren

Ein mögliches Gesamtkostenverfahren ist im Leitfaden für energiebewusste Gebäudeplanung LEG des hessischen Umweltministeriums [79] publiziert. Die dort beschriebene dynamische Gesamtkostenbilanz basiert auf der heute häufig eingesetzten Kapitalwertmethode. Sie wird zur Bewertung von QS im Rahmen dieser Arbeit an einzelnen Stellen erweitert.

Jahresgesamtkosten

Bilanziert werden die annuitätisch bestimmten Kapitalkosten K_i , die mittleren jährlichen Energiekosten $K_{e,m}$ sowie die mittleren jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten $K_{u,m}$ während einer definierten Nutzungsdauer. Sie ergeben zusammen die mittleren Jahresgesamtkosten K_a .

$$K_a = K_i + K_{e,m} + K_{u,m} \quad (8-1)$$

Kapitalkosten

Unter den Kapitalkosten K_i werden Tilgung und Zinsen des eingesetzten Kapitals verstanden. Sie ergeben sich aus den Investitionskosten zzgl. aller anfallenden Verwaltungskosten, Versicherungskosten usw. Vermindert werden die Investitionskosten um Zuschüsse und Subventionen sowie alle steuerlichen Absetzungs- und Abschreibungsmöglichkeiten. Soll eine Qualitätssicherung bewertet werden, dann umfassen die Investitionskosten nur den Anteil der Kosten, welcher der QS tatsächlich zuzuschreiben sind (Zusatzkosten).

Die Investitionskosten I_0 werden mit Hilfe des Annuitätsfaktors $a_{p,n}$ auf jährlich gleich hohe Raten über den Betrachtungszeitraum n verteilt. Zusätzlich wird bei einer Mischinvestition jede Einzelinvestition mit einem Faktor für Ersatzbeschaffung $f_{p,s,m,n}$ bewertet. Der Annuitätsfaktor $a_{p,n}$ wird durch den Kapitalzinssatz p für Fremd- oder Eigenkapital (ggf. inklusiv vorhandener Zinsvergünstigungen, z.B. durch private oder staatliche Förderprogramme) bestimmt.

$$K_i = \Sigma(I_0 \cdot a_{p,n} \cdot f_{p,s,m,n}) \quad (8-2)$$

$$a_{p,n} = \frac{p}{1 - (1+p)^{-n}} \quad (8-3)$$

In Mischinvestitionen, d.h. bei Investitionen mit unterschiedlich langen Nutzungsdauern wird die innerhalb des Betrachtungszeitraumes notwendige Ersatzbeschaffung für die kürzerlebigen Komponenten durch den Faktor $f_{p,s,m,n}$ berücksichtigt. Bei der Bestimmung des Faktors werden der Betrachtungszeitraum n , die gegenüber n kürzere Nutzungsdauer m , der Kapitalzinssatz p und die jährliche Preissteigerung der Anlagenkosten s_a für die zu ersetzende Komponente berücksichtigt.

$$f_{p,s,m,n} = 1 + \left(\frac{1+s_a}{1+p} \right)^m \cdot \frac{1-(1+p)^{-(n-m)}}{1-(1+p)^{-m}} \quad (8-4)$$

Bei Mischinvestitionen entspricht der Betrachtungszeitraum n der Gesamtinvestition der längsten Nutzungsdauer m aller vorhandenen Komponenten. Wenn Betrachtungszeitraum n und Nutzungsdauer m gleich lang sind, dann gilt: $f_{p,s,m,n} = 1$.

Energiekosten

Die mittleren Energiekosten $K_{e,m}$ im Betrachtungszeitraum werden aus den Endenergiemengen je nach Energieträger Q_E und dem mittleren zu erwartenden Energiepreis $k_{e,m}$ bestimmt. Wird die Wirtschaftlichkeit einer Qualitätssicherungsmaßnahme untersucht, ist für Q_E nur die durch die QS eingesparte Energiemenge einzusetzen.

$$K_{e,m} = \Sigma(Q_E \cdot k_{e,0} \cdot m_e) = \Sigma(Q_E \cdot k_{e,m}) \quad (8-5)$$

Der mittlere Energiepreis $k_{e,m}$ ist das Produkt des Energiepreises zum Zeitpunkt der Investition $k_{e,0}$ und einem Mittelwertfaktor der Energiepreisverteuerung m_e . Dieser wird von drei Faktoren bestimmt: der jährlichen Teuerungsrate der Energie s_e , der Länge des Betrachtungszeitraumes n und von der Höhe des Kalkulationszinssatzes p .

$$m_e = \frac{1+s_e}{p-s_e} \cdot \left(1 - \left(\frac{1+s_e}{1+p} \right)^n \right) \cdot a_{p,n} = \frac{1+s_e}{p-s_e} \cdot p \cdot \frac{(1+p)^n - (1+s_e)^n}{(1+p)^n - 1} \quad (8-6)$$

Wartungs- und Unterhaltskosten

Die Kosten für Wartung und Unterhalt können aus Wartungsverträgen entnommen werden oder aufgrund von Herstellerangaben, Erfahrungswerten oder Richtlinien abgeschätzt werden. Es gibt dabei z.B. die Möglichkeit, die Wartungskosten als prozentualen Wert auf die Investition abzuschätzen. Aus den Kosten für Wartung und Unterhalt zum Zeitpunkt der Investition $K_{u,0}$ werden mit dem Mittelwertfaktor der Verteuerung m_u die mittleren Kosten im Betrachtungszeitraum $K_{u,m}$ bestimmt.

$$K_{u,m} = \Sigma(K_{u,0} \cdot m_u) \quad (8-7)$$

Der Mittelwertfaktor der Verteuerung der Wartung und des Unterhaltes (allgemein der Instandhaltung, ohne Instandsetzung) m_u bestimmt sich analog dem Ansatz für m_e nach Gleichung (8-6). Anstelle der Teuerungsrate für Energie s_e ist die jährliche Teuerungsrate für Unterhaltskosten s_u einzusetzen.

Andere geldwerte Vorteile

Andere geldwerte Vorteile können nach den beschriebenen Ansätzen berücksichtigt werden. Durch QS gesteigerte Mieteinnahmen können analog den Energiekosten bewertet werden, für die ggf. eine Preissteigerung m berücksichtigt wird. Das mathematische Vorzeichen der so auf den Betrachtungszeitraum umgelegten Kosten wird durch den Betrachter festgelegt. Ausgaben erhalten ein negatives Vorzeichen, Einnahmen ein positives.

8.3. Direkte und indirekte wirtschaftliche Bewertung

Bei der wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen können unterschiedliche Vorgehensweisen zum Ziel führen. Dabei spielt es keine Rolle, welcher Art die Maßnahme ist: baulich oder auf die Anlagentechnik beschränkt, im Neubau als Planungsleistung oder im Bestand als nachträgliche Dienstleistung. Alle Verfahren bauen auf dem Gesamtkostenansatz nach Kapitel 8.2 auf. Im Folgenden werden drei Ansätze beschrieben. Allen gemein ist, dass es einen geldwerten Vorteil der Qualitätssicherungsmaßnahme geben muss, damit eine betriebswirtschaftliche Betrachtung stattfinden kann.

Direktes Verfahren: Gesamtkostenersparnis

Das direkte Verfahren basiert auf der Idee, dass sowohl der geldwerte Vorteil der QS als auch der in Kosten ausgedrückte Aufwand zur Umsetzung der Maßnahme bekannt sind. Mit diesen beiden Größen kann direkt eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit gemacht werden. Sind in einer Gesamtkostenbetrachtung die Kosten für die Umsetzung geringer als der damit erreichbare geldwerte Vorteil, so ist die Umsetzung wirtschaftlich.

Diese Betrachtung schließt die üblichen wirtschaftlichen Unsicherheiten ein: die Entwicklung des Energiepreises oder ggf. des Mietpreises, allgemeine Preissteigerungen usw. Weitere Unsicherheiten liegen jedoch vor allem in der Bestimmung des Vorteils der Qualitätssicherung selbst. Es müssen schon vor der Optimierung konkrete Aussagen zur Höhe der Energieeinsparung, Verminderung der Instandhaltungsaufwendungen oder der besseren Vermietbarkeit getroffen werden. Diese Aussagen sind i.A. auch ohne den betriebswirtschaftlichen Aspekt (der Geldbewertung) schwierig.

Indirektes Verfahren: Notwendiger geldwerter Vorteil

Mit dem indirekten Bewertungsverfahren wird der umgekehrte Ansatz gewählt. Die Idee ist die Definition einer "Grenz-Wirtschaftlichkeit". Es wird ein bekannter Kostenaufwand zur Umsetzung der Qualitätssicherungsmaßnahme vorausgesetzt. Aus diesem Aufwand wird der minimal notwendige geldwerte Vorteil bestimmt, den die Qualitätssicherung erbringen muss, um gerade an der Wirtschaftlichkeitsgrenze zu liegen. Dieser Vorteil wird, je nach Betrachter in eine Mindestenergieeinsparung oder minimale Steigerung der Vermietbarkeit umgerechnet.

Auch diese Betrachtung ist mit die üblichen wirtschaftlichen Unsicherheiten, v.a. der Energiepreisentwicklung, behaftet. Das Erreichen einer Wirtschaftlichkeit kann dennoch besser abgeschätzt werden. Denn obwohl die mögliche Energieeinsparung, Verminderung der Instandhaltungsaufwendungen oder die bessere Vermietbarkeit ggf. nur mit großer Bandbreite bekannt sind, kann eine Aussagen gemacht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die notwendige Ersparnis eintritt. Dieser Ansatz wird als der praktikabelste angesehen und vertieft verfolgt.

Äquivalenter Energiepreis

Das Verfahren des äquivalenten Energiepreises zählt zu den indirekten Wirtschaftlichkeitsverfahren. Der äquivalente Energiepreis ist der Quotient aus den mittleren jährlichen Zusatzkosten, die durch die Einsparmaßnahme entstehen, und der prognostizierten eingesparten Energiemenge. Eine Energieeinsparmaßnahme wird als wirtschaftlich angesehen, wenn insgesamt Kosten eingespart werden können, d.h. der erreichbare äquivalente Energiepreis unter dem mittleren Energiepreis liegt.

Bei der Bestimmung des äquivalenten Energiepreises geht keine Annahme über die künftige Energiepreisentwicklung ein. Daher ist der "Preis pro eingesparte Kilowattstunde" ein relativ verlässlicher Wert. Die Unsicherheit steckt bei dieser Betrachtung ausschließlich in dem gewählten Wirtschaftlichkeitskriterium $k_{e,m}$. Es kann die Aussage gemacht werden, bis zu welchem mittleren jährlichen Energiepreis $k_{e,m}$ die Energieeinsparmaßnahme wirtschaftlich ist. Die Anwendung dieses Verfahrens ist jedoch an eine möglichst genaue Angabe der Energieeinsparung gebunden. Andere geldwerte Vorteile lassen sich in diesem Ansatz nur schwer berücksichtigen, daher wird er nicht weiter verfolgt.

8.4. Kostenbandbreite und Wirtschaftlichkeitsgrenze von Qualitätssicherungsmaßnahmen

Im Folgenden werden Kostenbandbreiten für die anlagentechnische Qualitätssicherung und Nutzerschulungen abgeschätzt. Daraus werden der notwendige geldwerte Vorteil bzw. die notwendige Energieeinsparung zum Erreichen der Wirtschaftlichkeitsgrenze bestimmt. Die Wirtschaftlichkeit baulicher Maßnahmen – Wärmebrückenoptimierung, Luftdichtheitskonzept usw. – wird nicht näher betrachtet; hier wird auf andere Untersuchungen verwiesen.

8.4.1. Wirtschaftliche Grunddaten

Die zur Gesamtkostenberechnung notwendigen Annahmen und Randdaten werden in Tabelle 8-1 erläutert.

Alle Kostendaten innerhalb dieser Arbeit werden ohne Mehrwertsteuer angegeben. Nach der in Tabelle A-6 (Anhang, Seite 217) gezeigten Ableitung ergibt sich bei heutigen Preisen ein mittlerer Energiepreis für die thermischen Energien von $k_{e,0} = 0,038 \text{ €/kWh}$ und für den Haushaltsstrom von $k_{e,0} = 0,134 \text{ €/kWh}$. Der Stundenlohn einer Handwerkerstunde ergibt sich zu 38 €/h .

Größe	Wert	Erläuterung
Allgemeine Grunddaten		
Kapitalzinssatz, nominal	$p = 0,06 \text{ a}^{-1}$	langfristiger Mittelwert [79] [82] [89]
Energiepreisverteuerung, nominal	$s_e = 0,06 \text{ a}^{-1}$	langfristiger Mittelwert [79] [82] [89]
Anlagenteuerung, nominal	$s_a = 0,02 \text{ a}^{-1}$	langfristiger Mittelwert [79] [82] [89]
Preissteigerung für Wartung und Unterhalt, nominal	$s_a = 0,03 \text{ a}^{-1}$	langfristiger Mittelwert [79] [82] [89]
Bewertung anlagentechnischer Maßnahmen zur QS		
Betrachtungszeitraum	$n = 15 \text{ a}$	längste aller Nutzungszeiten
Nutzungszeit (Abschreibungszeit)	$m = 15 \text{ a}$	für: hydraulischen Abgleich und alle Vorarbeiten, THKV, Differenzdruckregler, Schmutzfänger [79]
	$m = 10 \text{ a}$	für: Pumpen [79]
Annuität	$a_{p,n} = 0,103 \text{ a}^{-1}$	$p = 0,06 \text{ a}^{-1}$ und $n = 15 \text{ a}$
Faktor für Nachinvestitionen	$f_{p,s,m,n} = 1,390$	für Komponenten mit 10 Jahren Lebensdauer; $p = 0,06 \text{ a}^{-1}$, $s = 0,02 \text{ a}^{-1}$, $m = 10 \text{ a}$, $n = 15 \text{ a}$
Wartungsansatz	20 €/a	für: Filter (bei heutigen Preisen)
	keine Wartungskosten	für: THKV, Pumpen, Differenzdruckregler, hydraulischen Abgleich
Bewertung von Nutzerschulungen		
Betrachtungszeitraum und Nutzungszeit (Abschreibungszeit)	$n = m = 2 \text{ a}$	
Annuität	$a_{p,n} \approx 0,5 \text{ a}^{-1}$	vereinfachte Betrachtung; $n = 2 \text{ a}$

Tabelle 8-1 Randdaten der Wirtschaftlichkeit

8.4.2. Nutzerschulungen

Die etwa alle zwei Jahre zu wiederholende Nutzerschulung dient der Aufklärung des Nutzers über sein Energieverbrauchsverhalten – inklusive der Bereiche Wasser- und Elektroenergieeinsparung. Im optimalen Fall nehmen 25 ... 30 Personen an einer Schulung teil. Aufgrund eigener Erfahrungen mit Qualitätssicherungsprogrammen wird davon ausgegangen, dass etwa ein Drittel der Bewohner durch eine Schulung erreichbar ist. Es ergeben sich Kostenbandbreiten nach Bild 8-1 (weitere Randdaten siehe Tabelle A-9 im Anhang, Seite 218). Ein realistischer Preis für eine Nutzerschulung beträgt demnach bezogen auf die Fläche 0,15 €/m².

Mit der Annuität von 0,5 a⁻¹ und dem Energiepreis von 0,038 €/kWh ergibt sich eine notwendige mittlere Einsparung für thermische Energien von 2 kWh/(m²·a) zum Erreichen der Wirtschaftlichkeitsgrenze. Alternativ ist die Verminderung des elektrischem Energieverbrauchs um etwa 0,6 kWh/(m²·a) denkbar. Jede Einsparung darüber hinaus sowie alle Einsparungen ab dem dritten Jahr nach der Nutzerschulung erhöhen die Wirtschaftlichkeit.

Bei typischen Endenergieverbräuchen für Heizwärme und Trinkwarmwasser von 70 kWh/(m²·a) (NEH) bis 200 kWh/(m²·a) (Bestand) sowie Stromverbräuchen von 25 kWh/(m²·a) erscheint die Nutzerschulung als wirtschaftlich sehr sinnvoll. Im Dreiliterhaus oder Passivhaus dürfte die wirtschaftliche Grenze erreicht sein, wobei bei dieser Nutzerstruktur i.A. auch nicht von einer Energieverschwendung auszugehen ist. Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass

Nutzerschulungen den – ökologisch und/oder ökonomisch bedingten – Willen des Nutzers zur Einsparung erfordern.

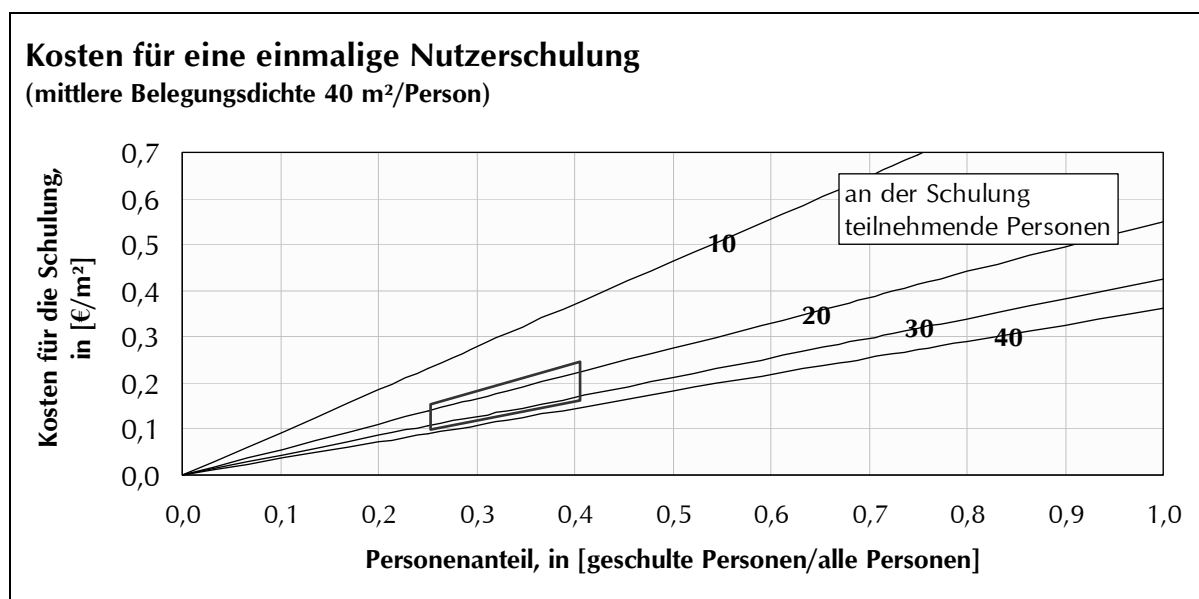


Bild 8-1 Kosten für die Nutzerschulung (ohne MWSt.)

Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlichen Kostenträgern

Trägt der Mieter die Kosten für die Schulung von ca. 20 ... 30 €/Person selbst, ergibt sich die Wirtschaftlichkeit wie oben beschrieben. Kostenträger und Empfänger des geldwerten Vorteils ist der Nutzer. Die Motivation der Mieter, an einer Schulung teilzunehmen, wird bei dieser Lösung jedoch als gering angesehen.

Übernimmt der Vermieter die Kosten und legt sie bei der nächsten Kaltmieterhöhung um, ist zu oben benannten Preisen eine Mietpreissteigerung von unter 1 Cent je Quadratmeter und Monat zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit notwendig. Die Energieeinsparung verbucht der Mieter zudem positiv. Über eine Erhöhung der Vermietbarkeit soll in diesem Zusammenhang nicht spekuliert werden, da die effektiven Geldbeträge zu gering sind.

8.4.3. Anlagentechnische Maßnahmen im Bestand

Bietet ein Gebäude nach einer Grobuntersuchung – z.B. anhand einer Typologie gemäß Kapitel 7.4.3 – Einsparpotentiale im Bereich Anlagentechnik, folgen entsprechende Planungsberechnungen und die Umsetzung einer Optimierung vor Ort. Die anfallenden Kosten bestimmen die notwendige minimale Einsparung. Die anlagentechnische Qualitätssicherung kann in verschiedener Detailtiefe erfolgen. Im Folgenden soll der Schwerpunkt bei der Bestimmung von Kostenansätzen für die Optimierung immaterieller Merkmale der Heizungsanlage liegen, weil in der Praxis hierzu nur wenige bzw. keine Standardkennwerte existieren.

Für die Optimierung materieller Merkmale, z.B. eine nachträgliche Leitungsdämmung oder den Einbau elektronischer Einzelraumregler, sind vor allem Komponentenkosten abzuschätzen.

Hierzu wird auf andere Veröffentlichungen verwiesen. Gleiches gilt für die Optimierung von Trinkwarmwasser- oder Lüftungsanlagen, die analog der Optimierung einer Heizungsanlage behandelt werden können. Nachträgliche Eingriffe, die mit weiterführenden baulichen Arbeiten verbunden sind, z.B. Dämmung von Rohren in unzugänglichen Lagen, sind für die Praxis praktisch nicht relevant. Sofern sowieso bauliche oder rechtlich verordnete Maßnahmen anstehen, sollten diese Arbeiten mit ausgeführt werden. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt in diesem Fall meist nicht.

Stufen der Optimierung im Bestand

Eine Optimierung immaterieller Anlagenmerkmale umfasst die Erfassung des Istzustandes mit einer Dokumentation sowie die Neu- oder Nachrechnung der Heizlast, des Rohrnetzes und der Heizkörperdimensionierung, ebenfalls mit einer Dokumentation der Einstellwerte und gegebenenfalls der Planrechnungen. Folgende Stufen werden hinsichtlich anfallender Kosten untersucht:

1. Nicht investive Optimierung mit Einstellung aller vorhandenen Komponenten (Pumpe und/oder Differenzdruckregler, zentrale Regler, Thermostatventile).
2. Gering investive Optimierung mit Einbau von Differenzdruckreglern und Schmutzfiltern sowie Einstellung aller Komponenten wie unter 1.
3. Höhere Investitionen mit Einbau einer neuen Pumpe, eines Schmutzfilters und voreinstellbarer THKV für alle Heizkörper sowie Einstellung aller Komponenten wie unter 1.
4. Hoch investive Maßnahmen mit Einbau eines Differenzdruckreglers, eines Schmutzfilters und einstellbarer THKV für alle Heizkörper sowie Einstellung aller Komponenten wie unter 1.

Kostenbandbreite

Die Dokumentation der realen Kosten mehrerer umgesetzter Qualitätssicherungsprojekte im Großraum Braunschweig, in Bremen und Wilhelmshaven [200] liefert verallgemeinerbare Kostenkennwerte. Die Verallgemeinerung erfolgt für die beiden in Kapitel 6.5 beschriebenen Typgebäude. Kern der Optimierung ist die Anwendung eines Rechenprogramms zur vereinfachten Heizlast- und Rohrnetzberechnung [67] [88].

Mit den Unsicherheiten, die aus individuellem Zeitbedarf und Stundenlöhnen der ausführenden Handwerksunternehmen resultieren, ergeben sich die Kennwerte in Tabelle 8-2.

Unter Beachtung der Unsicherheiten der Kostenabschätzung weisen gering investive Maßnahmen, bei denen keine voreinstellbaren Thermostatventile nachgerüstet werden müssen, Kosten von etwa 1 ... 3 €/m² auf. Bei hoch investiven Maßnahmen mit Einbau von voreinstellbaren THKV sowie Pumpen oder Differenzdruckreglern ergeben sich Kosten in der Größenordnung von etwa 4 ... 6 €/m². Eine detaillierte Aufstellung der Kosten befindet sich in Tabelle A-7 im Anhang auf Seite 217.

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

Kosten (ohne MWSt.)			EFH $A_{EB} = 156 \text{ m}^2$	MFH $A_{EB} = 840 \text{ m}^2$
Paket 1	Investitionskosten	€	270	1200
	... bezogen auf A_{EB}	€/m ²	1,7	1,4
Paket 2	Investitionskosten	€	520	1900
	... bezogen auf A_{EB}	€/m ²	3,3	2,3
Paket 3	Investitionskosten	€	830	3500
	... bezogen auf A_{EB}	€/m ²	5,3	4,2
Paket 4	Investitionskosten	€	800	3900
	... bezogen auf A_{EB}	€/m ²	5,1	4,6

Tabelle 8-2 Kosten der Optimierung der Anlagentechnik

Notwendiges Einsparpotential für die Wirtschaftlichkeitsgrenze

Auf Basis der Investitionskosten nach Tabelle 8-2 liefert eine Gesamtkostenrechnung (Dokumentation in Tabelle A-8 im Anhang, Seite 218) jährlich notwendige Energieeinsparungen zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit innerhalb von 15 Jahren. Die zusammengefassten Ergebnisse der Gesamtkostenrechnung zeigt Tabelle 8-3.

Da die zusätzlichen Kapital- und Wartungskosten sowohl durch Einsparung von thermischer als auch elektrischer Energie kompensiert werden können, sind hier zwei alternative Grenzwerte angegeben. Zum einen ist dies die einzusparende Energiemenge, wenn nur thermische Energie gespart wird und alternativ die Energiemenge, die bei einer reinen Verminderung des Hilfsstromverbrauchs wirtschaftlich notwendig ist. Notwendige Einsparmengen für andere Energiepreise, Preissteigerungen und gemischte Einsparungen können aus den Kostendaten nach Tabelle A-8 (Anhang, Seite 218) bestimmt werden.

Optimierungsumfang	alternativ einzusparende Energiemenge (thermisch oder elektrisch) bezogen auf A_{EB}	EFH	MFH
Paket 1	$q_{E,thermisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	6	3
	$q_{E,elektrisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	2	1
Paket 2	$q_{E,thermisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	8	4
	$q_{E,elektrisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	2	1
Paket 3	$q_{E,thermisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	13	8
	$q_{E,elektrisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	4	2
Paket 4	$q_{E,thermisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	11	9
	$q_{E,elektrisch}$ in [kWh/(m ² ·a)]	3	2

Tabelle 8-3 Notwendiges Einsparpotential für die Wirtschaftlichkeit der Optimierung

Für MFH, in denen bereits vor der Optimierung voreinstellbare THKV vorgefunden werden, sind beispielsweise thermische Energieeinsparungen von 3 ... 4 kWh/(m²·a) zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit notwendig. Dieser Wert erscheint angesichts typischer Energieverbrauchswerte im Bestand von 150 ... 200 kWh/(m²·a) erreichbar.

Müssen eine neue Pumpe und Thermostatventile installiert werden, steigen die Kosten stark an, so dass thermische Energieeinsparungen von etwa 10 kWh/(m²-a) oder Einsparungen an elektrischer Energie von etwa 3 kWh/(m²-a) notwendig werden. Die Energieeinsparung kann jedoch hier gleichzeitig aus elektrischer und thermischer Energie erfolgen, so dass die Einzelmengen zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit sinken. Grundsätzlich ergeben sich im MFH die niedrigeren notwendigen Einsparpotentiale.

Wirtschaftlichkeit für Mieter und Eigentümer

Der Eigentümer des Gebäudes trägt zunächst die Kosten für die anlagentechnische Optimierung, der Nutzer profitiert in erster Linie durch verminderte Energiekosten.

Kosten für Anlagensanierungen, welche die energetische Qualität verbessern, kann der Eigentümer i.d.R. zu 100 % auf die Mieter in Form erhöhter Kaltmieten umlegen [91]. In diesem Fall ist die Maßnahme für den Eigentümer auf jeden Fall wirtschaftlich neutral. Die Kosten übernimmt indirekt der Mieter. Für ihn ergibt sich eine Wirtschaftlichkeit erst bei Energieeinsparung über das in Tabelle 8-3 genannte Maß hinaus. Eine gleichzeitige Nutzerschulung ist in diesem Fall angebracht.

Legt der Vermieter die Investitionskosten nicht um, sondern wirbt mit geringen Energiekosten für seine Gebäude, muss er zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit die Vermietbarkeit steigern bzw. einen vorhandenen Leerstand vermindern. Bei einem angenommenen typischen monatlichen Kaltmietpreis von 5 €/m² und etwa gleich hohen, einmaligen Kosten für die Optimierung ergibt sich eine notwendige Steigerung der vermieteten Fläche um etwa 2 Prozent über einen Zeitraum von 5 Jahren oder etwa 1 Prozent über einen Zeitraum von 10 Jahren. Dies erscheint angesichts des Kostendruckes auf die potentiellen Mieter erreichbar. Für den Mieter ist die Investition dann auf jeden Fall wirtschaftlich.

Schulungskosten und Wirtschaftlichkeit für das SHK-Unternehmen

Die Planung und Ausführung einer anlagentechnischen Optimierung erfordert i.d.R. eine Schulung der beteiligten Fachkräfte, vor allem im Umgang mit entsprechender Software, wie des oben benannten Rechenprogramms zur vereinfachten Heizlastberechnung und Rohrnetz-berechnung, das bereits in der Praxis eingesetzt wurde [67] [88]. Für den Wohnungsbau kann Planung und Ausführung durch ein Handwerksunternehmen erfolgen. Die anfallenden Kosten sind aus Praxisprojekten abgeschätzt und in Bild 8-2 wiedergegeben (Randbedingungen siehe Tabelle A-10 im Anhang auf Seite 218).

Bei einer typischen Teilnehmerzahl von 5 bis 10 Unternehmen pro Schulung und anschließend durchgeführten 20 Optimierungen liegt der Preis je Optimierung bei etwa 80 €/Gebäude. Diese Summe umfasst die Kosten der Schulung (ca. 20 ... 25 %) und darüber hinaus die entgangenen Gewinne, die dem Handwerksunternehmen dadurch entstehen, dass Mitarbeiter während der Zeit der Schulung nicht produktiv tätig sein konnten. Gewinne aus umgesetzten Optimierungen, die diese Grenze übersteigen, machen die Optimierung für das Unternehmen wirtschaftlich. Es ist also in jedem Fall bei der Umsetzung von QS von einem Gewinn für die Unternehmen auszugehen.

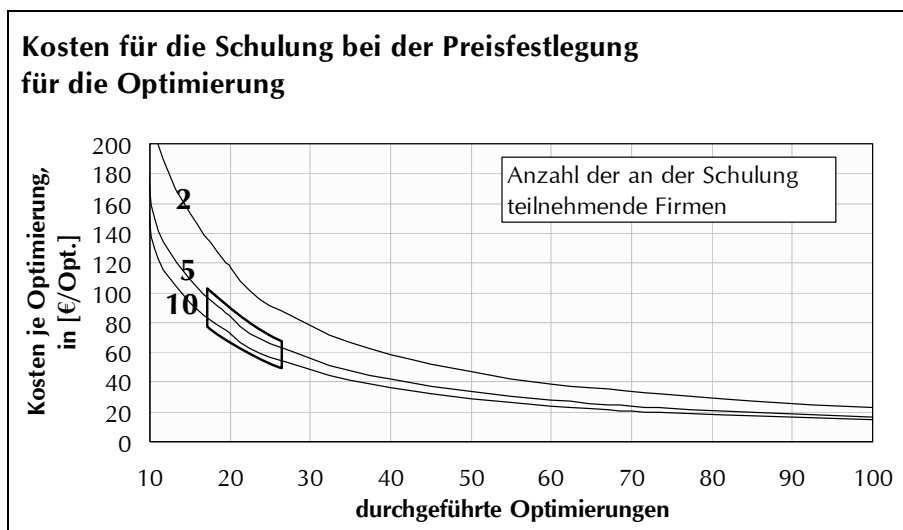


Bild 8-2 Schulungskosten für das Handwerksunternehmen

8.4.4. Optimierung der Anlagentechnik im Neubau

Im Neubau ergeben sich die im Folgenden beschriebene Mehr- und Minderkosten einer QS der Anlagentechnik gegenüber der heute typischen Planung und Ausführung.

Kosten für die Planung und Umsetzung immaterieller Merkmale

Analog der Abschätzung der Optimierungskosten für den Bestand können Kosten für Planungs- und Umsetzungsleistungen im Neubau abgeschätzt werden. Die benötigte Arbeitszeit für die einzelnen Arbeitsschritte entspricht den Randdaten der Optimierung von Bestandsanlagen. Die im Neubau nicht notwendige, zeitintensive Aufnahme vor Ort kann in einem ersten Ansatz durch eine genauere Berechnung des Rohrnetzes ausgeglichen werden.

Es ergeben sich somit Kosten für die Heizlastberechnung, die Rohrnetzberechnung, Heizflächen-, THKV- und Wärmeerzeugerauswahl, Einstellung von THKV, Pumpen und ggf. Differenzdruckreglern sowie zentralen Reglern und eine nachvollziehbare Dokumentation. Für die genannten Positionen kann mit Investitionskosten von etwa 1,5 €/m² im MFH und 2 €/m² im EFH gerechnet werden. Voraussetzung ist die Anwendung von Softwareprogrammen zur Berechnung.

Kosten für materielle Merkmale

Eine qualitätsgesicherte Planung (Leistungsbemessung) führt zu verminderten, angepassten Erzeugerleistungen. Dies vermindert vor allem im MFH die Investitionskosten und Leistungspreise im Betrieb. Der Einbau von Kesseln ohne Anforderung an einen Mindestvolumenstrom (vgl. Kapitel 5.4.2) im EFH ist dagegen mit Mehrkosten verbunden, wobei es diese Geräte am Markt gibt.

Die Einstellung der zentralen Regelung nach den Planungsvorgaben sowie Kosten für die Planung sind in dem oben angegebenen Summenpreis enthalten.

Eine hydraulische Planung vermindert die Investitionskosten für Pumpen. Bei Kompaktgeräten für das EFH hat der Planer i.d.R. keinen Einfluss auf die Leistung der integrierten Pumpe. Geräte, die eine beliebige externe Pumpe zulassen, sind derzeit noch teurer als Normalgeräte. Gleiches gilt

für Hocheffizienzpumpen. Die Kosten für die korrekte Planung und Einstellung sind im oben angegebenen Summenpreis enthalten. Muss ein Differenzdruckregler eingebaut werden, erhöht sich die Investition um etwa 0,5 ... 1 €/m².

Die Bemessung von Heizflächen nach einer Leistungsbemessung kann Installationskosten sparen, wenn die Spreizung entsprechend groß und damit die Heizflächen klein gewählt werden. Hier stehen die Planungskosten den Investitionskosten gegenüber. Die Planungskosten sind im oben angegebenen Preis enthalten. Für den Einsatz von THKV mit kleineren Durchlasswerten und Möglichkeiten einer Voreinstellung fallen gegenüber heutiger Praxis keine Investitionsmehrkosten an. Die Hersteller bieten alle Modelle zu etwa gleichen Kosten an. Für Ventilheizkörper sind allerdings kleinere und voreinstellbare THKV ab Werk zu fordern. Die Kosten für die Planung und Umsetzung eines hydraulischen Abgleichs sind im oben angegebenen Preis enthalten.

Das Verteilnetz stellt eine besondere Anforderung an die Planung und Ausführung. Die Kosten für die Planung der optimierten Anordnung der Heizflächen und Warmwasserentnahmestellen können an dieser Stelle nicht geschätzt werden. Für den Einsatz stärkerer Leitungsdämmung sind u. U. zusätzliche Fußbodenaufbauten erforderlich, deren bauliche Mehrkosten je Gebäude unterschiedlich sind. Die ordnungsgemäße Umsetzung von Dämmungen vor Ort erfordert ggf. eine Qualifizierung des Baupersonals.

Fazit

Für die Planung und Ausführung einer qualitativ hochwertigen Anlagentechnik, incl. Qualifizierung des Personals und der oben genannten Summe für die immateriellen Merkmale werden etwa 5 ... 8 €/m² als realistisch angesehen. Dies entspricht bei heutigen Baupreisen etwa 0,5 % der Investitionssumme. Die Grenzwirtschaftlichkeit erfordert bei einer 15-jährigen Betrachtung eine mittlere jährliche Energieeinsparung von 10 ... 15 kWh/(m²-a).

9. Regeln für die Qualitätssicherung in der Praxis

Ziel der Umsetzung von Qualitätssicherungsmaßnahmen der Anlagentechnik ist eine Verminderung des Energieverbrauchs bei gleichzeitig komfortablen Nutzungsbedingungen. Gleichzeitig soll die Schwankungsbreite des Energieverbrauchs von Gebäuden sowie Wohnungen eines Mehrfamiliengebäudes untereinander vermindert werden. Die folgenden Ausführungen ergänzen die Hinweise zur QS aus Kapitel 5 und geben sie in Form von Checklisten wieder.

9.1. Hinweise zur Anwendung

QS für Planung, Ausführung und Nutzung

Die QS umfasst alle Stufen von der Planung des Gebäudes über die Ausführung bis zur Nutzung. Für die in Kapitel 6.5 benannten Energieverbrauchstypen sind jeweils unterschiedliche Planungsstufen bedeutsam, siehe Tabelle 9-1. Gebäude des Typs 1 mit stark überhöhtem Verbrauch benötigen vor allem die QS der Planung und Ausführung der Anlagentechnik, für die Typen 2 und 3 ist die QS der Nutzung besonders notwendig.

Energieverbrauchstyp		
Typ 1	extrem hoher Verbrauch mit Nutzung des Verschwendungspotentials	Die QS der Planung und Ausführung von Anlagentechnik führt zu einer Drosselung des Verschwendungspotentials. Sie verbessert gleichzeitig die Effizienz der Energiebereitstellung. Beide Effekte mindern den Verbrauch.
		Eine QS der Nutzung muss erfolgen, damit das künftig verminderte Wärmeangebot akzeptiert wird und eine Veränderung des Nutzerverhaltens erfolgt.
Typ 2	leicht überhöhter, auch mit optimierter Technik erreichbarer Verbrauch	Die QS der Planung und Ausführung der Anlagentechnik verbessert hier hauptsächlich die Effizienz der Energiebereitstellung
		Eine Aufklärung der Nutzer im Rahmen von QS kann zu einem veränderten Verhalten führen und damit eine Minderung des Verbrauchs bewirken.
Typ 3	durchschnittlicher oder unterdurchschnittlicher Energieverbrauch	Die QS der Planung und Ausführung der Anlagentechnik kann hier die Effizienz der Energiebereitstellung verbessern.
		Auf eine QS der Nutzung kann verzichtet werden.

Tabelle 9-1 Notwendige Stufen der QS und ihre Effekte

Die Planung und Ausführung umfasst in jedem Fall die Dokumentation der Berechnungen und Einstellungen vor Ort, damit eine Fortschreibung der QS erfolgen kann.

QS im Neubau und Bestand

QS kann im Neubau und Bestand durchgeführt werden, wobei jeweils andere Anforderungen an die Planung, Ausführung und Nutzung gestellt werden. Wegen der im Bestand vorhandenen unveränderlichen bzw. nur kostenintensiv änderbaren Randdaten (unzugänglich verlegte Leitungen, vorhandene Heizkörper etc.) kann ein optimaler, mit dem Neubau vergleichbarer Standard ggf. nicht erreicht werden. Im ungünstigsten Fall beschränkt sich die QS im Bestand auf Hinweise zur Nutzung.

Sicherung der materiellen und immateriellen Qualität

Aus Kostengesichtspunkten ist eine Verbesserung der immateriellen Qualität vorhandener Komponenten grundsätzlich empfehlenswert. Im Bestand, aber auch im Neubau ist dies vielfach der wirtschaftlichste Weg zur Energieeinsparung. Ein Austausch von Komponenten im Bestand ist grundsätzlich zu prüfen. Dies gilt vor allem für hoch investive Eingriffe wie die Veränderung von Verteilsystemen oder den Austausch des Wärmeerzeugers.

9.2. Checklisten zur Qualitätssicherung

Die Checklisten zur Qualitätssicherung nach Tabelle 9-2 und Tabelle 9-3 sind Weiterentwicklungen früherer Arbeiten [88] [89]. Im Folgenden werden zunächst Hinweise zur Nutzerinformation, anschließend zur Sicherung der anlagentechnischen Qualität gegeben.

Der Nutzer muss in jedem Fall in den Prozess der QS eingeschaltet werden. Bei Gebäuden mit sehr hohem Verbrauch (Typ 1, vgl. Kapitel 6.5) ist ohne Nutzerinformation – vor allem im Mehrfamilienhaus – von einer geringen Akzeptanz der neuen Bedingungen auszugehen. Die resultierenden Mieterbeschwerden führen im schlimmsten Fall dazu, dass der Hausmeister die durchgeführte QS rückgängig macht. Bei Gebäuden mit vergleichsweise geringem Verbrauch (Typ 2 und 3, vgl. Kapitel 6.5) wird durch die Aufklärung der Nutzer der Effekt der QS der Anlagentechnik entscheidend unterstützt. Ohne Mitwirken der Nutzer beschränkt sich der Einspareffekt in diesen Gebäuden vielfach nur auf die Effizienzverbesserung der Wärmebereitstellung.

Es sollte eine Aufklärung über folgende Grundsätze und Zusammenhänge erfolgen:

- Werte für typische Raumtemperaturen und Einfluss der Raumtemperatur auf die Heizkosten,
- Information über richtiges Lüftungsverhalten und Einfluss der Lüftung auf die Heizkosten,
- Verhalten während des eingeschränkten Heizbetriebs (starke Raumauskühlung durch Dauerlüftung vermeiden) und während der Schnellaufheizung danach (möglichst keine Lüftung),
- Information über die richtige Bedienung der Heizungsregelung (sofern notwendig), der Lüftungsanlage (sofern vorhanden) und der dezentralen Regelung (Thermostatventile etc.),
- Aufklärung über die Vor- und Rücklauftemperaturen im Winter (geringe Rücklauftemperaturen sind ggf. geplant) und in der Übergangsjahreszeit (Vorlauftemperaturen am Heizkörper unter Hautoberflächentemperatur),
- Information über Zirkulation und Zirkulationsunterbrechung der Trinkwarmwasserverteilung,
- Vor- und Nachteile der flächen- und der verbrauchsbezogenen Heizkostenabrechnung.

Eine mögliche Handlungsanweisung für Nutzer von Gebäuden vor und nach einer Qualitätssicherung ist in Tabelle 9-2 wiedergegeben. In jedem Fall ist durch ausreichende Kommunikation Beschwerden vorzubeugen. Ein akzeptierter, objektiver Ansprechpartner sollte benannt werden.

Gebäude ohne Qualitätssicherung	Gebäude mit teilweiser oder vollständiger Qualitätssicherung
<p>Wenn eine Qualitätssicherung der Anlage nicht möglich ist, weil finanzielle Mittel zur Nachrüstung von einstellbaren Thermostatventile fehlen, eine Temperaturanpassung im System erst nach Austausch einiger Heizkörper möglich ist, die Heizzeit nicht verkürzt werden kann, solange das System nicht abgeglichen ist, können folgende Nutzerinformationen zu einer Verbrauchsminderung führen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufklärung über richtiges Lüftungsverhalten, um zu vermeiden, dass das angebotene Verschwendungspotential genutzt wird. ▪ Hinweise, die Thermostatventile manuell herunterzuregeln, weil die zentrale Temperaturabsenkung ohne den hydraulischen Abgleich und die korrekte Heizkurveneinstellung energetisch unwirksam ist. ▪ Manuelles Abstellen aller Heizkörper auf Frostschutzbetrieb oberhalb 15 °C Außentemperatur, um ein ungewolltes Durchströmen des Netzes sowie Ablüften zu vermeiden. 	<p>Wenn die Qualitätssicherung der Anlagentechnik gewährleistet ist, bedeutet dies eine Begrenzung des Verschwendungspotentials der Anlage. Ein Mehrverbrauch ist trotzdem wegen der vorhandenen Fremdwärme denkbar. Die Nutzerinformation sieht in diesem Fall wie folgt aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufklärung über richtiges Lüftungsverhalten. Gleichzeitige Information, dass bei Dauerlüftung die Raumtemperatur absinkt und dies kein Fehlverhalten der Anlage ist. ▪ Hinweis, dass überhöhte Raumtemperaturen ggf. nicht mehr erreicht werden können. ▪ Hinweis, dass die THKV nachts nicht per Hand heruntergestellt werden müssen, weil es eine zentrale Temperaturabsenkung gibt, die auch dafür sorgt, dass das Gebäude morgens auch ohne Nutzereingriff wieder warm wird. ▪ Erläuterung der Tatsache, dass die Heizung ab einer Außentemperatur von ca. 15 °C die Anlage selbsttätig abgestellt wird.

Tabelle 9-2 Regeln für die QS der Nutzung

Komponente	Qualität	Neubau	Bestand
Erzeuger	materiell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einbindung regenerativer Energien prüfen ▪ Einbindung der zentralen Trinkwarmwasserbereitung vorsehen ▪ Erzeuger mit geringen Bereitschaftsverlusten und hoher Effizienz der Umwandlung wählen ▪ Kessel ohne Mindestumlauf mit großem Wassergehalt und mit geringem hydraulischen Widerstand bevorzugen ▪ Wärmeerzeuger mit integrierten (nicht einstellbaren) Pumpen vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. Nachrüstung einer zentralen Trinkwarmwasserbereitung ▪ ggf. nachträgliche Dämmung von Kesseln zur Verminderung der Bereitschaftsverluste
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionierung nach Gebäude- und Nutzungsanforderungen ▪ Überdimensionierung vermeiden ▪ Begrenzung der berechneten Leistung ▪ Aufstellort innerhalb des beheizten Bereiches bevorzugen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ überschlägige Dimensionierung nach Gebäude- und Nutzungsanforderungen ▪ Begrenzung der berechneten Leistung

Tabelle 9-3 Regeln für die QS der Anlagentechnik

Komponente	Qualität	Neubau	Bestand
Verteilnetz und Speicher	materiell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zugängliche zentrale (und dezentrale) Armaturen sind zu dämmen ▪ auf den Einbau von Einrohrheizungen ist zu verzichten ▪ Leitungen sind zu dämmen, auch innerhalb des beheizten Bereiches mit möglichst voller Dämmstärke 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. nachträgliche Dämmung des Speichers bzw. der Anschlüsse und Durchdringungen sowie vorhandener, zugänglicher Leitungen ▪ bei großen Durchmessern doppelte Dämmung vorsehen ▪ nachträgliche Dämmung der Verteilungen in Einrohrheizsystemen ▪ ist dies unmöglich, sollte über eine Umstellung auf Zweirohrheizung nachgedacht werden
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dokumentierte Berechnung und Umsetzung des hydraulischen Abgleichs ▪ zentrale Einrichtungen zur Differenzdruckregelung sollen die zentralen Festwiderstände (Erzeuger, Filter, etc.) nicht mit regeln ▪ Speicher so klein wie möglich und gut gedämmt wählen ▪ Aufstellort des Speichers möglichst im beheizten Bereich ▪ im Fußbodenaufbau verlegte Rohrleitungen sollten oberhalb der Dämmebene angeordnet werden ▪ Wärmeverluste von Anbindeleitungen sollten möglichst vollständig in dem Raum anfallen, in dem der betreffende Heizkörper angeordnet ist ▪ Verlegung im beheizten Bereich und mit kurzen Verlegewegen ist anzustreben 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ vorhandene Netze sollten (zumindest überschlägig) berechnet und hydraulisch abgeglichen werden [88]
Pumpe	materiell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine geregelten Pumpen in Anlagen mit Überströmeinrichtungen vorsehen ▪ Netze mit konstanten Volumenströmen erfordern keine geregelten Pumpen ▪ ggf. Pumpen mit externen Messaufnehmern zur Differenzdruckregelung vorsehen ▪ die Pumpenwahl erfordert eine Rohrnetzberechnung ▪ Verzicht auf den Einsatz geregelter Pumpen, wenn deren Leistungsaufnahme im Jahresmittel höher ist als die einer ungeregelten Pumpe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pumpenwahl nach (überschlägiger) Rohrnetzberechnung ▪ Ersetzen vorhandener (ungeregelter) Pumpen durch neue (geregelter), wenn deren Leistungsaufnahme im Jahresmittel geringer ist
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ die benötigte Druckförderhöhe der Pumpe sowie die vorgesehene Regelungsart muss eingestellt werden 	

Tabella 9-3 Regeln für die QS der Anlagentechnik (Fortsetzung)

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

Komponente	Qualität	Neubau	Bestand
zentrale Regelung	materiell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ in Mehrfamilienwohngebäuden sollten Auslegungsvorlauftemperaturen von etwa 65 ... 75 °C angestrebt werden, um Nutzerbeschwerden entgegenzuwirken. Damit werden auch nahe der Heizgrenze (10 ... 15 °C) noch Vorlauftemperaturen am Heizkörper nahe der Körperoberflächentemperatur (33 ... 35 °C) erreicht. ▪ Brennwertkessel in Anlagen mit Anforderungen an einen Mindestvolumenstrom (Überströmeinrichtungen vorhanden) sollten Auslegungsvorlauftemperaturen ≤ 70 °C eingestellt werden, damit an etwa 95 % aller Heiztage eine Vorlauf-temperatur ≤ 55 °C erreicht wird (Brennwertnutzung). ▪ die zentrale Vorregelung erfolgt witterungsgeführt anhand der Außentemperatur, eine lastabhängig geregelte Vorlauf-temperatur sollte wegen des möglichen Verschwendungspotentials nicht (oder nur kurzzeitig) höher als der nach Außen-temperatur erforderlich sein 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nach einer baulichen Modernisierung muss die Vorlauf-temperatur (und/oder die Netz- volumen- ströme) angepasst werden [88]
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ am Regler sollte eine Heizgrenze von beispielsweise 15 °C (ggf. unter Berücksichtigung einer Dämpfung) einstellbar sein und eingestellt werden. ▪ eine Nachtabschaltung, oder -senkung sollte wegen der damit verbundenen Wiederaufheizung nicht bei extrem niedrigen Außentemperaturen erfolgen ▪ die geplante Vorlauf-temperatur muss am Regler eingestellt und dokumentiert werden ▪ Wiederaufheizung mit kurzzeitig erhöhten Vorlauf-temperaturen oder in größeren, gemischt genutzten Räumen (Wohn- und Schlafräumen) durch zeitgesteuerte Zusatzheizkörper vorsehen 	
Heizflächen	materiell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufheizzuschläge bei der Dimensionierung vermeiden (ggf. Zusatzheizkörper oder eine temporäre Vorlauf-temperaturerhöhung vorsehen) ▪ in Anlagen mit Mindestvolumenstrom sollten Heizkörper auf einen hohen Volumenstrom (geringere Spreizung) ausgelegt werden, um das Überströmen zu mindern ▪ der Einsatz von Ventilheizkörpern mit stark überdimensionierten THKV sollte vermieden werden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ stark von der mittleren Dimensionierung abweichende vorhandene Heizkörper sind ggf. auszutauschen, damit das Temperaturniveau insgesamt angepasst werden kann ▪ sehr große Heizkörper von auf Zweirohrbeheizung umgestellten Einrohrsystemen sind i.d.R. auszutauschen
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ die Heizflächenbemessung erfordert eine Heizlastberechnung ▪ bei Einsatz von Lüftungsanlagen sind in Zu- und Ablufträumen veränderte Luftwechsel bei der Dimensionierung zu beachten ▪ die Wahl des optimalen Temperaturniveaus erfordert einen Kompromiss, damit Regelbarkeit, Behaglichkeit und Wärmeverluste der Verteilung sowie Anforderungen des Erzeugers und der Heizkostenerfassung erfüllt werden, siehe auch [88] und Tabelle 5-3 auf Seite 77 	

Tabelle 9-3 Regeln für die QS der Anlagentechnik (Fortsetzung)

Komponente	Qualität	Neubau	Bestand
dezentrale Regelung	materiell	<ul style="list-style-type: none"> Wahl der dezentralen Regler (i.d.R. THKV) anhand der Rohrnetzberechnung 	<ul style="list-style-type: none"> vorhandene, nicht einstellbare THKV sind durch einstellbare (bzw. elektronische oder selbsttätig abgleichende mit integrierter Differenzdruckregelung) zu ersetzen
		<ul style="list-style-type: none"> THKV sollen einstellbar sein, Voreinstellungen sind Rücklaufverschraubungen vorzuziehen (Nachvollziehbarkeit der Einstellung) alternativ Einsatz elektronischer Regler oder selbsttätig abgleichender Ventile mit integrierter Differenzdruckregelung 	
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> eine Durchflussbegrenzung durch angepasste Dimensionierung (begrenzt durch das Angebot am Markt), Hubbegrenzung (begrenzt durch das Angebot am Markt) oder Voreinstellung ist vorzusehen die Einstellung der THKV (bzw. des gesamten hydraulischen Abgleichs) erfordert eine Dokumentation 	
Trinkwarmwasserbereitung	materiell	<ul style="list-style-type: none"> es gelten die Aussagen zur Dämmung und Verlegung sowie zu installierten Leitungslängen und Speichern analog den Empfehlungen für Heizungsverteilnetze Solaranlagen zur Trinkwarmwasserbereitung sind primärenergetisch anhand des Nutzungsprofils zu prüfen 	
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> in Netzen mit Zirkulation ist die tägliche Zirkulationsdauer unter Beachtung der hygienischen Belange durch eine entsprechende Regelung zu begrenzen der hydraulische Abgleich der Zirkulation ist durchzuführen 	
Lüftungsanlage	materiell	<ul style="list-style-type: none"> hydraulischer Abgleich der Lüftungsanlage 	<ul style="list-style-type: none"> nachträglicher hydraulischer Abgleich der Lüftungsanlage
		<ul style="list-style-type: none"> Abstimmung der Regelung von Heizungs- und Lüftungsanlage aufeinander verringerte Lüftungsstufe (Schwachlüftung) mit automatischer Rückstellung in den Nennbetrieb in der Aufheizzeit nach einer Heizungsabsenkung 	
	immateriell	<ul style="list-style-type: none"> dokumentierte Dimensionierung aller Komponenten, v.a. der Ventilatoren 	<ul style="list-style-type: none"> nachträgliche Anpassung der Ventilatorleistung
weitere Merkmale		<ul style="list-style-type: none"> Verminderung des nicht regenerativen Fremdwärmeeintrags in den beheizten Bereich durch Wahl hochwertiger elektrischer Antriebe 	

Tabelle 9-3 Regeln für die QS der Anlagentechnik (Fortsetzung und Schluss)

Für die QS in Gebäuden mit extrem hohem Verbrauch (Typ 1, vgl. Kapitel 6.5) ist an mindestens einer Stelle von der Erzeugung bis zur Übergabe eine Begrenzung der Leistung notwendig. Sinnvoll ist die Begrenzung der Wärmeabgabe im Raum durch korrekte Einstellung der Massenströme und Vorlauftemperaturen entsprechend den Heizflächen. Eine Leistungsbegrenzung des Erzeugers wirkt sich dagegen nur dann einschränkend aus, wenn alle Nutzer gleichmäßig viel Energie abfordern. Sie sollte dennoch vorgenommen werden.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung von Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen der Heizungsanlagentechnik und von Vorschlägen zu deren Realisierung.

Die Bearbeitung des Themenschwerpunktes wurde durch die Untersuchung von Energieverbrauchsdaten baulich optimierter Gebäude motiviert. Die festzustellende Diskrepanz zwischen tatsächlichen Energieverbrauchswerten und theoretischen Bedarfswerten dieser Gebäude ließ den Rückschluss zu, dass in der Praxis ein Energiemehrverbrauch aus der vorhandenen suboptimal geplanten und ausgeführten Anlagentechnik resultiert. Die installierte Technik erlaubt bzw. provoziert eine Energieverschwendung durch den Nutzer; sie bietet ein Verschwendungspotential, in Einzelfällen einen Zwangswärmeconsum.

Die Vermeidung oder Minimierung des Verschwendungspotentials durch Wahl und Betrieb einer optimalen Anlagentechnik und die dadurch erreichbaren Energieeinsparungen im Neubau und Bestand sind Gegenstand der Untersuchungen. Die Arbeit behandelt dabei schwerpunktmäßig Wohngebäude mit Pumpenwarmwasserheizungen und konventioneller Energieversorgung, weil der überwiegende Anteil der Wohngebäude in Deutschland mit dieser Technik ausgestattet ist.

Definition von Qualität und Qualitätssicherung

Die Qualität einer Anlage drückt sich durch einen energiesparenden, wirtschaftlichen und gleichzeitig für den Nutzer komfortablen Betrieb aus. Diese Qualität kann sowohl im Neubau als auch nachträglich im Bestand u.a. durch eine korrekte Dimensionierung und Einstellung der Anlagentechnikkomponenten, eine optimale Einstellung zentraler und dezentraler Regelfunktionen, die Optimierung der Hydraulik (incl. hydraulischer Abgleich) und eine Wärmedämmung der Komponenten erreicht werden. Die erforderliche Sicherstellung der Qualität (Qualitätssicherung) erfolgt in der Planung, Ausführung, Nutzung und Instandhaltung gleichermaßen.

Zustand der Qualität von Anlagen in der Praxis, Regeln der Technik und Hemmnisse bei der Umsetzung von Qualitätssicherung

Kernprobleme, die ein rasches Durchsetzen einer Qualitätssicherung für die Anlagentechnik in der Praxis behindern, sind die Unklarheit über mögliche Energieeinsparungen, Kosten und die Wirtschaftlichkeit bei allen Beteiligten. Darüber hinaus sind in der Praxis große Hemmnisse durch die ungeklärten Modalitäten der Honorierung, den fehlenden Rechtszwang einer optimierten Planung und Ausführung bzw. überhaupt durch die Mängel in technischen Regeln begründet.

Die vorhandenen Regeln der Technik, die für eine QS der Heizungsanlagentechnik herangezogen werden können, befassen sich vorwiegend mit Anlagen im Neubau. Die Untersuchung heutiger und künftig relevanter Normen zur Leistungsbemessung (DIN 4701, EN 12831) lässt eine zunehmende Leistungsüberdimensionierung erkennen. Für die hydraulische Berechnung von Netzen fehlen verbindliche Vorschriften, obwohl die VOB/C detaillierte Vorgaben zur Be-

rechnung und Umsetzung eines hydraulischen Abgleichs macht. Für bestehende Anlagen sind praktisch keine Planungs- und Ausführungsregeln vorhanden, so dass der heutige Zustand von Anlagen in der Praxis erklärbar wird.

Verknüpfung der Energiekennwerte der Anlagentechnik mit Eigenschaften des Baukörpers und der Nutzung

Die Untersuchung anlagentechnischer Merkmale und deren Einfluss auf die Energiebilanz zeigt eine starke Verkettung der Einzelgrößen. Die Wärmeerzeugerleistung, Pumpen- und Heizflächenbemessung, Einstellung zentraler Regelfunktionen, der hydraulische Abgleich, die Art und Ausführung (incl. Dämmung) von Verteilnetzen bestimmen den maximal möglichen Energieverbrauch sowie die Funktion und Güte der Regelkreise im Gebäude. Sie lassen sich nicht von den Merkmalen des Baukörpers und der Nutzung trennen. Die Bilanzierung aller Energiekennwerte erfordert einen integralen Bilanzansatz.

Anwendbarkeit vorhandener Energiebilanzverfahren zur Bewertung der Qualität von Anlagentechnik und Entwicklung erweiterter Bilanzverfahren

Die Untersuchung von vorhandenen, etablierten Bilanzansätzen (DIN 4108-6 und DIN 4701-10, SIA 380-1 und LEG, Hessischer Energiepass, VDI 2067, VDI 3807 und VDI 3808) in Hinblick auf die durchgehende Bewertungsmöglichkeit von Baukörper und Nutzung, der Anlagentechnik und ihrer Qualität führt zu einer notwendigen Weiterentwicklung der Bilanzansätze. Die vorhandenen Ansätze erweisen sich vor allem für die Bewertung von Einflüssen der Regelung und Hydraulik sowie des Fremdwärmeanfalls als unzulänglich. Ein nicht näher definierter Teil dieser Verluste wird heute nach EN 832 und DIN V 4108-6 durch den Fremdwärmenutzungsgrad und parallel nach VDI 2067 und DIN V 4701-10 unter dem Aufwand für die Wärmeübergabe bewertet. Diese Trennung führt in heutigen Heizenergiebilanzen, z. B. für den Nachweis nach der Energieeinsparverordnung zu Interpretationsschwierigkeiten.

Ein erweitertes Verfahren, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus bekannten Ansätzen abgeleitet wird, ist das ΔQ -Verfahren. Die Grundidee des Verfahrens ist, die Einflüsse der Regelung, der ggf. fehlenden Qualitätssicherung und anderer instationärer Vorgänge auf den Energieverbrauch als eine Differenzenergiemenge ΔQ (bezogen auf einen definierten Referenzzustand) sichtbar zu machen. Die Auswirkungen der QS zeigen sich als veränderte Werte der mittleren Innentemperatur, des mittleren Luftwechsels, der Länge der Heizzeit, der mittleren Systemtemperatur der anlagentechnischen Komponenten sowie als veränderter Hilfsenergieverbrauch. Auf die Verwendung eines Fremdwärmenutzungsgrades wird in diesem Ansatz verzichtet.

Die heute übliche Bereinigung von Verbrauchswerten anhand der Heizgradtage wird für die Auswertung von Praxiswerten ebenfalls überarbeitet. Die Notwendigkeit leitet sich aus der Tatsache ab, dass der Verbrauch wegen des witterungsabhängigen Lüftungsverhaltens der Nutzer oder besser Lüftungsverlustes (erhöhte Luftwechsel bei warmer Witterung) nicht allein anhand der Außentemperatur bereinigt werden kann. Alternative Bereinigungsverfahren, z.B. die Bereinigung eines Grundlüftungswärmebedarfs werden vorgestellt.

Untersuchung von Anlagen in der Praxis und Abschätzung der möglichen Bandbreite des Energieverbrauchs

Die Untersuchung der Eigenschaften realer Anlagen gibt folgendes Bild der QS in der Praxis wieder: Insgesamt ermöglichen die großzügige Wärmezeuger- und Pumpenauslegung, die Heizkurveneinstellung nahe oder gleich dem Auslieferungszustand ab Werk sowie die typisch eingesetzten Ventile und Heizkörper ein enormes Verschwendungspotential heute vorhandener Anlagen und Gebäude.

Der hydraulische Abgleich ist in weniger als 10 % der Anlagen vorhanden. Der Einzelraumregelkreis arbeitet praktisch nur im Zweipunktverhalten, eine stetige Regelung kann aufgrund der Überdimensionierung der Komponenten nicht erwartet werden. Für zwei Typgebäude ergibt sich mit heute üblicher installierter Anlagentechnik ein maximal möglicher Energieverbrauch, der zwei (EFH mit Baujahr vor 1977) bzw. drei (MFH mit Baujahr nach 1978) mal höher ist, als der minimale Jahresenergiebedarf der Gebäude mit angepasstem Nutzerverhalten und optimierten Anlagentechnik. Ein erhöhter Energieverbrauch stellt sich in der Praxis ein, wenn ein entsprechend verschwenderisches Nutzerverhalten vorliegt.

Energieverbrauchstypen und Handlungsanweisungen

Eines der Ziele einer anlagentechnischen Optimierung ist die Begrenzung des Wärmeabgabepotentials der Heizungsanlage, jedoch nur soweit, dass eine Beheizung des Gebäudes auch ohne Fremdwärmeeintrag erfolgen kann. Das minimale Verschwendungspotential – auch mit optimierter Anlagentechnik – liegt daher im realen Fall etwa in der Höhe des Fremdwärmeeintrags. Dies bedeutet die zwingende Notwendigkeit, im Rahmen der Optimierung auch den Fremdwärmeeintrag in den beheizten Bereich zu begrenzen.

Aus dieser Überlegung lassen sich die Gebäude in Energieverbrauchstypen einteilen, für die unterschiedliche Handlungsanweisungen zur Energieeinsparung abgeleitet werden können. Gebäude mit extrem hohem Verbrauch benötigen zunächst eine anlagentechnische Begrenzung des Verschwendungspotentials.

Bei nur leicht erhöhtem Energieverbrauch eines Gebäudes sind vor allem Nutzerschulungen zum Erreichen einer Energieeinsparung nötig. Wegen der vorhandenen Fremdwärme kann ein erhöhter Verbrauch auch mit optimierter Anlagentechnik erreicht werden. Eine Leistungsbegrenzung ist daher nur begrenzt wirksam. Die Optimierung bewirkt in Gebäuden dieses Energieverbrauchstyps vor allem verminderte technische Verluste durch optimierte Anlagenparameter.

Erkenntnisse bei der Auswertung von monatlichen Messdaten

Zur Abschätzung von Einsparpotentialen aus Verbrauchsdaten sollten vorwiegend Monatsmessungen herangezogen werden. Werden die Messwerte in ein Leistungs-Außentemperatur-Diagramm (vgl. Bild 10-1) eingetragen, können verschiedene Rückschlüsse gezogen werden. Aus der Extrapolation der Verbrauchswerte in der Kernheizzeit können eine theoretisch erreichbare Heizgrenze und eine maximal notwendige Leistung abgeschätzt werden. Weiterhin liefert die Auftragung Aussagen über die bezogene Gesamtheizlast H_{T+V} (Steigung der Ausgleichsgeraden).

Aus den Messwerten bzw. der linearen Regression lassen sich real vorhandene Luftwechsel bei Kenntnis der U-Werte (Beeinflussung der Steigung) sowie Fremdwärmeleistungen und Innentemperaturen (Parallelverschiebung der Ausgleichsgeraden) in der Kernheizzeit ermitteln. Ein Vergleich mit Standardwerten für Luftwechsel und Innentemperaturen liefert ein mögliches Einsparpotential. Das Verfahren zeichnet sich durch hohe Praktikabilität aus, weil eine große Anzahl von Kennwerten aus den Messwerten reproduziert werden kann und nicht anhand von Standardwerten abgeschätzt werden muss.

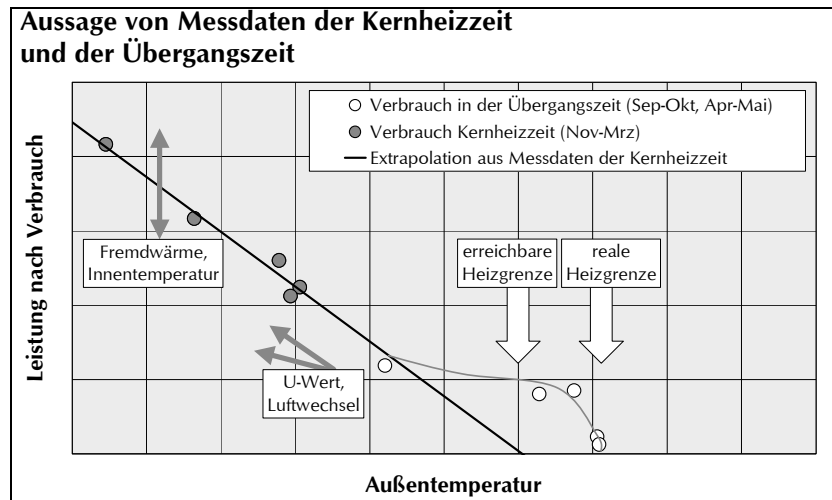


Bild 10-1 Aussage monatlicher Messdaten

Auswertung und Archivierung von Messdaten zur Typologisierung der anlagentechnischen Qualität

Zur einfachen Abschätzung von Einsparpotentialen durch QS eignen sich Typologieeinordnungen. Diese Typologien müssen zunächst aus Messdaten für Gebäude, die einer Optimierung unterzogen werden oder durch Vergleich der Energieverbrauchsdaten von Gebäuden mit und ohne Optimierung aufgebaut werden. Die bereinigten Messwerte werden graphisch archiviert, z.B. nach dem in Bild 10-2 gezeigten Schema. Die Graphiken ermöglichen die Abschätzung von Einsparpotentialen während der Planungsphase.

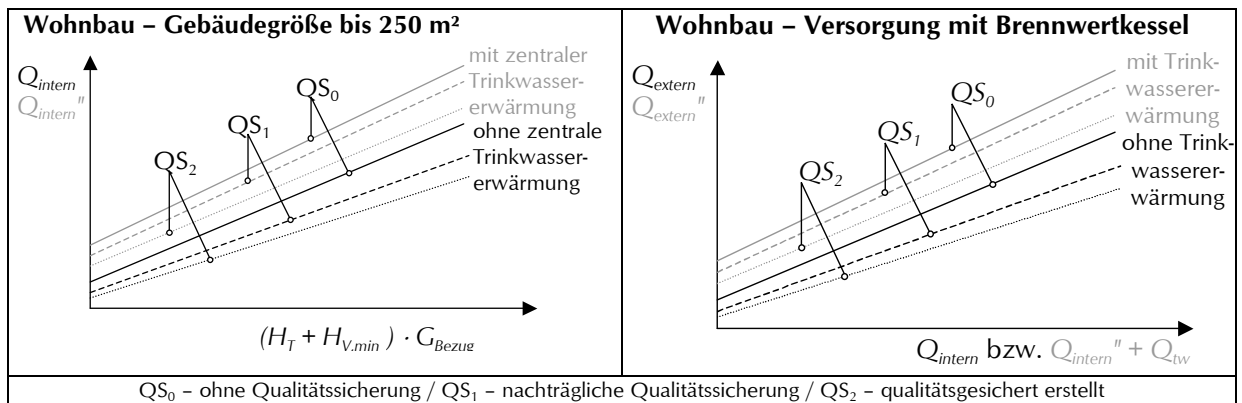


Bild 10-2 Typologisierung von Energieverbrauchswerten

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren unterscheidet dabei in den innerhalb (v.a. nutzerbedingt) und den außerhalb (v.a. technisch bedingt) des beheizten Bereiches von der Anlage abgeben Energieanteil.

Wirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung im Neubau und Bestand

Die Investitionen für die anlagentechnische Optimierung können in einer Gesamtkostenrechnung bilanziert werden und liefern so indirekt die minimal einzusparende Energiemenge zum Erreichen der Wirtschaftlichkeitsgrenze.

Die Untersuchung typischer Bestandsanlagen zeigt, dass bei gering investiven Optimierungen (ohne Austausch von Komponenten) Energieeinsparungen von etwa 4 kWh/(m²·a) thermischer Energie zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit notwendig sind. Die notwendige Mindesteinsparung steigt auf etwa 10 kWh/(m²·a) bei hoch investiven Optimierungen mit Austausch von THKV und Pumpen sowie dem Einbau von Differenzdruckreglern oder von Thermostatventilen mit integrierter Differenzdruckregelung. Alternativ kann etwa jeweils etwa ein Drittel der Energiemengen als elektrische Energie eingespart werden. In der Kalkulation sind neben den Komponentenkosten auch die Kosten für die Gebäudeaufnahme sowie eine nachträgliche vereinfachte Heizlast- und Rohrnetzberechnung enthalten.

Im Neubau erfordert die Planung und Ausführung einer qualitativ hochwertigen Anlagentechnik, incl. Qualifizierung des Personals maximal etwa 0,5 % der Investitionssumme bei heutigen Baupreisen. Nutzerschulungen, die im zweijährigen Abstand durchgeführt werden, erfordern mittlere Einsparungen von 2 kWh/(m²·a) für thermische Energie bzw. unter 1 kWh/(m²·a) an elektrischen Energien zum Erreichen der Wirtschaftlichkeitsgrenze.

Die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer QS im Neubau und im Bestand ergeben bei heutigen Energieverbrauchswerten realistisch erreichbare Wirtschaftlichkeitsgrenzen. Eine Bestätigung durch Praxismesswerte steht jedoch noch aus.

Ausblick auf die Weiterbearbeitung

Mit den erarbeiteten Vorschläge zur Auswertung von Verbrauchsdaten anhand von Monatsmesswerten und der Typologisierung in Form von Diagrammen ist eine energetische und wirtschaftliche Bewertung von Qualitätssicherung möglich.

Die Erkenntnisse der Arbeit werden bei der Datenauswertung für etwa 80 Gebäude eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU geförderten Projektes angewendet. Die Gebäude, von denen etwa 30 konkret anlagentechnisch optimiert wurden und die restlichen Objekte als Referenzmenge dienen, durchlaufen zur Zeit die zweite Hälfte einer zweijährigen Messzeit. Anschließend erfolgt die Datenauswertung.

Wichtige Ergebnisse der Arbeit fließen zudem in die Richtlinienarbeit zur Verbrauchsdatenauswertung und die Normungsarbeit zur Energiebilanzierung von Bestandsgebäuden und -anlagen im Rahmen der Diskussion zur Europäischen Gebäuderichtlinie ein.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Kurzbeleg	Vollbeleg
[1]	AGFW bei der VDEW (Hrsg.); Anforderungen an thermostatische Heizkörperventile ohne Fremdenergie für Heizwasser ; Frankfurt; 1988.
[2]	Albers, Joachim et. al; Der Zentralheizungs- und Lüftungsbauer ; Handwerk und Technik; Hamburg; 2000.
[3]	Andreas, Udo / Winter, Albrecht und Wolff, Dieter; Regelung heiztechnischer Anlagen – Verfahren und Wirtschaftlichkeit ; VDI Verlag; Düsseldorf; 1985.
[4]	anonym; Nordrhein-Westfalen – Landesfachgruppe tagte in Gelsenkirchen ; IKZ; Nr. 15/2003; Strobel; Arnsberg; 2003.
[5]	anonym; Optimistisch in die Zukunft – Wie sieht die HLK- und MSR-Branche den Bestandsmarkt? ; cci.print; Nr. 6/2003; promotor; Karlsruhe; 2003.
[6]	anonym; Service – Solarstrahlung 2001 ; sonnenenergie; März/2002; Solarpraxis; Berlin; 2002.
[7]	anonym; Service – Solarstrahlung 2002 ; sonnenenergie; Mai/2003; Solarpraxis; Berlin; 2003.
[8]	Arbeitskreis der Prof. für Regelungstechnik in der Versorgungstechnik (Hrsg.); Regelung- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik ; Müller; Heidelberg; 2002.
[9]	ASUE (Hrsg.); Haustechnik 2000 ; Int. ASUE Fachtagung 1998 ; Tagungsband; Vulkan; Essen; 1998.
[10]	ASUE Arbeitskreis; Ratgeber: Wärmeversorgung im Neubau ; ASUE; Kaiserslautern; 2003.
[11]	Bach, Heinz / Eisenmann, G. und Neuscheler, K.; CO₂-Reduzierung durch Pumpensanierung ; Stuttgart; 1992.
[12]	Bach, Heinz; Mit der Dämmung der Gebäude steigt die Anforderung an die Nutzenübergabe ; HLH; Nr. 2/97; VDI; Düsseldorf; 1997.
[13]	Bach, Heinz; Nicht nur den Kessel erneuern ; sbz; Nr. 1/1990; Gentner; Stuttgart; 1990.
[14]	Bach, Heinz; Trends in der Gebäudetechnik ; IKZ; Nr. 7/1994; Strobel; Arnsberg; 1994.
[15]	Baumann / Kapmeyer und Muser; Die neuen Anforderungen des Energieeinsparungsgesetzes bei Planung, Bau und Unterhaltung von Gebäuden ; Bd. 4 und 5; Weka; Kissing; 1989 – 1992.
[16]	Baumann / Kapmeyer und Muser; Energiesparende Gebäudeplanung für Ingenieure ; Weka; Kissing; 2003.
[17]	Benecke, Jochen; Feldversuche mit elektronischer Einzelraum-Temperaturregelung ; Teile 1 bis 3; HLH; Nr. 5, 6 und 7/2002; VDI; Düsseldorf; 2002.
[18]	Binz, A. et al; Minergie und Passivhaus: zwei Gebäudestandards im Vergleich ; Schlussbericht; Bundesamt für Energie; Bern; 2002.
[19]	Böhm, Gerd; Mit Vorsicht zu genießen ; HLH; Nr. 9/2002; VDI; Düsseldorf; 2002.
[20]	Böhm, Gerd; Wie effektiv sind Brennwertkessel? ; sbz; Nr. 6/1997; Gentner; Stuttgart; 1997.
[21]	Brenner, Lothar; Optimierung von Heizungsanlagen ; AT Verlag; Aarau; 1981.
[22]	Buderus Heiztechnik GmbH (Hrsg.); Handbuch für Heizungstechnik ; Beuth; Berlin; 2002.
[23]	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.); Leitfaden nachhaltiges Bauen ; Bonn; 2001.
[24]	Bundesamt für Energie (Hrsg.); Betriebsoptimierung von einfachen Heizungsanlagen ; Bern; 1998.
[25]	Bundesamt für Energie (Hrsg.); Umwälzpumpenleitfaden ; Bern; 2001.
[26]	Bundesanstalt für Energiewirtschaft (Hrsg.); Elektrizitätsverbrauch drehzahl geregelter Umwälzpumpen ; ARENA; Zürich; 1996.

- [27] Bundesminister der Finanzen (Hrsg.); **Anweisung für den Bau von Zentralheizungs-, Lüftungs- und zentralen Warmwasserbereitungsanlagen (HLW Anlagen) in öffentlichen Gebäuden**; Ernst & Sohn; Berlin; 1955.
- [28] Burkhardt, W. und Kraus, R.; **Projektierung von Warmwasserheizungen**; Oldenbourg; München; 2001.
- [29] Buscher, E. et al; **Qualitätsoffensive für Heizungsanlagen**; Teile 1 bis 4; Sanitär- und Heizungstechnik; 9, 10, 11 und 12/2000; Krammer; Düsseldorf; 2000.
- [30] Buscher, E. und Walter, K.; **Pumpenauswahl leicht gemacht**; sbz; Nr. 4/2001; Gentner; Stuttgart; 2001.
- [31] Buscher, E. und Walter, K.; **Rücklauftemperatur als zentrale Größe**; sbz; Nr. 5/2002; Gentner; Stuttgart; 2002.
- [32] CEN TC 228 WG4; **Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies**; 2000.
- [33] Christoph, Thomas; **Analyse des Verbrauchs und Energieeinsparpotentiale von Heizungsanlagen in Wohngebäuden anhand monatlicher Messwerte**; Vorabmanuskript; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2003.
- [34] Deutscher Wetterdienst (Hrsg.); **Tageweise Wetterdaten für verschiedene Standorte**; im Internet unter www.dwd.de; Stand 2003.
- [35] Deutscher, P. und Rouvel, L.; **Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen**; 2 Teile; HLH; Nr. 7 und 8/2003; VDI; Düsseldorf; 2003.
- [36] DIN 18380; **VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Heizanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen**; Beuth; Berlin; 2002.
- [37] DIN 4108; **Beiblatt 2; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele**; Beuth; Berlin; 1998.
- [38] DIN 4701; **Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden**; 2. Ausgabe; 1944.
- [39] DIN 4701; **Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden; Teil 1: Grundlagen der Berechnung; Teil 2: Tabellen, Bilder, Algorithmen; Teil 3: Auslegung der Raumheizrichtungen**; Beuth; Berlin; 1983 und 1989.
- [40] DIN 4708-2; **Zentrale Wassererwärmungsanlagen; Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden**; Beuth; Berlin; 1994.
- [41] DIN 4710; **Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland**; Beuth; Berlin; 2003.
- [42] DIN EN 12828; **Heizungssysteme in Gebäuden – Planung von Warmwasser-Heizungsanlagen**; Beuth; Berlin; 2003.
- [43] DIN EN 832; **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs; Wohngebäude**; Deutsche Fassung EN 832; Beuth; Berlin; 1998.
- [44] DIN V 4108 Teil 6; **Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden; Vornorm – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfes**; Beuth; Berlin; 2000 und 2003.
- [45] DIN V 4701 Teil 10; **Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen; Vornorm – Teil 10: Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung**; Beuth, Berlin, 2001 und 2003.
- [46] Dünninger, Werner; **DIN 1988 überholt?**; sbz; Nr. 22/1991; Gentner; Stuttgart; 1991.
- [47] Ebel, Witta et al; **Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten**; C. F. Müller; Heidelberg; 2000.
- [48] Egger, Rolf; **Brennwerttechnik in der Modernisierung**; Wärmetechnik; Nr. 8/1998; Gentner; Stuttgart; 1998.

- [49] Eisenmann, Gisela; **Entwicklung einer allgemeinen Bewertungsmethode für Heiz- und Trinkwassererwärmungssysteme am Beispiel einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus**; Dissertation; IKE an der Universität Stuttgart; Stuttgart; 1997.
- [50] EN 12831; **Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast**; Beuth; Berlin; 2003.
- [51] Endrich, H.; **Erfahrungen und Erkenntnisse aus Energieberatung für Alt- und Neubauten**; IBEU; Zellingen; ohne Jahr.
- [52] EnEG; **Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden**; vom 22. Juli 1976 (BGBl. I S. 1873); Zuletzt geändert am 20. Juni 1980 (BGBl. I S. 701).
- [53] Energie und Umweltzentrum (Hrsg.); **10. euz Baufachtagung – Energetische Gebäude-modernisierung**; Eigendruck euz.; ohne Ort; 2001.
- [54] Energieagentur NRW; **Energetische Sanierung von Gebäuden**; Frischluftzufuhr für den Menschen; Auszug aus Foliensatz zur Weiterbildung; Energieagentur NRW; Wuppertal; 2003.
- [55] EnEV; **Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)**; 2001.
- [56] Esdorn, Horst; **Erfordern hochgedämmte Gebäude neue Auslegungsmethoden für Heizungssysteme?**; HLH; Nr. 6/1997; VDI; Düsseldorf; 1997.
- [57] Esdorn, Horst; **Grundlagen für die weitere Novellierung der WSchV – Jahresnutzungsgrade für Heizungsanlagen, Teilbeheizungsfaktoren**; Teile 1, 2 und 3; Berlin; 1996.
- [58] Faragó, Zoltán; **Maximaler Wärmebedarf von Gebäuden**; TGA Fachplaner; Nr. 12/2002; Gentner; Stuttgart; 2002.
- [59] Feist, Wolfgang; **Heizung im Niedrigenergiehaus**; Passivhausinstitut; Darmstadt; 1998.
- [60] Fleischmann, Hans Dieter und Schneider, Klaus-Jürgen (Hrsg.); **Wienerberger Baukalender 2003**; Bauwerk; Berlin; 2003.
- [61] Franke, Wolfgang; **Heizkosten- und Brauchwassererfassung im NEH: lohnt sich das?**; IKZ; Nr. 6/2003; Strobel; Arnsberg; 2003.
- [62] Gailfuß, Markus; **Die neue VDI-Richtlinie 2067**; Wärmetechnik – Versorgungstechnik Nr. 3/1999; Gentner; Stuttgart; 1999.
- [63] Geiger, B. und Rouvel, L.; **Lüftung im Wohnungsbau – Fensterlüftung**; HLH; Nr. 4/1987; VDI Verlag; Düsseldorf; 1987.
- [64] Geiger, B.; **Brennstoffverbrauch in Wohngebäuden: Gebäude- und Anlagenalter**; Der Energieberater; 49. Erg.-Lfg; S. 1 – 20; DWD Verlag; Köln; 2001.
- [65] GRE (Hrsg.); **Energieeinsparung im Gebäudebestand**; Ausgabe I/2002; Baucom; Böhl-Iggelheim; 2002.
- [66] Halper, C. et al; **2. Zwischenbericht für das von der DBU geförderte Projekt Optimus**; unveröffentlicht; Innung SHK Wilhelmshaven, FPB an der Uni Bremen, TWW e.V.; Wilhelmshaven, Bremen, Wolfenbüttel; 2002.
- [67] Halper, Christian und Sobirey, Marco; **Überprüfung der Genauigkeit der vereinfachten Rohrnetzrechnung des Programms zur Optimierung von Heizungsanlagen**; interner Bericht; Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2003.
- [68] Halper, Christian; **Untersuchung von Einflüssen der Anlagentechnik und der Nutzung auf den Lüftungswärmeverbrauch von Gebäuden**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2002.
- [69] Hassler, Uta (Hrsg.); **Umbau: über die Zukunft des Baubestandes**; Wasmuth; Tübingen; 1999.
- [70] Hauser, G. und Hausladen, G.; **Energiebilanzierung von Gebäuden**; Krämer; Stuttgart; 1998.
- [71] Hauser, Gerd; **Energieeinsparpotential im Bestand des Wohnungsbaus**; GRE inform; Nr. 14/97; Kassel; 1997.

- [72] Hausladen, Gerhard / Springl, Peter und Hellwig, Runa; **VdZ-Energiepaß – Weiterentwicklung des Energiepasses**; Abschlussbericht für Forschungsprojekt der Vereinigung der deutschen Zentralheizungswirtschaft e.V.; Kassel; 2000.
- [73] Hausladen, Gerd / Wimmer, Andreas und Kaiser, Jan; **Technikakzeptanz im Niedrigenergiehaus – Teil 1**; HLH; Nr. 7/2003; VDI; Düsseldorf; 2003.
- [74] Heimeier GmbH (ohne Autor); **Regeldifferenz 1 K oder 2 K?**; IKZ; Nr. 13/2003; Strobel; Arnsberg; 2003.
- [75] HeizAnIV; **Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Warmwasseranlagen**; Ausgaben von 1978, 1982, 1989 und 1994.
- [76] HeizBetrV; **Verordnung über energiesparende Anforderungen an den Betrieb von heizungstechnischen und Brauchwasseranlagen (Heizungsbetriebsverordnung)**; vom 22.9.1978 (BGBl I S. 1584).
- [77] HeizKoV; **Heizkostenverordnung**; vom 23.02.1981 (BGBl. I S. 261; BGBl. III 754-4-4); Neufassung vom 20.01.1989 (BGBl. I S. 115).
- [78] Hell, F.; **Wirtschaftlichkeit von Energieeinsparmaßnahmen im Bereich Heiztechnik**; HLH; Nr. 5/1994; VDI; Düsseldorf; 1994.
- [79] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (Hrsg.); **Heizenergie im Hochbau – Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung**; Elektra; Niedernhausen; 1996.
- [80] Hirschberg, Rainer; **Vereinfachte Berechnung von Wärmeabgabe und Stromaufwand**; HLH; Nr. 2/2002; VDI; Düsseldorf; 2002.
- [81] **Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)**; Nachdruck des BHKS mit freundlicher Genehmigung des Werner-Verlages; Bonn; 1995.
- [82] Horschler, S. / Wolff, D. / Unverricht, M. und Jagnow, K.; **Festlegung eines neuen, wirtschaftlich vertretbaren Primärenergieniveaus für die Hansestadt Hamburg**; Abschlussbericht; unveröffentlicht; Hannover und Wolfenbüttel; 2002.
- [83] Ihle und PrechtI; **Die Pumpenwarmwasserheizung**; Wolters-Kluwer; Neuwied; 2003.
- [84] Ihle, Claus; **Erläuterung zur DIN 4701**; Werner; Düsseldorf; 1997.
- [85] Isensee, Simon; **Untersuchung des monatlichen Energieverbrauchs ausgewählter Mehrfamilienhäuser mit Hilfe eines ausführlichen Energiebilanzverfahrens**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2003.
- [86] ISO/FDIS 13790; **Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating**; Beuth; Berlin; 2003.
- [87] Jablonowski, Heinz; **Thermostatventil-Praxis**; Gentner; Stuttgart; 1994.
- [88] Jagnow, Kati / Halper, Christian / Timm, Tobias und Sobirey, Marco; **Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand**; Teile 1, 2 und 3; TGA Fachplaner; Nr. 5, 8 und 11/2003; Gentner; Stuttgart; 2003.
- [89] Jagnow, Kati / Wolff, Dieter und Horschler, Stefan; **Die neue Energieeinsparverordnung**; Deutscher Wirtschaftsdienst; Köln; 2002.
- [90] Jagnow, Kati; **Den Energieverbrauch vergleichbar machen**; TGA Fachplaner; Nr. 11/2002; Gentner; Stuttgart; 2002.
- [91] Jagnow, Kati; **Private meets public**; TGA Fachplaner; Nr. 1/2004; Gentner; Stuttgart; 2004.
- [92] Kermi (Hrsg.); **Planungsunterlage hydraulischer Abgleich**; Kermi; Plattling; 2002.
- [93] Klosa, Franz; **Kosten der internen Heizungsinstallation**; TAB; Nr. 1/1989; Bertelsmann; Gütersloh; 1989.
- [94] Klutig, H. und Erhorn, H.; **Niedrigenergiehäuser in Ziegelbauweise**; Bericht WB 100/1998; IBP; Stuttgart; 1998.

- [95] Knabe, Gottfried; **Gebäudeautomation**; Verlag für Bauwesen; Berlin; 1992.
- [96] Köhler, Roland (Hrsg.); **Schweizer Energiefachbuch 2000**; Künzler-Bachmann; St. Gallen; 1999.
- [97] Kolmetz, S. / Ostermeier, U. und Rouvel, L.; **Endenergiebedarf der Privaten Haushalte für Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung in der Bundesrepublik Deutschland**; IKARUS 5-25; TU München; KFA; Jülich; 1994.
- [98] Krüger, Rolf und Walch, Albert; **Soll die Auslegung der Heizflächen in Niedrigenergiehäusern Hochheizlasten berücksichtigen?**; Wärmetechnik; Nr. 12/1999; Gentner; Stuttgart; 1999.
- [99] Läge, F.-K.; **Ölpreisschock als Investitionsmotor**; Heizungsjournal; Nr. 3/2001; Heizungs-Journal Verlags GmbH; Winnenden; 2001.
- [100] Loga / Müller und Menje; **Die Niedrigenergiesiedlung Diestelweg**; IWU; Darmstadt; 1997.
- [101] Loga, T. et al; **Energiebilanz-Toolbox, Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser**; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2001.
- [102] Loga, Tobias / Diefenbach, Nikolaus und Born, Ralf; **Guter Ansatz – schwache Standards: die neue Energieeinsparverordnung**; Institut Wohnen und Umwelt IWU; Darmstadt; 2001.
- [103] Loga, Tobias und Imkeller-Benjes, Ulrich; **Energiepass Heizung/Warmwasser**; Institut Wohnen und Umwelt und IMPULS Programm Hessen; Darmstadt; 1997.
- [104] Loga, Tobias; **Heizgrenztemperatur für Gebäude unterschiedlicher energetischer Standards**; IWU; Darmstadt; 2002.
- [105] Loose, Peter und Krainer, Oliver; **Einfluss der Auslegung von Regelventilen aus das hydraulische und thermische Teillastverhalten von Heizsystemen**; HLH; Nr. 3/1993; VDI; Düsseldorf; 1993.
- [106] Lüdemann, B. und Schmitz, G.; **Heizung und Warmwasserbereitung im Niedrigenergiehaus**; 2 Teile; HLH; Nr. 3 und 4/2003; VDI; Düsseldorf; 2003.
- [107] Maas, A. et al; **Jahresenergieverbrauch von Synergiehäusern**; HLH; Nr. 7/1999; VDI; Düsseldorf; 1999.
- [108] Matthies, H. / Starken, H. und Vogler, I.; **Heizen in Berlin**; KEBAB GmbH; Berlin; 1997.
- [109] Mengazzi, Kai ; **Evaluation von Energie-Verbrauchsstudien für das Wohngebiet Berlin Kaulsdorf**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2001.
- [110] Mügge, Günter; **Die Bandbreite des Heizenergieverbrauchs: Analyse theoretischer Einflussgrößen und praktischer Verbrauchsmessungen**; Dissertation; VDI Fortschritts-Berichte Reihe 19 – Nr. 69; VDI Verlag; Düsseldorf; 1993.
- [111] Nowotny, Siegfried und Feustel, Hartmut E.; **Lüftungs- und Klimatechnische Gebäude-ausrüstung**; Bauverlag; Wiesbaden; 1996.
- [112] Olesen, Bjarne W.; **Sind "kalte" Fensterflächen heute noch ein Problem**; Teile 1 und 2; HLH; 1 und 2/2003; VDI; Düsseldorf; 2003.
- [113] Oschatz, Bert; **Zur Heiztechnik in Wohngebäuden mit verschärftem Wärmeschutz unter besonderer Berücksichtigung der Gas-Brennwerttechnik**; Dissertation; Technische Universität Dresden; Dresden; 2001.
- [114] Otto, Jürgen; **Modernisierung von Heizungsanlagen**; Krammer; Düsseldorf; 1985.
- [115] Otto, Jürgen; **Pumpenheizungen richtig geplant**; Krammer; Düsseldorf; 1982.
- [116] Oventrop (Hrsg.); **Fachbuch hydraulischer Abgleich**; Olsberg; 1991.
- [117] Petitjean, Robert; **Einregulierung von Heizkörpersystemen**; Sandberg & Co.; Göteborg; 1992.
- [118] Pickel, P. und Kretschmer, T.; **Untersuchung der Fehlergrenzen bei Energiebedarfs- und Energieverbrauchskennwerten**; Endbericht für das Land NRW; Berlin; 1996.
- [119] Recknagel / Sprenger und Schramek; **Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik**; Oldenbourg; München; 2001.

- [120] Recknagel, Hermann; **Die Berechnung der Warmwasserheizungen**; Oldenbourg; München; 1920.
- [121] Reiß, J. / Erhorn, H. und Reith, A.; **Klassifizierung des Nutzerverhaltens nach Raumlufttemperaturen**; IBP; Stuttgart; 2002.
- [122] Reiß, J. und Erhorn, H.; **Niedrigenergiehäuser Heidenheim**; Abschlussbericht; Fraunhofer Institut für Bauphysik; Stuttgart; 1994.
- [123] Reiß, Johann / Erhorn, Hans und Reiber, Martin; **Energetisch sanierte Wohngebäude**; Fraunhofer IRB; Stuttgart; 2002.
- [124] Reiß, Johann und Erhorn, Hans; **Stand und Tendenzen der Neubautätigkeit in Deutschland – Analyse und Entwicklung relevanter Gebäudekenndaten**; gi; Nr. 5/1994; Oldenbourg; München; 1994.
- [125] Richter, W. et al.; **Bedarfslüftung im Wohnungsbau**; Abschlussbericht; Institut für Thermodynamik und TGA an der TU Dresden; Dresden; 2001.
- [126] Richter, W. et al; **Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern**; Abschlussbericht; TU Dresden; Dresden; 2002.
- [127] Richter, Wolfgang / Knabe, Gottfried et al; **Bewertung von kostengünstigen anlagentechnischen Energiemaßnahmen im Gebäudebestand**; Fraunhofer IRB; Stuttgart; 1999.
- [128] Rietschel, H. und Raiß, W.; **Heiz- und Klimatechnik**; 2 Bde.; Springer; Heidelberg; 1968.
- [129] Rogatty, W. und Burger, H.; **Anpassung der Kesselleistung an die Heizlast**; BHKS Almanach 2003; Bonn; 2003.
- [130] Roos, Hans; **Hydraulik der Wasserheizung**; Oldenbourg; München; 1999.
- [131] Schiebold, Hans und Wurr, Konrad (Hrsg.); **Symposien zur Gebäudetechnik 1982-1993**; BHKS; Bonn; 1994.
- [132] Schinnerl, S. et al; **Gebäudesimulationsprogramme im Vergleich**; TAB; Nr. 2/2003; Bertelsmann; Gütersloh; 2003.
- [133] Schlapmann, Dietrich; **Heizkostenverteiler**; IKZ; Nr. 8/1988; Strobel; Arnsberg; 1988.
- [134] Schlott, Siegfried; **Einflussfaktoren und Grenzwerte der Anlagenleistung**; HLH; Nr. 2/2002; VDI; Düsseldorf; 2002.
- [135] Schmid, C. et al; **Heizung, Lüftung, Elektrizität**; vdf und Teubner; Zürich und Stuttgart; 1999.
- [136] Schneider, Hans; **Reihenfolge der Maßnahmen – Wärmedämmung oder Heizungsmodernisierung?**; Sanitär- und Heizungstechnik; Nr. 4/1994; Krammer; Düsseldorf; 1994.
- [137] Schrode, Ansgar; **Altbausanierung in Niedrigenergiebauweise**; expert; Renningen-Malmsheim; 1997.
- [138] Schrode, Ansgar; **Niedrigenergiehäuser**; Rudolf Müller Verlagsgesellschaft; Köln; 1996.
- [139] Schrowang, Horst; **Regelung von PWW-Heizungsanlagen in Einfamilienhäusern**; IKZ; Nr. 6/1987; Strobel; Arnsberg; 1987.
- [140] Schüßler, Kathrin; **Kennwerte für Wärmeverteilnetze in Wohngebäuden**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2001.
- [141] Senczek, Rolf-W.; **Wie praxistauglich sind Elektronikpumpen**; sbz; Nr. 7/2000; Gentner; Stuttgart; 2000.
- [142] Senczek, Rolf-W.; **Neue Aspekte zur Auslegung von Rohrnetzen und Umwälzpumpen für Heizungsanlagen**; TAB; Nr. 8/1997; Bertelsmann; Gütersloh; 1997.
- [143] SIA 380/1; **Energie im Hochbau**; Zürich; 1993.
- [144] SIA 380/1; **Thermische Energie im Hochbau**; Zürich; 2001.
- [145] Siemens Building Technologies Schweiz AG (Hrsg.); **Partner News – MiniCombiVentil**; Nr. 2 / 2001; Stenhausen; 2001.

- [146] Soller, Ulrich und Munkelt, Hartmut; **Der Heizungsbauer**; Deutsche Verlags-Anstalt; Stuttgart; 1996.
- [147] Soyer, Jan; **Neuer Weg zum hydraulischen Abgleich von Heizungsanlagen**; Sanitär- und Heizungstechnik; Nr. 5/1987; Krammer; Düsseldorf; 1987.
- [148] Stamminger, Walter; **Die Pumpenwarmwasserheizung**; Marhold; Halle a. S.; 1938.
- [149] Ständiger Ausschuß der Kongresse für Heizung und Lüftung (Hrsg.); **XIV. Kongress für Heizung und Lüftung 26. – 28. Juni 1935 in Berlin**; Oldenbourg; München; 1935.
- [150] Ständiger Ausschuß der Kongresse für Heizung, Lüftung und Klimatechnik (Hrsg.); **XVII. Kongress für Heizung, Lüftung, Klimatechnik 19. – 21. April 1961 in Hamburg**; Klepzig; Düsseldorf; 1961.
- [152] Statistisches Bundesamt (Hrsg.); **Statistisches Jahrbuch 2001**; Metzler-Poeschel; Stuttgart; 2001.
- [152] Steimle, Fritz et al; **Handbuch haustechnische Planung**; Krämer; Stuttgart; 2000.
- [153] Steinmüller, Bernd; **Energieeinsparung im Gebäudebestand**; Vortragsfolien; Institut Wohnen und Umwelt IWU; Darmstadt; 1999.
- [154] Stelter, Sven; **Feldversuch – Energetische Bewertung von Brennwertkesselanlagen unter realen Bedingungen**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2001.
- [155] Techem (Hrsg.); **Tafelsilber auf dem Prüfstand**; Techem Magazin; Juni/2003; Eschborn; 2003.
- [156] Tiator, Ingolf; **Die neue Meisterprüfung**; Vogel; Würzburg; 1998.
- [157] **Überwachung der Einhaltung der Anforderungen nach der Energieeinsparverordnung**; Erlass des Innenministeriums; Land Schleswig-Holstein; 2002.
- [158] Ullrich, Christian; **Monatsweise Energetische Bewertung von Mehrfamilienwohnbauten in NEH-Bauweise**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2002.
- [159] VDI 2055; **Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen – Berechnungen; Gewährleistungen, Meß- und Prüfverfahren, Gütesicherung, Lieferbedingungen**; Beuth; Berlin; 1994.
- [160] VDI 2067; **Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Blatt 4: Warmwasserversorgung**; VDI; 1982.
- [161] VDI 2067; **Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Blatt 2: Raumheizung**; VDI; 1993.
- [162] VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 1: Grundlagen und Kostenrechnung**; VDI; 2000.
VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 10 Entwurf: Energiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude**; VDI; 1998.
VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 11 Entwurf: Rechenverfahren zum Energiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude**; VDI; 1998.
VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 12: Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung**; VDI; 2000.
VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 20 Entwurf: Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen**; VDI; 2000.
VDI 2067; **Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blatt 21 Entwurf: Energieaufwand der Nutzenübergabe Raumluftechnik**; VDI; 2002.
- [163] VDI 2073; **Hydraulische Schaltungen in Heiz- und Raumluftechnischen Anlagen**; Beuth; Berlin; 1999.
- [164] VDI 3807; **Energieverbrauchskennwerte für Gebäude; Blatt 1: Grundlagen**; VDI; 1994.

- [165] VDI 3807; **Energieverbrauchskennwerte für Gebäude; Blatt 2: Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte**; VDI; 1998.
- [166] VDI 3807; **Energieverbrauchskennwerte für Gebäude; Blatt 3: Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude und Grundstücke**; VDI; 2000.
- [167] VDI 3808; **Energiewirtschaftliche Beurteilungskriterien für heiztechnische Anlagen**; VDI; 1993.
- [168] VDI 3809; **Prüfung heiztechnischer Anlagen**; Beuth; Berlin; 1994.
- [169] VDI 3815; **Grundsätze für die Bemessung der Leistung von Wärmeerzeugern**; Berlin; Beuth; 1993; zurückgezogen 2002.
- [170] VDI 6030; **Auslegung von freien Raumheizflächen; Blatt 1: Grundlagen und Auslegung von Raumheizkörpern**; VDI; 1999.
- [171] VDI Berichte Nr. 1010; **Regelung und hydraulische Schaltungen in heiz- und raumluftechnischen Anlagen**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1992.
- [173] VDI Berichte Nr. 1157; **Wärmeschutzverordnung**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1994.
- [173] VDI Berichte Nr. 1237; **Technik im Niedrig-Energie-Gebäude**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1996.
- [174] VDI Berichte Nr. 1428; **Die neue VDI 2067**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1999.
- [175] VDI Berichte Nr. 1549; **Regelung und Hydraulik in der Heiz- und Raumluftechnik**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 2000.
- [176] VDI Berichte Nr. 1692; **Energetische Bewertung des Bestandes**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 2002.
- [177] VDI Berichte Nr. 593; **Erfolgreiche Strategien in der Haustechnik**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1986.
- [178] VDI Berichte Nr. 641; **Hydraulik in Zentralheizungsanlagen**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1987.
- [179] VDI Berichte Nr. 802; **Heizung und Sanitärtechnik**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1990.
- [180] VDI Berichte Nr. 828; **Sanierungsaufgaben in der technischen Gebäudeausrüstung**; Tagungsband; VDI Verlag; Düsseldorf; 1990.
- [181] VDI Fortschrittsberichte; Reihe 19 Nr. 61; **Hinweise zur Ausführung und zum Energieverbrauch von Heiz- und Raumluftechnischen Anlagen**; VDI Verlag; Düsseldorf; 1992.
- [182] VDMA-Einheitsblatt; **Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwassererwärmungs- und Raumluftechnischen Anlagen (Arbeitstitel)**; VDMA (unveröffentlicht); 2003.
- [183] Velta (Hrsg.); **11. Internationaler Velta-Kongress 1989**; Stadler; Konstanz; 1989.
- [184] Velta (Hrsg.); **2. Internationaler Velta-Kongress 1980**; Stadler; Konstanz; 1980.
- [185] Velta (Hrsg.); **8. Internationaler Velta-Kongress 1986**; Stadler; Konstanz; 1986.
- [186] Velta (Hrsg.); **9. Internationaler Velta-Kongress 1987**; Stadler; Konstanz; 1987.
- [187] Verbraucherzentrale Niedersachsen e.V. (Hrsg.); **Heizung und Warmwasser**; Hannover; 2001.
- [188] **Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen**; vom 12. Oktober 1990 (BGBl. I 1990 S. 2178); zuletzt geändert durch die Verordnung vom 13. Juli 1992 (BGBl. I 1992 S. 1250).
- [189] Viessmann, Hans; **Viessmann Heizungs-Handbuch**; Gentner; Stuttgart; 1987.
- [190] Visier, Jean Christophe (Hrsg.); **Energy Performance of Buildings – Calculation procedures used in European countries**; ENPER-TEBUC; Centre Scientifique es Technique du Bâtiment; Belgian Building Research Institute; 2003.
- [191] Vorländer, J. / Wolff, D. und Hahn, S.; **Bauen Am Kronsberg – Heiztechnisches Konzept**; Landeshauptstadt Hannover (Hrsg.); Amt für Umweltschutz; Hannover; 1998.

- [192] Walch, Albert; **Ein vereinfachtes Verfahren zur Heizlastbestimmung**; Wärmetechnik; Nr. 5/2000; Gentner; Stuttgart; 2000.
- [193] Wentzlaff, G.; **Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren für den Normwärmebedarf und den Jahreswärmeverbrauch von Heizanlagen**; Dissertation; Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften; Reihe 6 Nr. 115; VDI Verlag; Düsseldorf; 1983.
- [194] Werner, Hans; **Auswirkungen baulicher Energiesparmaßnahmen**; HLH; Nr. 11/1986; VDI; Düsseldorf; 1986.
- [195] Werthschulte, Rüdiger; **Hydraulische Voreinstellung in der Heizungstechnik**; IKZ; Nr. 22/1995; Strobel; Arnsberg; 1995.
- [196] Wierz, Melchior; **Die Warmwasserheizung**; Oldenbourg; München; 1952.
- [197] Wilo-Brain (Hrsg.); **Heizungsanlagen optimieren!**; Christiani; Konstanz; 2002.
- [198] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.); **Energetische Modernisierung von Wohngebäuden**; Stuttgart; 1999.
- [199] Wittmann, Stefan; **Energiekennwerte zur Bewertung des Gebäude- und Anlagenbestands in der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode**; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 1998.
- [200] Wohlers, Heike; **Technische und wirtschaftliche Kennwerte der Anlagentechnik**; Vorabmanuskript; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2003.
- [201] Wolff, D. et al.; **Ökologischer Mietwohnungsbau Duderstadt**; Abschlussbericht; Institut für Heizungs- und Klimatechnik an der FH Braunschweig/Wolfenbüttel; Wolfenbüttel; 1999.
- [202] Wolff, D. und Teuber, P.; **Felduntersuchungen zur Planung und Ausführung heiz- und Lüftungstechnischer Anlagen am Kronsberg**; KUKA-Dokumentation; Edition 7; Wolfenbüttel; 2001
- [203] Wolff, Dieter / Budde, Jörg und Sproten, Hans-Peter; **Vereinfachte Heizlastberechnung**; IKZ; Nr. 16/1994; Strobel; Arnsberg; 1994.
- [204] Wolff, Dieter / Budde, Jörg / Teuber, Peter und Jagnow, Kati; **Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Brennwertkesseln**; Abschlussbericht zum DBU Projekt; Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (noch unveröffentlicht); Wolfenbüttel; 2003/2004.
- [205] Wolff, Dieter / Jagnow, Kati / Ullrich, Christian und Halper, Christian; **Felduntersuchungen zur Begrenzung des Lüftungswärmeverbrauchs bei mechanischer Wohnungslüftung und Fensterlüftung durch Nutzerinformation sowie durch heiz- und regelungstechnische Maßnahmen**; BBR Forschungsvorhaben; Endbericht; Institut für Heizungs- und Klimatechnik an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel; 2002.
- [206] Wolff, Dieter / Stock, Heike / Vorländer, Jochen und Hahn, Stephanie; **Entwicklungstendenzen in der Regelungstechnik von Heizungsanlagen**; 3 Teile; Wärme + Versorgungstechnik; Nr. 12/1995, 4/1996, 7/1998; Gentner; Stuttgart; 1995 – 1998.
- [207] Wolff, Dieter; **Entwicklungstendenzen in der Heizungstechnik**; Bundesbaublatt; Nr. 3/1996; Bertelsmann; Gütersloh; 1996.
- [208] WSchV; **Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden**; Ausgaben von 1977, 1984 und 1995.
- [209] Zöllner, G. und Geisenheimer, W.-D.; **Bedeutung der Rohrwärmeabgabe für die verbrauchsabhängige Abrechnung**; HLH; Nr. 6/2002; VDI; Düsseldorf; 2002.

Anhang

Heizkörpergleichungen (zu Kapitel 5.2.1)

$$1. \text{ Heizkörpergleichung} \quad \varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} \cdot \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{R,A}} = \mu \cdot \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\Delta\vartheta_A} \quad (\text{A-0-1})$$

$$2. \text{ Heizkörpergleichung} \quad \varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{A}{A_A} \cdot \frac{\left[\frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln\left(\frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}\right)} \right]^n}{\left[\frac{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{R,A}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{i,A}}{\vartheta_{R,A} - \vartheta_{i,A}}\right)} \right]^n} = \alpha \cdot \left[\frac{\Delta\vartheta_{ln}}{\Delta\vartheta_{ln,A}} \right]^n \quad (\text{A-0-2})$$

$$3. \text{ Heizkörpergleichung} \quad \varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{\vartheta_{i,A} - \vartheta_{a,A}} \quad (\text{vereinfacht}) \quad (\text{A-0-3})$$

$$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot (H_T + H_V) - (\dot{Q}_I + \dot{Q}_S)}{(\vartheta_{i,A} - \vartheta_{a,A}) \cdot (H_{T,A} + H_{V,A}) - (\dot{Q}_{I,A} + \dot{Q}_{S,A})} \quad (\text{A-0-4})$$

In allen Gleichungen steht der Index "A" für den Auslegungs- oder anderen Bezugszustand.

Heizkurvengleichungen (zu Kapitel 5.3.3)

Exponentielle Darstellung unter Verwendung der Heizkörpergleichungen:

$$\vartheta_V = \vartheta_{i,A} - \frac{\varphi \cdot \Delta\vartheta_A \cdot e^{\frac{\Delta\vartheta_A}{\Delta\vartheta_{ln,A}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}}{1 - e^{\frac{\Delta\vartheta_A}{\Delta\vartheta_{ln,A}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}} \quad \text{mit:} \quad \Delta\vartheta_A = \vartheta_{V,A} - \vartheta_{R,A} \quad (\text{A-0-5})$$

$$\varphi = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{\vartheta_{i,A} - \vartheta_{a,A}}$$

$$\Delta\vartheta_{ln,A} = \frac{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{R,A}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{i,A}}{\vartheta_{R,A} - \vartheta_{i,A}}\right)}$$

Lineare Darstellung unter Verwendung der arithmetischen Übertemperatur; ausreichend genau für $(\vartheta_{R,A} - \vartheta_i) / (\vartheta_{V,A} - \vartheta_i) \geq 0,7$:

$$\vartheta_V = \frac{\vartheta_{V,A} - \vartheta_{i,A}}{\vartheta_{i,A} - \vartheta_{a,A}} \cdot (\vartheta_{i,A} - \vartheta_a) + \vartheta_{i,A} \quad (\text{A-0-6})$$

Die Auslegungsgrößen sind mit dem Index "A" gekennzeichnet.

Ventilkennlinien (zu Kapitel 5.2.3)

ideale Kennlinie (Grundkennlinie)
$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} = \frac{k_V}{k_{V,100}} = \frac{H}{H_{100}} \quad (\text{A-0-7})$$

reale Kennlinie (Betriebskennlinie)
$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} = \sqrt{\frac{1}{1 - a_V + \frac{a_V}{(H/H_{100})^2}}} \quad (\text{A-0-8})$$

Resultierende Rücklauftemperatur (zu Kapitel 5.3.3)

Zunächst wird mit Gleichung (A-0-9) die tatsächliche Belastung des Raumes aufgrund der Witterung und Fremdwärme bestimmt. Dazu muss die dem beheizten Bereich durch die Heizung zugeführte Wärmenge $Q_{intern,mess}$ aus Verbrauchswerten bestimmt werden. Alternativ können die Anteile der Verluste $Q_{T+V,ist}$ und Gewinne $Q_{I+S,ist}$ unter realen Wetter- und Nutzungsbedingungen abgeschätzt werden. Bezugsgröße ist das Produkt aus Auslegungsheizlast $\dot{Q}_{Raum,A}$ und Messzeitraum t_{mess} .

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{(\vartheta_{i,ist} - \vartheta_{a,ist}) \cdot H_{T+V,ist} - \dot{Q}_{I+S,ist}}{(\vartheta_{i,A} - \vartheta_{a,A}) \cdot H_{T+V,A} - \dot{Q}_{I+S,A}} \\ 3. \text{ Heizkörpergleichung} &= \frac{t_{mess} \cdot (\vartheta_{i,ist} - \vartheta_{a,ist}) \cdot H_{T+V,ist} - t_{mess} \cdot \dot{Q}_{I+S,ist}}{t_{mess} \cdot \dot{Q}_{Raum,A}} \quad (\text{A-0-9}) \\ &= \frac{Q_{T+V,ist} - Q_{I+S,ist}}{t_{mess} \cdot \dot{Q}_{Raum,A}} = \frac{Q_{intern,mess}}{t_{mess} \cdot \dot{Q}_{Raum,A}} \end{aligned}$$

Rücklauftemperatur und Massenstromverhältnis im Messzeitraum werden iterativ anhand der Gleichungen (A-0-10) und (A-0-11) bestimmt. Das berechnete Massenstromverhältnis μ bezieht sich auf den Massenstrom, der bei einer Auslegungsspreizung von 75/65 °C zur Deckung der Auslegungsheizlast $\dot{Q}_{Raum,A}$ notwendig wäre. Die Heizflächenüberdimensionierung $\alpha_{\dot{U},75,65}$ ist das Verhältnis der installierten Heizkörperleistungen bei 75/65 °C zur Auslegungsheizlast der Räume $\dot{Q}_{Raum,A}$. Sonstige Istwerte im Messzeitraum t_{mess} (z.B. Vorlauftemperatur) sowie Auslegungswerte sind entsprechend einzusetzen.

1. Heizkörpergleichung
$$\varphi = \mu \cdot \frac{\vartheta_{V,ist} - \vartheta_{R,ist}}{(75 - 65)K} \quad (\text{A-0-10})$$

2. Heizkörpergleichung
$$\varphi = \alpha_{\dot{U},75,65} \cdot \left[\frac{\vartheta_{V,ist} - \vartheta_{R,ist}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{V,ist} - \vartheta_{i,ist}}{\vartheta_{R,ist} - \vartheta_{i,ist}}\right)} \cdot \frac{75^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{75^\circ\text{C} - \vartheta_{i,soll}}{65^\circ\text{C} - \vartheta_{i,soll}}\right)} \right]^{n,ist} \quad (\text{A-0-11})$$

Beispiel: EFH, Bestimmung der Rücklauf­temperatur für ein Messintervall von 115 Tagen mit einer mittleren Außentemperatur von 0°C. Die Vorlauf­temperatur beträgt rechnerisch 62,8 °C. Das Gebäude entspricht dem in Tabelle 6-3 beschriebenen Typgebäude mit 156 m² beheizter Fläche, die Verbrauchsdaten sind Tabelle 6-4 (Minimaler Verbrauch, EFH) entnommen.

$$3. \text{ Heizkörpergleichung} \quad \varphi = \frac{130 \text{ kWh} / \text{m}^2}{115 \text{ d} / \text{a} \cdot 24 \text{ h} / \text{d} \cdot 86 \text{ W} / \text{m}^2} = 0,548 \quad (\text{A-0-12})$$

$$1. \text{ Heizkörpergleichung} \quad 0,546 = 0,1555 \cdot \frac{62,8^\circ\text{C} - 27,7^\circ\text{C}}{(75 - 65)\text{K}} \quad (\text{A-0-13})$$

$$2. \text{ Heizkörpergleichung} \quad 0,546 = \frac{162 \text{ W} / \text{m}^2}{86 \text{ W} / \text{m}^2} \cdot \left[\frac{\frac{62,8 - 27,7}{\ln\left(\frac{62,8 - 21}{27,7 - 21}\right)}}{75^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}} \right]^{1,3} \quad (\text{A-0-14})$$

- Es ergibt sich für die vorhandene Überdimensionierung der Heizflächen von $\alpha_{i,75,65} = 162/86 = 1,883$ eine rechnerische Rücklauf­temperatur von $\vartheta_{R,ist} = 27,7^\circ\text{C}$.
- Das Massenstromverhältnis beträgt $\mu = 0,156$.
- Der Normmassenstrom ergibt sich zu $(86 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot 156 \text{ m}^2) / (10 \text{ K} \cdot 1,167 \text{ kWh} / (\text{m}^3 \cdot \text{K})) = 1150 \text{ kg} / \text{h}$.
- Der reale Massenstrom beträgt demnach $0,156 \cdot 1150 \text{ kg} / \text{h} = 179 \text{ kg} / \text{h}$.

Kennwerte der Anlagentechnik (zu Kapitel 5)

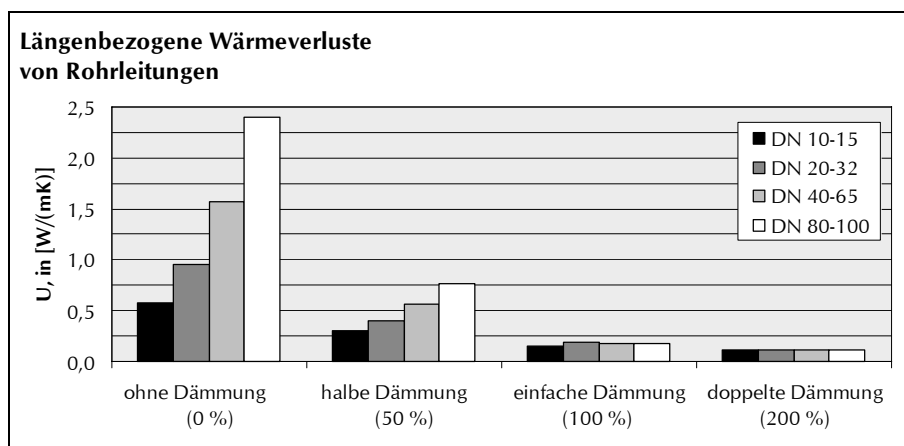


Bild A-1 Längenbezogene Wärmeverluste von Rohrleitungen

	Baujahre	EFH (Anzahl)	MFH (Anzahl)
beheizte Fläche A_{EBr} in [m ²]	alle	156 (48)	838 (37)
Verhältnis Hüllfläche zu beheizter Fläche A/A_{EBr} in [-]	alle bis 1977	2,0 (16)	1,9 (17)
	alle ab 1978	2,0 (18)	1,7 (15)
	alle	2,0 (43)	1,8 (32)

Tabelle A-1 Typische Flächen in Bestandsgebäuden (nach [200])

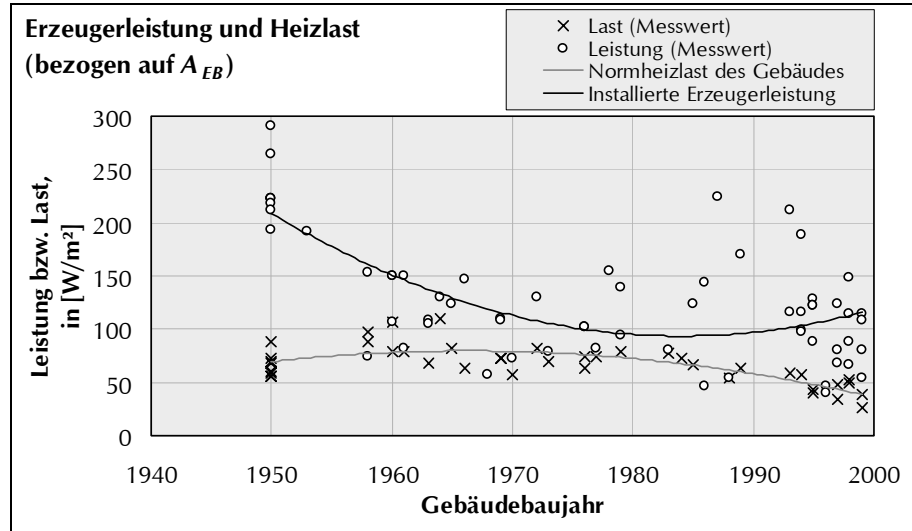


Bild A-2 Wärmeezeugerleistung und Heizlast abhängig vom Gebäudebaujahr (nach [200])

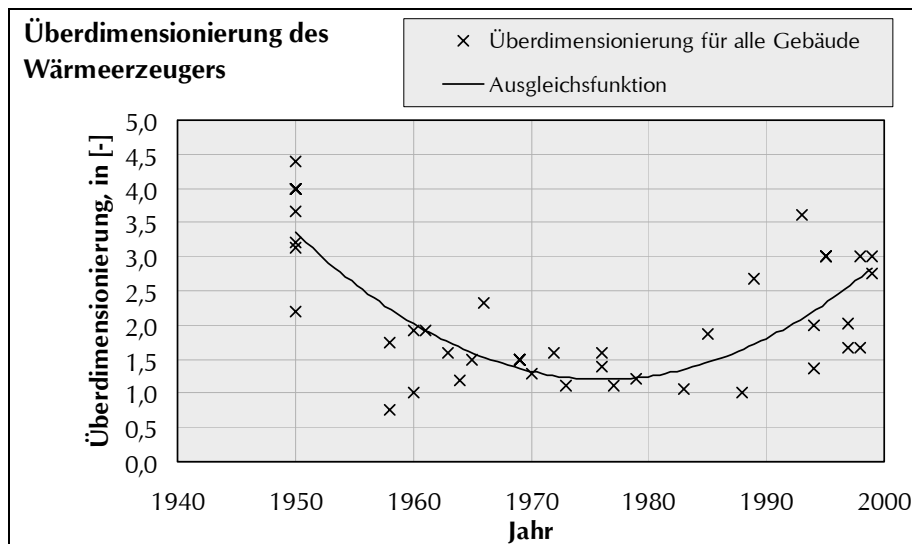


Bild A-3 Wärmeezeugerüberdimensionierung abhängig vom Gebäudebaujahr (nach [200])

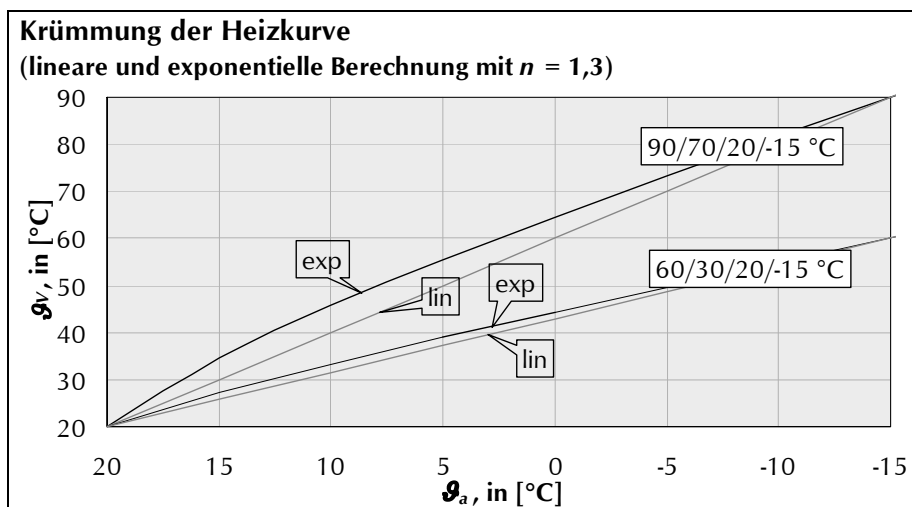


Bild A-4 Heizkurve mit linearer und exponentieller Berechnung

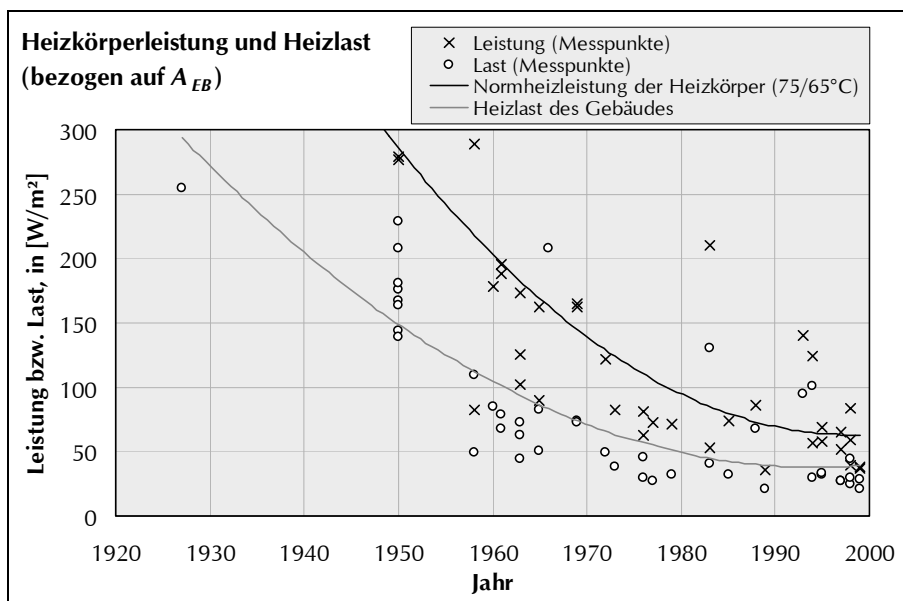


Bild A-5 Heizkörperleistung und Heizlast abhängig vom Gebäudebaujahr (nach [200])

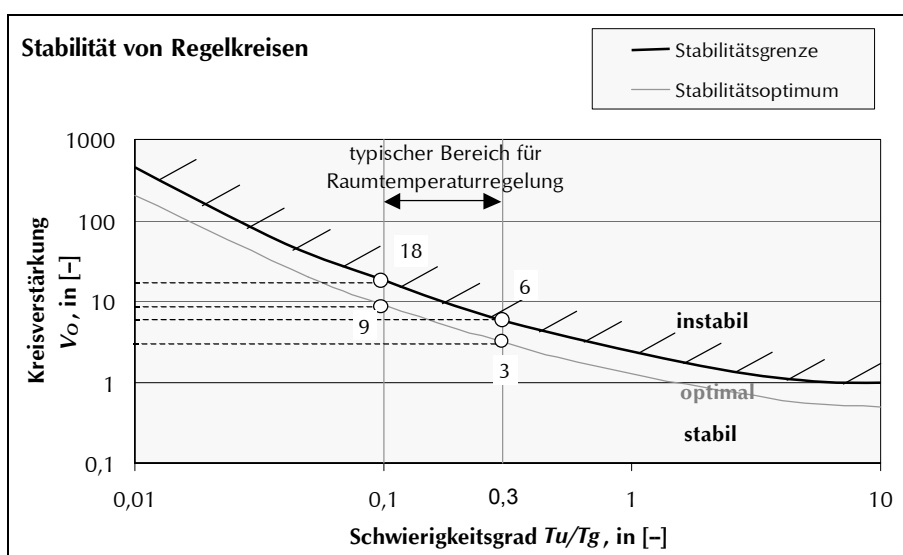


Bild A-6 Stabilität von Regelkreisen (nach [8])

Zu Bild A-6: Der Schwierigkeitsgrad einer Raumregelstrecke charakterisiert das dynamische Verhalten (Totzeit- und Speicherverhalten) des Raumes und liegt bei $S \approx 0,1 \dots 0,3$ (typisch: 0,2). Die maximale Stellwirkung beträgt $X_{hS} = 4 \dots 12$ K (z.B. bei Auslegung: 10 K) [8] [87]. Dieser Wert gibt die mögliche Raumtemperaturänderung an, die sich für den Betrieb mit voll geöffnetem und mit voll geschlossenem THKV ergibt. Er hängt von der Außentemperatur, der Beheizung der Nachbarräume und anderen Faktoren ab.

Bei $S = 0,2$ ergibt sich eine optimale Kreisverstärkung zur Vermeidung von Schwingungen im System von $V_{O,Opt} \approx 4$. Der optimale P-Bereich liegt somit im Auslegungsfall bei etwa $X_{P,Opt} \approx 2,5$ K (10 K : 4). Instabile Zustände treten bei etwa halb so großem P-Bereich auf. In der Übergangszeit sind die Werte entsprechend geringer, weil die Stellwirkung X_{hS} sinkt.

Parametervariation für Luftwechsel und Heizgrenze (zu Kapitel 6.5 und 7)

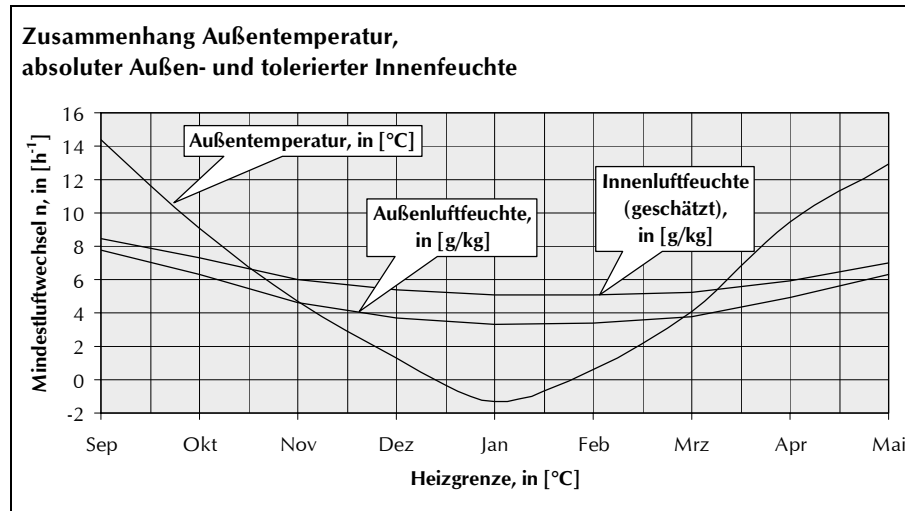


Bild A-7 Zusammenhang Außentemperatur und Feuchten

Monat	Referenzort, DIN V 4108-6				Aufteilung der inneren Leistung	Tolerierte Feuchte, innen [g/kg]		
	Außentemperatur ϑ_a , in [°C]	Globalstrahlung in [W/m ² _{Fe}]				5 ... 10 [g/kg]	6 ... 9 [g/kg]	vermuteter realer Verlauf [g/kg]
		gleichmäßige Verteilung der Fenster in alle Richtungen	Fenster 70 % Süd, 30 % Nord	Fenster 50 % Ost, 50 % West				
Sep	14,4	86	95	90	7,9 %	9,0	8,4	8,5
Okt	9,1	53	67	51	8,3 %	7,6	7,6	7,3
Nov	4,7	32	43	28	8,8 %	6,1	6,7	6,0
Dez	1,3	18	26	15	9,2 %	5,4	6,3	5,4
Jan	-1,3	30	43	25	9,6 %	5,0	6,0	5,1
Feb	0,6	39	50	37	9,2 %	5,1	6,1	5,1
Mrz	4,1	55	66	53	8,8 %	5,4	6,3	5,2
Apr	9,5	114	115	125	8,3 %	6,4	6,9	5,9
Mai	12,9	117	108	131	7,9 %	7,6	7,6	7,0
Jun	15,9	134	121	150	7,5 %	9,1	8,5	8,5
Jul	18	139	125	156	7,1 %	10,0	9,1	9,5
Aug	18,3	104	99	115	7,5 %	9,9	9,0	9,4

Tabelle A-2 Randdaten für monatliche Untersuchungen (fett markiert: Standardwert)

Tabelle A-2 zeigt monatlich veränderliche Randdaten für eine Untersuchung der Wärmeverluste (Transmission und Lüftung) und Fremdwärme (solare, aus Personen und Elektroenergieverbrauch). Sofern mehrere Parameter möglich sind, ist der Standardwert für die Parametervariation fett markiert, z.B. für die solare Einstrahlung.

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

Parameter		1	2	3	4
Fremdwärmeeintrag aus Personen- abwärme und Haushaltsstrom	kWh/(Person·a) (W/Person)	800 (91)	900 (103)	1000 (114)	1100 (126)
Belegungsdichte	m ² /Person	30	40	55	75
Feuchteintrag je Person	g/(h·Person)	40	45	50	55
Fensterflächenanteil A_{fe}/A_{EB}	m ² /m ²	0,15	0,25	0,35	0,45
Solarstrahlungsminderung $g \cdot r$	—	0,15	0,18	0,22	0,28
Hüllkenngröße $U \cdot A / A_{EB}$	W/(m ² ·K)	0,5	1,0	2,0	4,0
Mindestluftwechsel aus CO ₂	m ³ /(h·Person)	20	25	30	35

Tabelle A-3 Parametervariation (fett markiert: Standardwert)

Tabelle A-3 zeigt darüber hinaus weitere Randdaten für die monatliche Variation, die jedoch über das ganze Jahr als fix angenommen werden. Die möglichen Variationen für die einzelnen Größen sind in nummerierten Spalten 1 ... 4 angegeben, der Standardwert ist fett markiert.

Heizgrenze in [°C] bei Parameter:	1	2	3	4
Fremdwärmeeintrag	11,4	12,1	11,9	11,6
Belegungsdichte	12,0	11,9	11,8	11,7
Feuchteintrag	11,8	11,9	12,1	12,3
Fensterflächenanteil	13,1	13,2	11,9	11,8
Solarminderung	13,2	12,6	11,9	10,8
Hüllkenngröße	9,3	11,9	14,5	17,2
Mindestluftwechsel CO ₂	11,7	11,9	11,5	12,0
Feuchtetoleranz	11,5	12,5	11,9	—
Fensterausrichtung	11,9	11,5	11,8	—

Tabelle A-4 Heizgrenze bei Parametervariation (fett markiert: Standardwert)

Tabelle A-4 zeigt Ergebnisse der Berechnung der Heizgrenze aus den Randdaten nach Tabelle A-2 und Tabelle A-3. Dabei werden monatlich die auf die beheizte Fläche bezogenen Wärmeverluste der Transmission, der zum Feuchteabtransport notwendige Luftwechsel und die auf die beheizte Fläche bezogenen Wärmeverluste der Lüftung sowie die auf die beheizte Fläche bezogenen Fremdwärmeeinträge bestimmt. Aus dem Verhältnis der Fremdwärme zu den Verlusten ergibt sich die Heizgrenztemperatur.

Zur Archivierung der Ergebnisse: weil jeweils für einen Parameter (z.B. die Belegungsdichte) mehrere Kennwerte (30 – 40 – 55 – 75 m²/Person) vorliegen, ergeben sich jeweils andere Heizgrenzen (12,0 – 11,9 – 11,8 – 11,7 °C). Die Nummerierung der Ergebnisspalten in Tabelle A-4 entspricht den Spalten der Parameter in Tabelle A-2 und Tabelle A-3. Bei der Parametervariation einer Größe wurden gleichzeitig alle anderen Kenngrößen mit ihren Standardwerten (fett markiert) eingesetzt. Es zeigt sich, dass der zusammengefasste dimensionslose Fensterkennwert $A_{fe}/A_{EB} \cdot g \cdot r$ und der Hüllkennwert $U_m \cdot A/A_{EB}$ den größten Einfluss auf die Heizgrenze haben. Einen weiteren Einfluss hat die Innentemperatur.

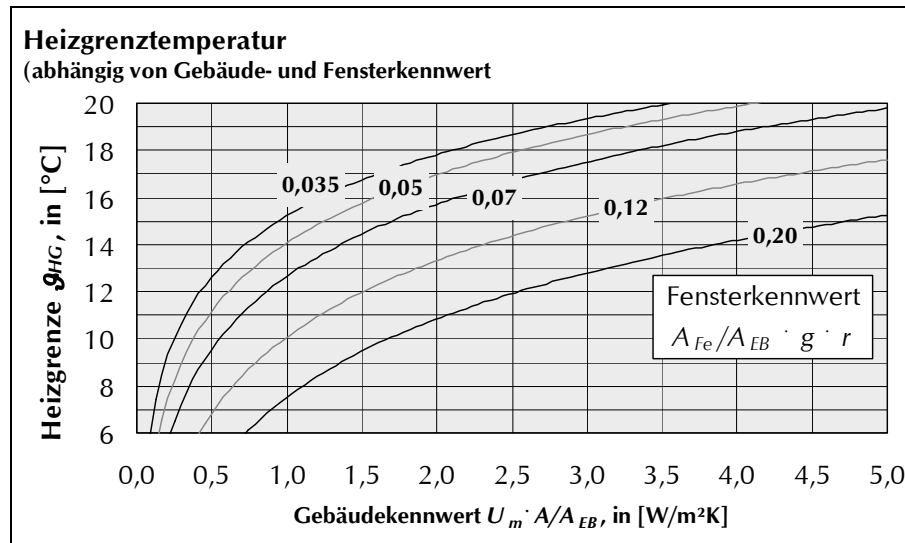


Bild A-8 Abschätzung der Heizgrenze

Bild A-8 zeigt die näherungsweise Abschätzung der Heizgrenze. Dem Bild liegt eine Innentemperatur von 20 °C zugrunde. Sofern der Praxiswert davon abweicht, ist die abgelesene Heizgrenze etwa um den Differenzbetrag der Rauminnentemperatur zu ändern. Sind noch andere innere Fremdwärmequellen außer Abwärme aus Personen und Haushaltsstrom zu verzeichnen (insbesondere Wärmeeintrag aus Zirkulationsleitungen), ergeben sich geringere erreichbare Heizgrenzen.

Belegungs- dichte, in [m ² /Person]	Zeit	resultierender Luftwechsel n , in [h ⁻¹]								
		Fensterkenngröße $A_{Fe}/A_{EB} \cdot g \cdot r$, in [-]			Feuchteeintrag, in [g/(h·Person)]			CO ₂ -bedingter Luftwech- sel, in [m ³ /(h·Person)]		
		0,025	0,035	0,100	35	45	55	20	25	40
30	nur Kernwinter	0,33	0,35	0,50	0,25	0,32	0,39	0,27	0,33	0,53
	ganze Heizzeit	0,58	0,66	1,14	0,35	0,45	0,55	0,27	0,33	0,53
	nur Übergang	0,90	1,04	1,94	0,48	0,61	0,75	0,27	0,33	0,53
40	nur Kernwinter	0,26	0,29	0,44	0,19	0,24	0,29	0,20	0,25	0,40
	ganze Heizzeit	0,48	0,56	1,05	0,26	0,34	0,41	0,20	0,25	0,40
	nur Übergang	0,76	0,90	1,81	0,36	0,46	0,56	0,20	0,25	0,40
50	nur Kernwinter	0,22	0,24	0,40	0,15	0,19	0,23	0,16	0,20	0,32
	ganze Heizzeit	0,42	0,50	0,99	0,21	0,27	0,33	0,16	0,20	0,32
	nur Übergang	0,68	0,82	1,72	0,29	0,37	0,45	0,16	0,20	0,32

Tabelle A-5 Luftwechsel aus Fremdwärme, Feuchte, CO₂-Eintrag

In Tabelle A-5 wurde mit den Randbedingungen nach Tabelle A-2 und Tabelle A-3 und der Fensterkenngröße (Abschätzungen nach [205]) ein Fremdwärmeeintrag in den beheizten Bereich (solar, Personen, Geräte) bestimmt. Soweit nicht anders angegeben, wurden die fett markierten Standardwerte verwendet. Aus dem Fremdwärmeeintrag wurde ein maximaler Luftwechsel bei vollständigem Ablüften bestimmt. Die berechneten Monatswerte wurden über die Heizzeit, die Übergangszeit und den Kernwinter gemittelt. Analog erfolgte die Berechnung für die notwen-

digen Luftwechsel zum Feuchte- und zum CO₂-Abtransport. Bild A-9 und Bild A-10 zeigen minimale monatliche Luftwechsel als Ergebnisse der Variation, die auch Tabelle A-5 zugrunde liegt.

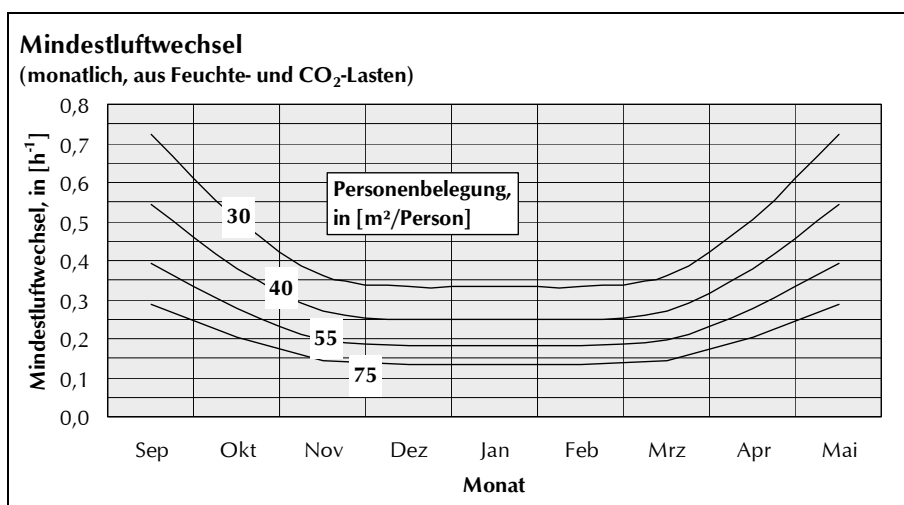


Bild A-9 Monatlicher Mindestluftwechsel

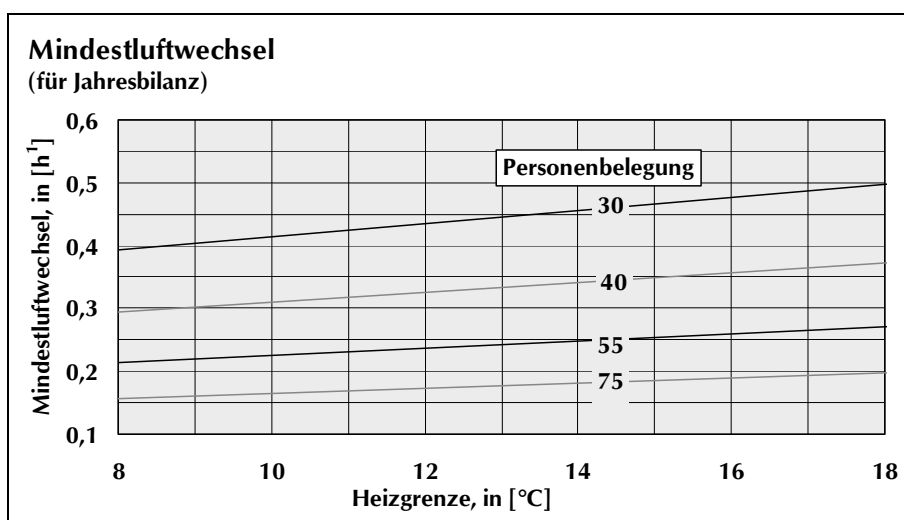


Bild A-10 Minimaler Luftwechsel für die Jahresbilanz

Gleichungen der Fehlerfortpflanzung (zu Kapitel 7.5)

systematische Fehler: $\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i$ Die absoluten Fehler von x_i sind Δx_i .
 Der absolute Fehler der Gesamtgröße y ist Δy . (A-0-15)

zufällige Fehler: $\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2}$ Die Standardabweichungen von x_i sind σ_{x_i} .
 Die Standardabweichung der Gesamtgröße y ist σ_y . (A-0-16)

Die Größe y wird mit einer Gleichung aus den Einzelgrößen x_i berechnet. Von der Gleichung zur Berechnung von y ist für jede Größe x_i das Differential (erste Ableitung) $\partial y / \partial x_i$ zu bilden. Die Rechnung erfolgt jeweils unter Berücksichtigung der Einheiten.

Daten zur Wirtschaftlichkeitsberechnung (zu Kapitel 8)

Energieträger	Energiepreis für Endenergie (Mittelwert aus Arbeits- und Leistungspreis nach [10]), in [€/kWh]	Anteil bei der Gewichtung, nach [152]
Gas	0,039	ca. 0,45
Öl	0,034	ca. 0,40
Fern- und Nahwärme	0,046	ca. 0,15
Mittelwert Wärme	0,038	
Haushaltsstrom	0,134	

Tabelle A-6 Energiepreis (ohne MWSt.)

Position	Kostendaten		EFH	MFH
	Fläche, in [m ²]		156	840
	Zahl der Räume und THKV		12	84
Aufnahme	Kosten für An- und Abfahrt, Aufnahme der Räume vor Ort, weitere notwendige Datenrecherche	€	80	300
Rechnungen und Vorbereitung der Optimierung	Eingabe der aufgenommenen Daten in Rechenprogramm, zusätzliche Suche in Katalogen, Plänen usw.	€	70	400
Einkauf der Komponenten	Summe der Kosten für Paket 1	€	0	0
	Summe der Kosten für Paket 2 (Differenzdruckregler und Schmutzfänger)	€	90	300
	Summe der Kosten für Paket 3 (THKV, Pumpe und Schmutzfänger)	€	350	1600
	Summe der Kosten für Paket 4 (THKV, Differenzdruckregler und Schmutzfänger)	€	280	1600
Optimierung	Summe der Kosten für Paket 1 (Anfahrt, Einstellung von Pumpen und/oder Differenzdruckregelung, zentraler Regelung, THKV)	€	100	400
	Summe der Kosten für Paket 2 (Anfahrt, Entleeren und Füllen der Anlage, Einbau von Differenzdruckregler und Schmutzfänger, Einstellung von Differenzdruckregelung, zentraler Regelung, THKV)	€	250	900
	Summe der Kosten für Paket 3 (Anfahrt, Entleeren und Füllen der Anlage, Einbau von THKV, Pumpe und Schmutzfänger, Einstellung von Pumpe, zentraler Regelung, THKV)	€	310	1200
	Summe der Kosten für Paket 4 (Anfahrt, Entleeren und Füllen der Anlage, Einbau von THKV, Differenzdruckregler und Schmutzfänger, Einstellung von Differenzdruckregelung, zentraler Regelung, THKV)	€	350	1500
Dokumentation	Kosten für Ausdrücke, Ordner, CDs	€	20	20

Tabelle A-7 Kostenrohdaten und Kosten für Optimierung

Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik

Kostenanteile	Pakete		EFH	MFH	
Kapitalkosten	Paket 1	I_{0r} in [€]	270	1200	
		K_{ir} in [€/a]	28	124	
	Paket 2	I_{0r} in [€]	520	1900	
		K_{ir} in [€/a]	54	196	
	Paket 3	Komponenten mit 15 a Nutzungsdauer	I_{0r} in [€]	210	300
			K_{ir} in [€/a]	30	43
		Komponenten mit 10 a Nutzungsdauer	I_{0r} in [€]	620	3300
			K_{ir} in [€/a]	64	340
Paket 4	I_{0r} in [€]	800	3900		
	K_{ir} in [€/a]	82	402		
Wartungskosten	Pakete 1 ... 4	$K_{u,0r}$ in [€/a]	20	20	
		$K_{u,mr}$ in [€/a]	23	23	
notwendige Energiekosten- ersparnis an der Wirtschaftlich- keitsgrenze	Paket 1	$K_{e,mr}$ in [€/a]	51	147	
		$K_{e,0r}$ in [€/a]	33	95	
	Paket 2	$K_{e,mr}$ in [€/a]	77	219	
		$K_{e,0r}$ in [€/a]	50	142	
	Paket 3	$K_{e,mr}$ in [€/a]	117	406	
		$K_{e,0r}$ in [€/a]	76	263	
	Paket 4	$K_{e,mr}$ in [€/a]	105	425	
		$K_{e,0r}$ in [€/a]	68	275	

Tabelle A-8 Wirtschaftlichkeitsberechnung für anlagentechnische Optimierung

Randdaten	alle Kosten incl. MWSt.	Randdaten	alle Kosten incl. MWSt.
Referent mit Vorbereitung und Reise	6 h/Termin	mittlere Personenbelegung	40 m ² /Person
Stundensatz Referent	50 €/h	Teilnehmer	10 ... 40 Personen
Raum für Vortrag	300 € /Termin	Unterlagen, Einladung	7 €/Person

Tabelle A-9 Randdaten für Nutzerschulung

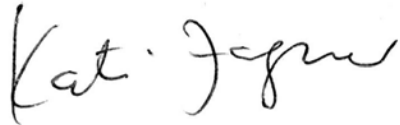
Randdaten	alle Kosten incl. MWSt.	Randdaten	alle Kosten incl. MWSt.
Referent mit Vorbereitung und Reise	32 h/Termin	Teilnehmer	2 ... 10 Unternehmen á 2 Personen
Stundensatz Referent	50 €/h	Stundensatz Unternehmen	38 €/h
Raum für Vortrag	600 € /Termin	Zeitdauer des Seminars	16 h/Termin
Unterlagen, Einladung	10 €/Person		

Tabelle A-10 Randdaten für Handwerkerschulung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Wernigerode, den 10. Januar 2004

A handwritten signature in black ink that reads "Kati Jagnow". The script is cursive and somewhat stylized, with the first letters being larger and more prominent.

(Kati Jagnow)

Lebenslauf – Kati Jagnow



Persönliche Daten

Geburtsdatum 25.03.1977
Geburtsort Pasewalk

Schulbildung

Sept. 1983 – Juli 1992 Besuch der polytechnischen Oberschule sowie der Gesamtschule in Potsdam
Aug. 1992 – Juni 1996 Besuch des Gymnasiums in Potsdam
Juni 1996 Abschluss der Schulausbildung mit der Allgemeinen Hochschulreife

Studium und Promotion

Juli 1996 – Feb. 1997 Vorpraktikum für das Studium der Versorgungstechnik
März 1997 – Feb. 2001 Studium der Versorgungstechnik mit der Studienrichtung Technische Gebäudeausrüstung an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel
Jan. 2001 Abschluss des Studiums als Dipl.-Ing. (FH) für Technische Gebäudeausrüstung
Nov. 2001 Zulassungsprüfung zur Promotion an der Universität Dortmund, Fakultät Bauwesen

Berufliche Tätigkeit

März 2001 – Dez. 2003 Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Trainings- und Weiterbildungszentrum Wolfenbüttel e.V. an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel; Schwerpunkte:

- Energiebilanzierung für Neubau und Bestand;
- Mitarbeit an der Normung zur Energieeinsparverordnung und Europäischen Gebäuderichtlinie;
- Optimierungskonzepte für Regelung und Hydraulik in bestehenden Anlagen;
- Qualitätssicherung in der TGA;
- Begleitung von Feldprojekten, Erstellung von Energiegutachten;
- Aus- und Weiterbildung von Energieberatern

seit Jan. 2004 selbstständige Ingenieurin im Bereich TGA und Energietechnik in oben genannten Tätigkeitsgebieten

Vortragsfolien zum Kolloquium

Disputation und Kolloquium

zur Dissertation

Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen der Heizungsanlagentechnik

Dipl.-Ing. (FH) Kati Jagnow, Wernigerode

Universität Dortmund,

Fakultät Bauwesen,

14. Juli 2004

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Udo Blecken

Energetische und wirtschaftliche Bewertung von
Qualitätssicherungsmaßnahmen der Heizungsanlagentechnik

Auslöser, Motivation, Schwerpunkte.

Auslöser: Praxiserfahrungen

- Verminderte Energieeinsparungen nach Modernisierungen, Verschwendungspotentiale?
- Diskrepanzen zwischen „begleiteten“ und „nicht begleiteten“ Projekten

Begriff: Qualitätssicherung (QS)

- Optimierung der Planung, der Ausführung und des Betriebs von Heizungsanlagen
- Abgleich von Energieeinsparung, Wirtschaftlichkeit, Komfort

Schwerpunkte:

- Grundlagenermittlung/Literatur
- (Weiter-) Entwicklung von Bilanzverfahren
- Verarbeitung von Erkenntnissen aus Feldmessungen
- Wirtschaftlichkeit, Typologisierung

Motivation und Aufgabe:

- Lösungsansätze: Ersparnis und Wirtschaftlichkeit von QS bei konventioneller Heizungstechnik in Wohngebäuden

**Begleitete Projekte,
Anwendung der Ergebnisse.**

Begleitete Projekte:

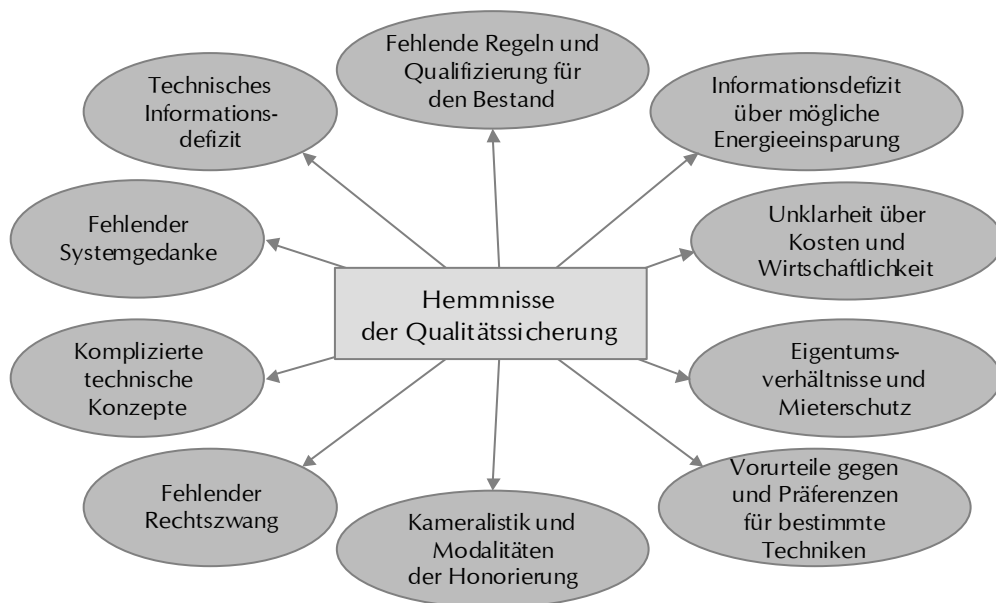
- NEH in der Expo-Siedlung Hannover/Kronsberg 1998 bis 2003 → Zwangsablüften von Wärme in Fluren
- Brennwertkessel im Feld (DBU) 1998 bis 2003 → Überströmventile und mittlerer Wirkungsgrad
- Begrenzung des Lüftungswärmeverbrauchs (BBR) 1999 bis 2002 → Verschwendungspotential durch Fremdwärme
- Verteilsysteme und Zwangswärmekonsum (Techem) 2001 → Zwangswärmekonsum Ein-/Zweirohheizung
- Optimierung von Heizungsanlagen „Optimus“ (DBU) seit 2002 → Zustand der Qualität von Heizungsanlagen

Künftige Anwendung:

- Auswertung von etwa 80 „Optimus“-Gebäuden
- verbrauchsorientierter Bestandsenergiepass
- Normung, Richtlinienarbeit

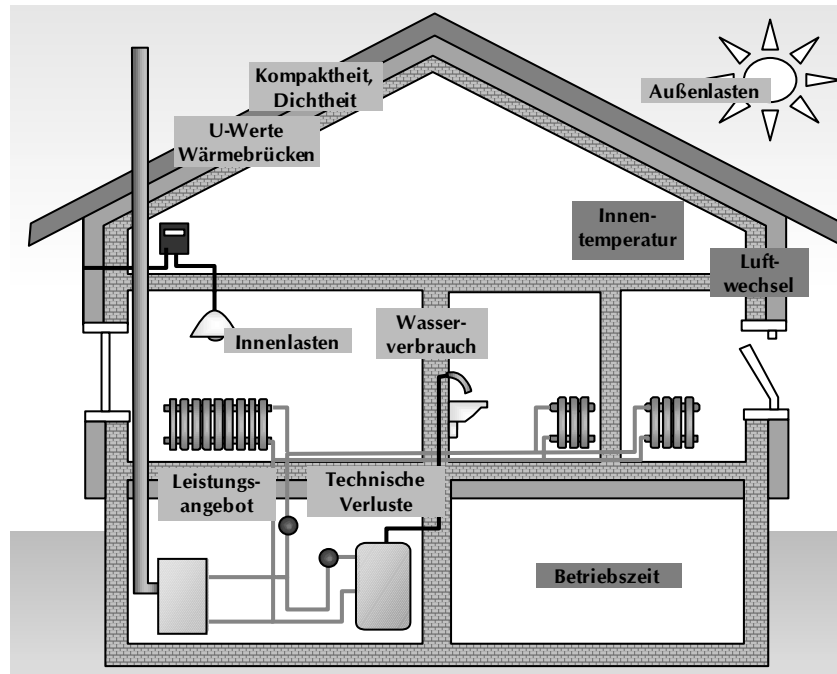
**Rahmenbedingungen und
Hemmnisse der QS.**

Rahmenbedingungen: rechtliche und technische Grundlagen



**Bauliche, nutzerbedingte und
anlagentechnische Einflüsse
auf die Energiebilanz.**

**Alle Qualitätsmerkmale
lassen sich durch bekannte
Bilanzgrößen ausdrücken.**



5/14

**Vorhandene Bilanzverfahren
und neue Ansätze,
 ΔQ -Verfahren.**

Untersuchung vorhandener Bilanzverfahren ergab:

- Einflüsse der Qualität der Anlage und Nutzung, der Regelung und Hydraulik werden derzeit nicht oder nur ungenügend abgebildet.
- Beispiele: monatlich konstante Luftwechsel, Fremdwärmenutzungsgrade, Bewertung innerer Fremdwärme aus Anlagentechnik, Bereinigung von Messwerten

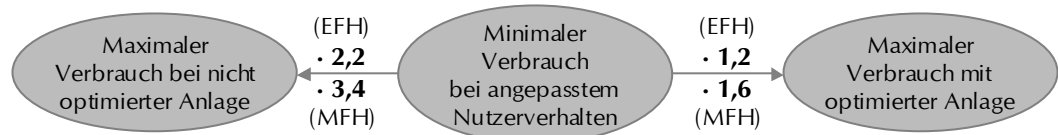
Problemlösung:

- „ ΔQ -Verfahren“
- alle veränderten Innentemperaturen, Luftwechseln, Heizzeiten, Systemtemperaturen bilden die **Differenzenergie ΔQ**

6/14

Typgebäude: maximaler Verbrauch. Verbrauchstypen und Handlungsanweisungen.

- Typgebäude: EFH (Baujahr vor 1977) und MFH (Baujahr nach 1978)
anlagentechnischen Merkmale aus Praxisuntersuchung an ca. 60 Gebäuden
- Kennwertbilanz ergibt:



Verbrauchstypen, Handlungsanweisungen

- | | | | |
|----|--|---|---------------------------------|
| 1: | extrem hoher Verbrauch mit Nutzung des Verschwendungspotentials der Anlagentechnik | → | vor allem
Technikoptimierung |
| 2: | leicht überhöhter, jedoch auch mit optimierter Technik erreichbarer Verbrauch | | |
| 3: | durchschnittlicher oder unterdurchschnittlicher Energieverbrauch | → | vor allem
Nutzerschulung |

7/14

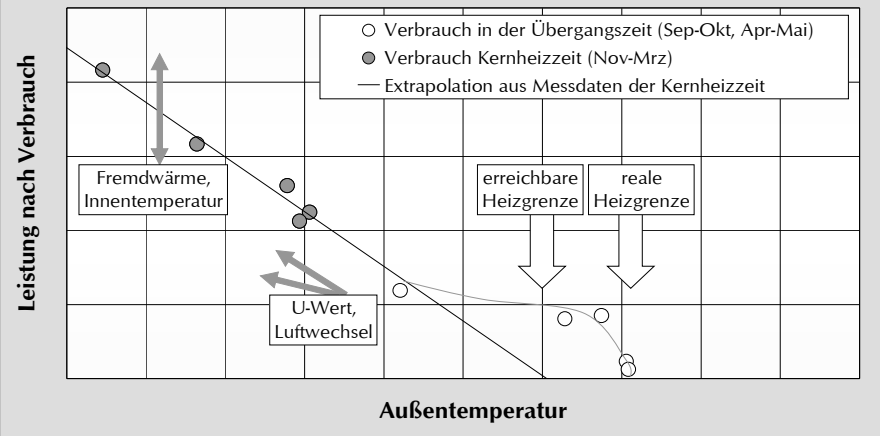
Sichtbarmachen des energetischen Einflusses von QS.

- | | |
|------------------------------------|---|
| Kennwertbilanz
oder Simulation: | <ul style="list-style-type: none"> • Bilanzierung „optimal“ ↔ Bilanzierung „real“ • Differenzenergiemenge ist der Einfluss der QS |
| Messung und
Typologisierung: | <ul style="list-style-type: none"> • Klassifizierung eines realen Messwertes innerhalb einer bestehenden Typologie/Kennwertdatenbank |
| Messung und
Interpretation: | <ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung eines Einsparpotentials aus (monatlichen) Messwerten |

8/14

Aussagekraft von Monatsmesswerten.

Aussage von Messdaten der Kernheizzeit und der Übergangszeit



Ableitbar sind

- für die Kernheizzeit: mittlerer Luftwechsel und mittlere Fremdwärmeleistung
- eine erreichbare Heizgrenze

Datenbasis für den Aufbau von Kennwertdatenbanken.

Vergleich von größeren Stichproben

- nicht optimiert
- optimiert erstellt
- nachträglich optimiert

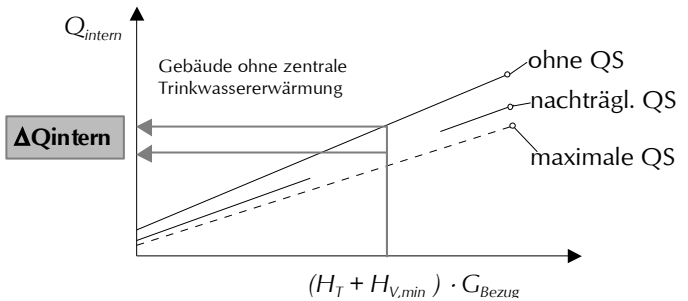
Vergleich von Gebäuden vor und nach Optimierung

Abschätzung von Einsparpotentialen

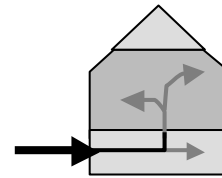
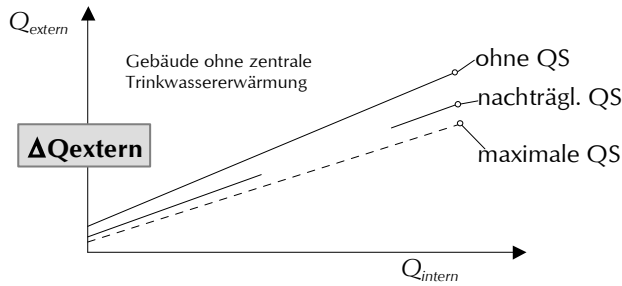
- aus Monatswerten
- aus Jahreswerten

Archivierung von berechneten Einsarpotentialen.

Wärmezufuhr in den beheizten Bereich
(z.B. Wohnbau, Gebäudegröße bis 250 m²)



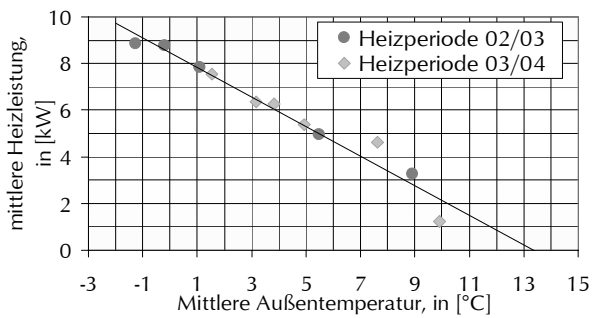
Technische Verluste außerhalb des beh. Bereichs
(z.B. Wohnbau, Versorgung mit Brennwertkessel)



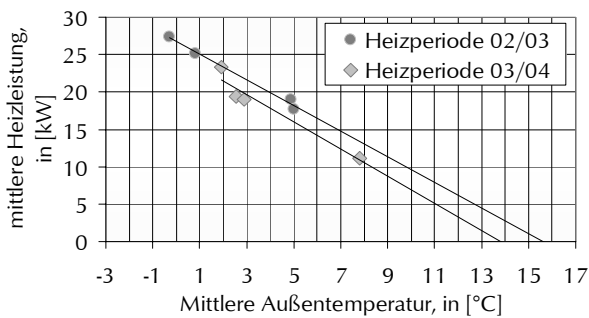
11/14

Praxiserkenntnisse „Optimus“ Braunschweig.

Gebäude 45 (MFH, 1998, Fernwärme)
keine Optimierung



Gebäude 44 (MFH, 1998, Fernwärme)
optimiert



- Investition etwa 1,1 €/m²
- notwendige Einsparung: etwa 3 kWh/(m²a)
- erreichte Einsparung: etwa 11 kWh/(m²a)

12/14

Wirtschaftlichkeitsbewertung im Neubau und Bestand.

Wirtschaftliche Bewertung:

- dynamischen Gesamtkostenverfahren
- indirekte wirtschaftliche Bewertung

Bewertung der Optimierung der Anlagentechnik im Bestand:

- in 4 Stufen von „gering investiv“ bis „hoch investiv“.
- Investitionen: $\approx 1,5 \text{ €/m}^2 \dots 5 \text{ €/m}^2$
- langfristige Mindesteinsparungen: $\approx 5 \dots 10 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ thermische Energie

Neubau:

- 5 ... 8 €/m² oder **0,5 % der Investition** für Optimierung
- Wirtschaftlichkeit bei Energieeinsparungen von 10 ... 15 kWh/(m²a).

13/14

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.
Für Fragen stehe ich gern zur Verfügung.

Bei der Energiedatenuntersuchung von Gebäuden, insbesondere bei baulich modernisierten Gebäuden, die keine nachträgliche Anlagenanpassung erfahren haben, ist häufig eine Diskrepanz zwischen tatsächlichen Energieverbrauchswerten und theoretischen Bedarfswerten festzustellen. Der Energie-mehrverbrauch kann vielfach auf Verschwendungspotentiale oder sogar auf einen Zwangswärmekonsum zurückgeführt werden, die dem Nutzer durch die vorhandene, nicht in Planung und Ausführung angepasste Anlagentechnik angeboten wird.

Die Vermeidung oder Minimierung des energetischen Verschwendungspotentials durch Wahl und Betrieb einer optimalen Anlagentechnik und die dadurch erreichbaren Energieeinsparungen im Neubau und Bestand sind Gegenstand der Untersuchungen. Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung von Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen der Heizungsanlagentechnik und von Vorschlägen zu deren Realisierung.

Schwerpunkte: Randbedingungen und Hemmnisse für die Qualitätssicherung, Energiebilanzverfahren zur Bewertung von Anlagen- und Nutzungsqualität, Einflüsse von Anlageneigenschaften auf die Energiebilanz, Verfahren zur Energiedatenauswertung und Interpretation monatlich oder jährlich erfasster Verbrauchsdaten, Typlogisierung von Verbrauchsdaten, wirtschaftliche Bewertung, Hinweise zur Umsetzung von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Zur Autorin



Kati Jagnow: Jahrgang 1977, geboren in Pasewalk; Abitur 1996 in Potsdam, Studium der Technischen Gebäudeausrüstung an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Diplom 2001, Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Trainings- und Weiterbildungszentrum Wolfenbüttel e.V. an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel und parallel Promotion an der Universität Dortmund 2001 bis 2003, Abschluss der Promotion 2004, selbstständige Ingenieurin im Bereich TGA und Energietechnik in Wernigerode seit 2004.